

doi:10.3788/gzxb20154404.0406004

光纤耦合三角形金柱阵列的等离子体共振

罗云瀚,毛培玲,陈超英,彭水华,王芳,方俊彬,张军,唐洁媛,卢惠辉,余健辉,陈哲

(暨南大学 光电工程系 光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室,广州 510632)

摘要:为了满足表面等离子体传感器高灵敏度、高线性以及较大测量范围的需求,提出侧边抛磨光纤耦合的三角形纳米金柱阵列等离子体共振传感模型.用有限元法仿真得出侧边抛磨光纤倏逝场激发出三角形纳米金柱的三种等离子体共振模式,分别为传输等离子体、三角形纳米金柱的本征等离子体和柱间等离子体,在传感器透射谱中呈现三个共振波谷.本征等离子体和柱间等离子体均属于局域等离子体,所对应的共振波谷对外界环境折射率的灵敏度较低但具有很高的线性度.传输等离子体对应的波谷随折射率变化灵敏度很高且呈非线性关系,优化后三角形金柱阵列设计中,当折射率为 1.38~1.42RIU 时,灵敏度高达 12 882 nm/RIU.该传感结构集成了侧边抛磨光纤的强倏逝场,具有传输等离子体的高灵敏度、局域等离子体的高线性度和大测量动态范围等优点,有重要的研究意义和实用价值.

关键词:表面等离子体共振;侧边抛磨光纤;有限元法;三角形纳米金柱阵列;灵敏度;线性度;大测量动态范围

中图分类号:O433; O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)04-0406004-7

Side-polished Fiber Coupled Plasmon Resonance Based on Triangle Nano-rod Array

LUO Yun-han, MAO Pei-ling, CHEN Chao-ying, PENG Shui-hua, WANG Fang, FANG Jun-bin,
ZHANG Jun, TANG Jie-yuan, LU Hui-hui, YU Jian-hui, CHEN Zhe

(Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institutes,
Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: In order to obtain a high sensitivity, linearity and large dynamic measuring range, a physical model for a novel surface plasmon resonance sensor coupled by side polished fiber and triangular nano-rod array was proposed. By using Finite Element Method (FEM), the strong evanescent field escaped from the polished region of the fiber excites three kinds of plasmon resonances, which are Propagating Surface Plasmon Resonance (PSPR), Intrinsic Surface Plasmon Resonance (ISPR) of the triangular nano-rod, and the Inter-rod Surface Plasmon Resonance (IrSPR), and correspondingly results in three resonance valleys in the transmission spectra of the sensor. Both the ISPR and the IrSPR are of Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR), and present a relatively low sensitivity while yields in a high linearity to the change of the environment refractive index. On the contrary, the propagating surface plasmon resonance shows a high sensitivity but a nonlinear dependence to the change of refractive index. In the optimized design with a height of 100 nm for the triangular gold nano-rod, a sensitivity up to 12 882 nm/RIU is achieved in the range of 1.38~1.42 RIU. The proposed sensing structure utilizing the strong evanescent field of side

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61177075, 61008057, 11004086, 61475066, 61405075)、广东省战略性新兴产业核心技术攻关项目(Nos. 2012A032300016, 2012A080302004, 2011A081302002, 2012A080301002)、广东省学科建设专项资金(No. 2013CXZDA005)、中央高校基本科研业务费专项资金(Nos. 21614313, 21613325, 21613405)和东南大学生物电子学国家重点实验室开放研究基金(No. 2014H09)资助

第一作者:罗云瀚(1979-),男,副研究员,博士,主要研究方向为光电检测技术,光纤传感与器件,微流控光学,生物医学光学,近红外光谱应用. Email: yunhanluo@163.com

通讯作者:陈哲(1957-),男,教授,博士,主要研究方向为先进光学微加工和微制造,光纤网络与器件,光纤通信与传感技术,光机电一体化系统,光学系统设计及应用,生物医学仪器,摄像测量技术等. Email: thzhechen@jnu.edu.cn

收稿日期:2014-09-11; **录用日期:**2014-12-01

<http://www.photon.ac.cn>

polished fiber, integrates the merit of high sensitivity from propagating surface plasmon resonance, and also the merits of high linearity and large dynamic measuring range from localized surface plasmon resonance. The novel design has important research significance and is believed to developed into an important practical sensing platform.

Key words: Surface plasmon resonance; Side-polished fiber; Finite element method; Triangular gold nano-rod array; Sensitivity; Dynamic measurement range

OCIS Codes: 060.2370; 240.6680; 250.5403; 130.6010

0 引言

表面等离子体共振 (Surface Plasmon Resonance, SPR) 是一种发生在金属与电介质界面的物理现象, 对附着在金属表面的电介质折射率非常敏感, 在生物、医学和化学领域的检测中有重要的应用^[1-5]. 基于光纤的表面等离子体共振传感器, 利用光纤的良好导光特性, 可制成体积小、成本低、可远程传输的传感器, 在食品安全、水质监控、环境卫生等有极大的应用需求^[6-9]. 为了提高光纤表面等离子体共振传感器的性能, 采用了不同光纤结构, 或采取不同光纤二次加工技术, 例如侧边抛磨技术^[1,10]、拉锥技术^[11-13]、D 型光纤^[14]、光纤光栅等^[15]. 在这些传感器结构中, 侧边抛磨光纤具有制作简单、机械强度大、倏逝场可控等优点^[16], 备受广大研究者青睐. 在光纤表面等离子体共振传感中, 研究者们利用光纤的倏逝场激发传输表面等离子体, 通过优化侧边抛磨光纤的包层剩余厚度和传感器金属膜的厚度来提高表面等离子体共振传感器的折射率传感灵敏度^[17]. 但是折射率传感灵敏度的增大, 同时会带来测量范围变小, 缩小了传感器的应用范围. 而且, 随着折射率变化范围较大时, 共振波长随折射率的变化呈现非线性关系^[6], 给实际测量和标定带来困难. 因此, 研制一种具有大测量范围、高灵敏度同时具有线性响应的表面等离子体共振传感器具有重要的实际意义. 纳米贵金属颗粒具有很大散射截面, 能形成局域等离子体共振^[18-23], 是光与金属纳米结构相互作用时形成的局域在金属表面的一种自由电子激发态, 在光谱上表现为金属纳米颗粒或结构对光的吸收和散射现象, 吸收和散射光谱的总和称为消光光谱, 也称为 LSPR 光谱^[24]. 排列非常致密时, 纳米线之间的耦合相互作用非常强^[25-26]. 局域等离子体共振波长随折射率呈很好的线性关系^[27], 但是灵敏度相对较低, 而且不易与光纤传感系统集成.

本文提出了在侧边抛磨单模光纤抛磨区覆盖三角形纳米金柱阵列, 使得光纤传感器呈现 3 个共振吸收波谷, 根据不同波谷对折射率变化的响应特性, 可同时提供高灵敏度的传输表面等离子体共振和低灵敏度、大测量范围且高线性度的局域表面等离子体共振两种传感模式.

1 理论模型

图 1 是侧边抛磨单模光纤表面等离子体共振传感器的示意图. 图中光纤包层和纤芯的直径分别为 $125 \mu\text{m}$ 和 $8 \mu\text{m}$, 对应的折射率分别为 1.4378RIU (Refractive index unit) 和 1.4457RIU , 抛磨区长度为 L , 抛磨区的剩余包层厚度为 $0 \mu\text{m}$. 如图 1(a), 纳米金柱阵列沿着光纤纵向覆盖在侧边抛磨区的抛磨区, 纳米金柱为等边三角形, 三角形的高为 D . 如图 1(b) 建立的直角坐标系, 以单模光纤纤芯中心位置作为坐标原点, x 轴平行于光纤抛磨面, y 轴垂直于光纤抛磨面.

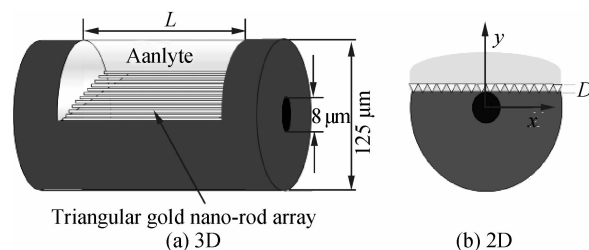


图 1 基于金三角纳米柱阵列结构的光纤表面等离子体共振传感器模型

Fig. 1 The 3D and 2D schematic of side-polished fiber optic SPR sensor based on the gold triangle nano-rod array

侧边抛磨光纤 SPR 传感器模型如图 1 所示, 其原理可用耦合模式理论来解释. 光从光纤抛磨区的“窗口”泄漏出来, 在光纤纤芯与金属两种具有不同介电属性的介质分界面发生全反射时产生的倏逝波激发三角形纳米金柱表面的自由电子, 在三角形纳米金柱与光纤纤芯的分界面产生表面等离子体波 (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. 由于三角形纳米金柱之间也存在电场耦合, 所以会导致不同的耦合模式, 从而产生不同的共振波谷. 其中三角形纳米金柱的介电常数可以根据 Drude 色散模型^[14]得到, 即

$$\epsilon_m(\lambda) = 1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_p^2(\lambda_c + j\lambda)} \quad (1)$$

式中, λ_c 和 λ_p 分别表示等离子体波长以及碰撞波长.

$$n_m(\lambda) + jk_m(\lambda) = \sqrt{\epsilon_m(\lambda)} \quad (2)$$

n_m 和 k_m 分别是其有效折射率的实部以及虚部.

利用有限元法可以计算出侧边抛磨单模光纤表面等离子体共振传感器 (图 1 所示) 的透过率光谱, 即

$$T(\lambda) = \exp \left[-\frac{4\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) L \right] \quad (3)$$

式(3)中 T 和 n_{eff} 分别表示透过率和有效折射率, λ 表示波长, Im 表示取复折射率的虚部运算.

$$S = \Delta\lambda / \Delta n \quad (4)$$

式(4)中 $\Delta\lambda$ 以及 Δn 分别表示共振波长的漂移量以及环境折射率的变化量.

2 结果分析

2.1 纳米金柱结构参数优化

为了优化光纤 SPR 传感器的性能,以传感器的共振波长随折射率变化的灵敏度 S 为优化目标,分别模拟仿真了高度分别为 60 nm 到 120 nm 的 7 种等边三角形纳米金柱. 传感器抛磨区的横截电磁场分布如图 2(a)所示. 所用光纤虽然为单模光纤,但是在抛磨区的会有多个光波传输模式存在. 图 2(b)显示的是纳米金柱的 $D=100$ nm 时,在光纤纤芯中传输的一阶模. 图 2(c)是纳米金柱周围电磁场. 图 3 是通过三角形上顶角垂直于抛磨面的直线上的电场强度分布,图 4 是通过三角形的下角垂直于抛磨面的直线上的电场强度分布. 从图 3、图 4 可以看出,在靠近三角形纳米金柱附近处呈现电场的急剧增强,从该两幅图右上角局部放大图可以看出在 $y=4.1 \mu\text{m}$ 以及 $y=4 \mu\text{m}$ 附近(即在两根三角形纳米金柱的交界顶角处以及三角形纳米金柱的底角处),场强有一个增强值,强度分别为 3×10^7 V/m 和 8×10^6 V/m,这是由于光纤纤芯的半径为 $4 \mu\text{m}$,在纤芯的表面的倏逝场与三角形纳米金柱的

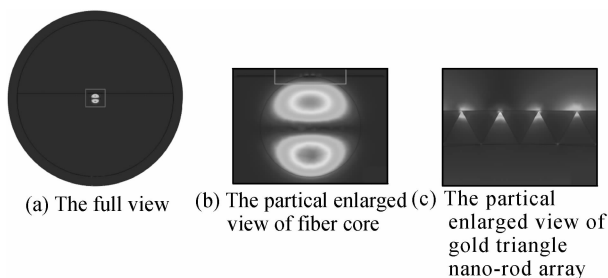


图 2 光纤横截面模场分布

Fig. 2 The fiber cross section field distribution

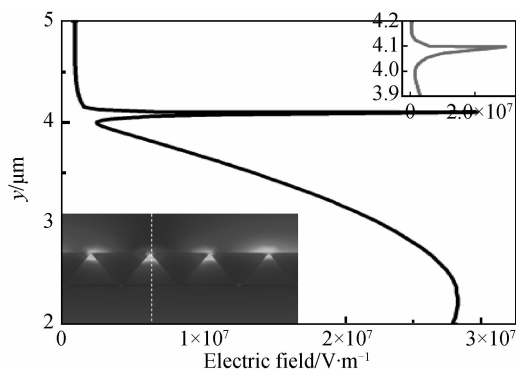


图 3 沿着 y 轴电场的分布曲线 ($y=4.1 \mu\text{m}$)

Fig. 3 Electric field density along the y -axis ($y=4.1 \mu\text{m}$)

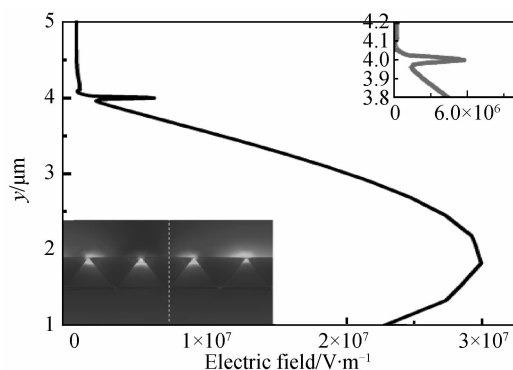


图 4 沿着 y 轴电场的分布曲线 ($y=4 \mu\text{m}$)

Fig. 4 Electric field density along the y -axis ($y=4 \mu\text{m}$)

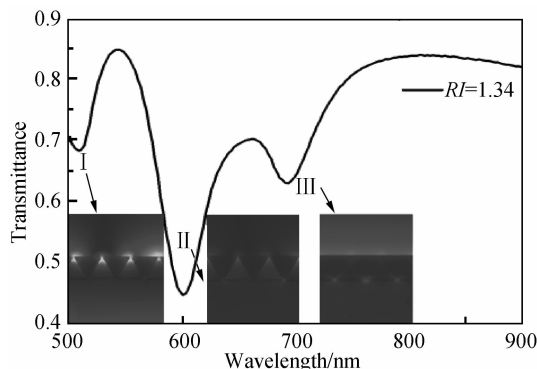


图 5 环境折射为 1.34RIU 时该传感器的透过率曲线

Fig. 5 The transmittance of the sensor when the $RI=1.34$

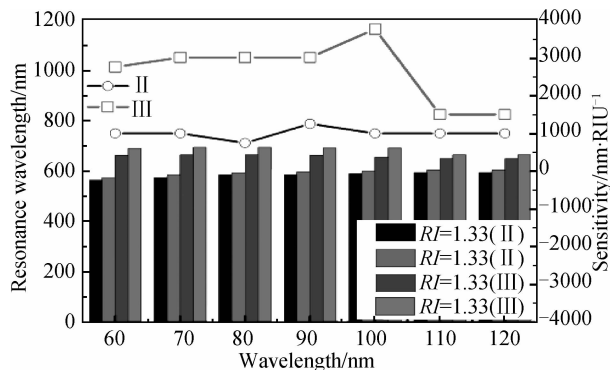


图 6 共振波长和灵敏度随三角形纳米金柱高度的变化关系

Fig. 6 The resonance wavelength and the sensitivity of this

sensor with the different altitude of the triangle

等离子体之间发生了共振,实现了局域的电磁场增强.

通过式(1)的计算得到传感器的透射光谱如图 5 所示(以环境折射率 $RI=1.34$ RIU 为例),从图 5 得知,三角形纳米金柱阵列会使得 SPR 传感器具有三个共振吸收波谷分别为 I、II、III,对应波长分别为 507.52 nm、600.25 nm 和 692.98 nm,图 5 中的插图分别是三个共振波长下的电场分布. 从这三个模场图可以看到,共振波谷 I 对应的共振波长更短,其电场主要集中在三角形的顶部两个顶角;共振波谷 II、III 对应的共振波长更长,其电场集中分布在三角形的下顶角. 继续计算三角形纳米金柱的高度 D 分别是 60 nm 到 120 nm 的 7 种不同情况在环境折射率为 1.33RIU 和 1.

34RIU时的共振波谷Ⅱ和Ⅲ的位置,如图6中七组柱状图所示,第一、二柱状图分别表示折射率为1.33RIU和1.34RIU时,第二组共振波谷的共振波长,第三、第四分别表示折射率为1.33RIU和1.34RIU时,第三组共振波谷的共振波长.在环境折射率一致时,三角形的高度不同,共振波谷所在波长也发生了变化.当环境折射率从1.33RIU变化到1.34RIU的时,不同高度对应的共振波长以及灵敏度如图6中两条曲线所示(上方一条对应第三组共振谷,下方一条对应第二组共振谷).从图6中可以看出,当等边三角形的高为90 nm时,共振波谷Ⅱ的灵敏度达到最大值1 253 nmRIU;而共振波谷Ⅲ的灵敏度在等边三角形的高为100 nm时达到最大值3 759 nm/RIU.由于共振波谷Ⅲ的灵敏度普遍高于共振谷Ⅱ,所以下分析采用共振波谷Ⅲ达到最大灵敏度值的最优化条件.

2.2 传感特性

因为三角形纳米金柱阵列的SPR传感器具有三个共振波谷(如图7、图8、图9),并且三角形的最佳高度是100 nm,在此部分,主要模拟计算在最佳高度情况下共振波谷随着环境折射率的变化情况.研究的环境折射率范围从1.30RIU到1.44RIU.为了更清晰地展示各个共振波谷随折射率变化在光谱上的移动,三个共振波谷Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ分别用图7、图8、图9表示.三组共振波谷都是随着环境折射率的增大向长波方向漂移,并且图7、图8两组共振波谷的深度也随着折射率的增大逐渐变深.由于最佳共振条件具有多极值情况,导致整个共振谷Ⅲ的漂移并不是单调的.所以,图9中共振波谷Ⅲ呈现出先变浅后变深再变浅后变深的趋势.

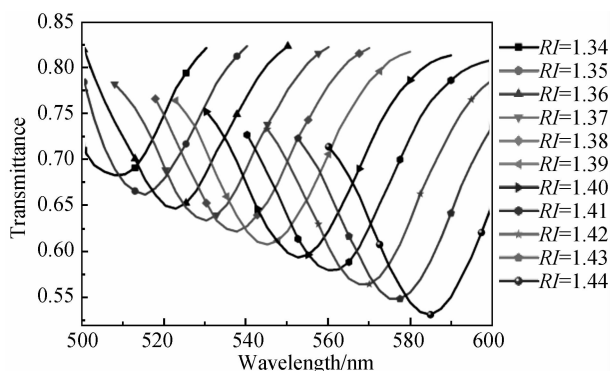


图7 第一组共振波谷在环境折射率从1.34变化到1.44时的漂移情况

Fig.7 The wavelength shifts of the first resonance wavelength with the different RIU in a range of 1.34-1.43RIU

取每个共振波谷的最低值对应的波长为共振波长,图10中的曲线Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ分别表示三组共振波长随着环境折射率的变化情况,显然,曲线Ⅰ、Ⅱ具有很好的线性,拟合得到的斜率分别为779 nm/RIU和

1 091 nm/RIU,换言之,共振波谷Ⅱ随折射率变化的灵敏度要高于共振波谷Ⅰ.图10中曲线Ⅲ随着环境折射率增大呈现非线性关系,用指数函数拟合的相关系数为0.999.在环境折射率分别从1.30~1.33RIU、从1.33~1.38RIU以及从1.38~1.42RIU时,该传感器的平均灵敏度分别达到了1 337nm/RIU、4 094 nm/RIU和12 882 nm/RIU.

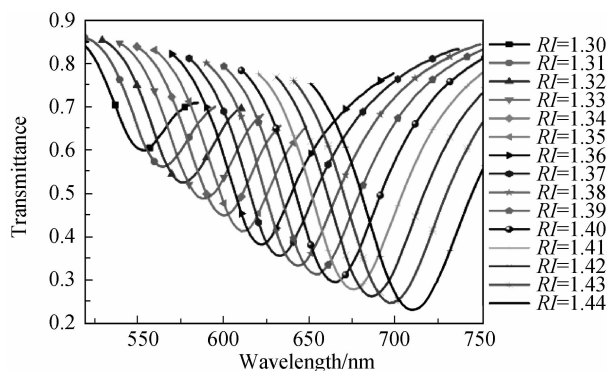


图8 第二组共振波谷在环境折射率从1.3变化到1.44时的漂移情况

Fig.8 The wavelength shifts of second resonance wavelength with the different RIU in a range of 1.30-1.44RIU

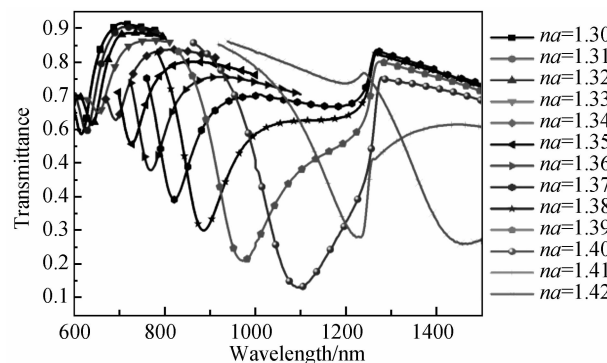


图9 第三组共振波谷在环境折射率从1.3变化到1.42时的漂移情况

Fig.9 The wavelength shifts of third resonance wavelength with the different RIU in a range of 1.30-1.44RIU

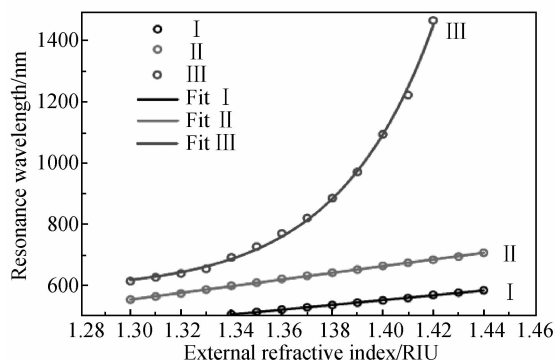


图10 三组共振波谷的线性

Fig.10 The linearity of those three resonance dips

2.3 分析和讨论

为了分析三角形纳米金柱阵列传感器的共振光谱

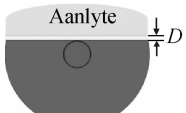
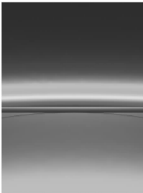
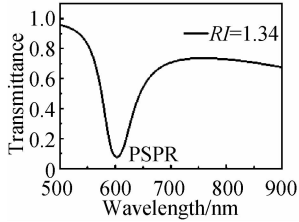
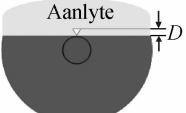
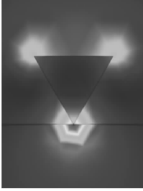
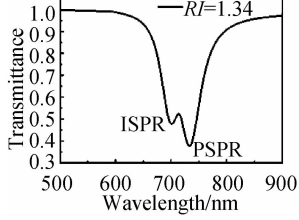
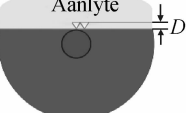

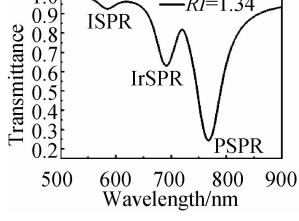
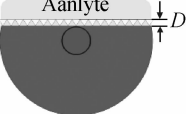
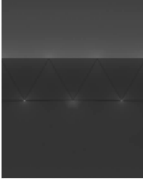
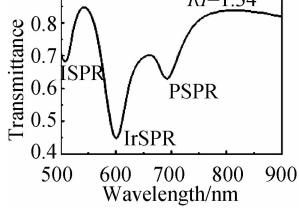
中三个波谷的原因,继续模拟了金膜覆盖以及单个和两个纳米金柱覆盖的光纤表面等离子共振模型.其中金膜的厚度选取优化后的 50 nm^[28],三角形纳米金柱均为高度为 100 nm 的等边三角形柱.

表 1 的第一列表示不同结构的传感结构的模型图,第二、第三列分别表示在外界折射率 $RI=1.34RIU$ 时对应的电场分布和共振光谱.在侧边抛磨单模光纤的抛磨区镀一层金膜,光纤抛磨面的倏逝场耦合到纳米金膜,金膜附近有很强的电磁场增强,形成了传输表面等离子共振 (PSPR).当将金膜换成是高度为 100 nm 的单个三角形纳米金柱,透射光谱就有两个共振波谷.这是由于纳米金柱与光纤接触的下底角之间产生了传输等离子共振,而纳米金柱本身的三角形结构产生一个本征等离子共振 (ISPR),这两个等离子共振的波长

并不一致,因此在光谱上产生两个共振波谷.除了传输等表面离子共振和本征表面等离子共振外,当三角形金柱相互靠近到局域等离子共振的作用范围内(10~20 nm)或者相互接触时,会产生金柱间的表面等离子共振 (IrSPR),形成第三个的共振波谷.分别计算环境折射率从 1.33RIU 变化到 1.34RIU 时,四种结构中不同的共振模式的共振波长漂移,依据式(2)即可得到它们对应灵敏度,如表 1 中第 5~7 列所示.对比这几种传感器结构不同模式的灵敏度可以发现,传输表面等离子体共振的灵敏度要高于局域表面等离子体共振.比较不同结构的传输表面等离子共振的灵敏度,在三角形纳米金柱阵列结构中取得最大值,达到了 3 759 nm/RIU,比金膜结构的传感器的灵敏度 2 764 nm/RIU 高出了 36%.

表 1 不同传感结构的特性比较

Table 1 The characteristic comparison of different sensor structures

Model	Electric field (PSPR)	Resonance spectrum	Sensitivity(nm/RIU)		
			PSPR	ISPR	IrSPR
 Gold nano film			2764		
 Single triangular gold nano-rod			1003	1003	
 Double triangular gold nano-rod			1253	1003	501
 Triangular gold nano-rod array			3759	1253	752

3 结论

通过本文的模拟仿真计算,得出将传统光纤 SPR 传感器上的金膜换成与光纤轴向方向平行的三角形纳米金柱阵列,可以提高光纤 SPR 传感器的灵敏度. 三角形金柱之间的相互耦合会使得传感器产生新的共振波谷,通过改变三角形纳米金柱的高度,得出最佳的参数使得该传感器得到最高的灵敏度. 通过比较不同传感结构的模场图和光谱图,确定出每一个共振波谷对应的形成机制,并分别计算出共振模式的灵敏度. 随着外界环境折射率的不断增大,局域的表面等离子共振波谷具有很高的线性并且 SPR 传感器的共振波谷向长波方向漂移,漂移程度逐渐增大. 传输表面等离子共振波谷具有较高的灵敏度,在环境折射率区间 $1.30 \sim 1.33$ RIU 灵敏度 1337 nm/RIU 低于传统的基于金膜结构的光纤 SPR 传感器灵敏度 2167 nm/RIU , 而从 $1.33 \sim 1.38$ RIU 和 $1.38 \sim 1.42$ RIU 时,该传感器的平均灵敏度分别达到了 4094 nm/RIU 和 12882 nm/RIU , 均高于传统的基于纳米金膜结构的光纤 SPR 传感器的灵敏度 3900 nm/RIU 、 10010 nm/RIU . 因此,根据不同测量需求,本文提出的在侧边抛磨光纤的抛磨面覆盖三角形纳米金柱阵列的传感模型,不仅可以获得高于传统金膜结构的灵敏度,还可以获得灵敏度相对较低但较高线性度和较大的测量范围.

参考文献

- [1] JITENDRA N D, RAIAN J. Graphene based birefringent photonic crystal fiber sensor using surface plasmon resonance [J]. *Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(11):1092-1095.
- [2] WU L, CHU H S, KOH W S, *et al.* Highly sensitive graphene biosensors based on surface plasmon resonance [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(14):14395 - 14399.
- [3] HE Yue-Jing. High-performance localized surface plasmon resonance fiber sensor based on nano-metal-gear array [J]. *Sensors and Actuators B*, 2014, **193**:778-787.
- [4] SANDRINE L, ALYSSA S, ANATOLI I, *et al.* Improved detection limits of protein optical fiber biosensors coated with gold nanoparticles [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2014, **52**:337-344.
- [5] CHEN Xiao-long, LUO Yun-han, XU Meng-yun, *et al.* Refractive index and temperature sensing based on surface plasmon resonance fabricated on a side-polished fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(2):0206005.
陈小龙, 罗云瀚, 徐梦云, 等. 基于侧边抛磨光纤表面等离子体共振的折射率和温度传感研究 [J]. *光学学报*, 2014, **34**(2):0206005.
- [6] ZHAO Yong, DENG Ze-qun, WANG Qi. Fiber optic SPR sensor for liquid concentration measurement [J]. *Sensors and Actuators B*, 2014, **192**:229-233.
- [7] TAN Zhi-xin, LI Xue-jin, CHEN Yu-zhi, *et al.* Improving the sensitivity of fiber surface plasmon resonance sensor by filling liquid in a hollow core photonic crystal fiber [J]. *Plasmonics*, 2013, 2014, **9**(1):167-173.
- [8] YUAN Yin-quan, DING Li-yun, GUO Zhen-qiang. Numerical investigation for SPR based optical fiber sensor [J]. *Sensors and Actuators B*, 2011, **157**(1):240-245.
- [9] YU Xia, ZHANG Ying, PAN Shan-shan, *et al.* A selectively coated photonic crystal fiber based surface plasmon resonance sensor [J]. *Journal of Optics*, 2010, **12**(1):1-4.
- [10] TAN Zhi-xin, HAO Xin, SHAO Yong-hong, *et al.* Phase modulation and structural effects in a D-shaped all-solid photonic crystal fiber surface plasmon resonance sensor [J]. *Optical Society of America*, 2014, **22**(12):15049-15063.
- [11] CENNAMO N, D'AGOSTINO G, PESAVENTO M, *et al.* High selectivity and sensitivity sensor based on MIP and SPR tapered plastic optical fibers for the detection of l-nicotine [J]. *Sensors and Actuators B*, 2014, **191**:529-536.
- [12] MARÍA C N, NATALIA D H, AGUSTIN G C, *et al.* A polarization independent SPR fiber sensor [J]. *Plasmonics*, 2010, **5**(1):7-12.
- [13] MARÍA C N, NATALIA D H, AGUSTIN G C, *et al.* Surface plasmon resonance in the visible region in sensors based on tapered optical fibers [J]. *Sensors and Actuators B*, 2014, **190**:881-885.
- [14] SANTOS D F, GUERREIRO A, BAPTISTA J M. Numerical investigation of a refractive index SPR D-type optical fiber sensor using COMSOL multiphysics [J]. *Photonic Sensors*, 2013, **3**(1):61-66.
- [15] ŠPAČKOVÁ B, HOMOLA J. Theoretical analysis of a fiber optic surface plasmon resonance sensor utilizing a bragg grating [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(25):23254-23264.
- [16] DWIVEDI Y S, SHARMA A K, GUPTA B D. Influence of skew rays on the sensitivity and signal-to-noise ratio of a fiber-optic surface-plasmon-resonance Sensor; a theoretical study [J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(21):4563-4569.
- [17] NAJIMINAINI M, ERDEN E, JIANG Hao, *et al.* Three dimensional metallic nanostructures for bulk and bio-SPR sensing applications [C]. *Plasmonics in Biology and Medicine XI*, 2014, **8957**:605-7422.
- [18] PANG Lin, HWANG G M, SLUTSKY B, *et al.* Spectral sensitivity of two-dimensional nanohole array surface plasmon polariton resonance sensor [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(12):123112.
- [19] KEGEL L L, BOYNE D, BOOKSH K S. Sensing with prism-based near-infrared surface plasmon resonance spectroscopy on nanohole array platforms [J]. *Analytical Chemistry*, 2014, **86**(7):3355-3364.
- [20] GALLINET B, MARTIN O J F. Influence of electromagnetic interactions on the line shape of plasmonic fano resonances [J]. *American Chemical Society*, 2011, **5**(11):8999-9008.
- [21] YAN Hong-dan, PETE L, JOHANNES A, *et al.* High-density array of au nanowires coupled by plasmon modes [J]. *Acta Physica Sinica*, **61**(23):237051-237056.
闫红丹, PETE L, JOHANNES A, 等. 基于表面等离子体耦合的高密度金纳米线阵列 [J]. *物理学报*, 2014, **61**(23):237051-237056.
- [22] VERELLEN N, FERNANDO L T, RAMÓN P D, *et al.* Mode parity-controlled fano- and lorentz-like line shapes arising in plasmonic nanorods [J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(5):2322-2329.
- [23] MA Ye-wan, WU Zhao-wang, ZHANG Li-hua, *et al.* Theoretical study of the local surface plasmon resonance properties of silver nanosphere clusters [J]. *Plasmonics*, 2013, **8**(3):1351-1360.
- [24] WANG Jing, XIONG Gui-guang. Analysis and calculation of optical nonlinear enhancement factor of metallic nano-wire array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2):233-236.

- 王敬,熊贵光. 金属纳米线阵列的光学非线性增强因子的分析和计算[J]. 光子学报,2004,**33**(2):233-236.
- [25] MA Wen-ying, YANG Huan, YAO Jun, *et al.* Organic vapor sensing methods based on silver triangular nano-prisms[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(9):1557-1561.
- 马文英,杨欢,姚军,等. 三角形银纳米柱阵列传感乙醇气体方法[J]. 光子学报,2010,**39**(9):1557-1561.
- [26] MAYER K M, HAFNER J H. Localized surface plasmon resonance sensors[J]. *Chemical Reviews*, 2011, **111**(6):3828 - 3857.
- [27] SONG Chao, HAO Peng, YU Mu-xin, *et al.* Enhancing electric field with gold subwavelength slits and nanowires [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1):0116001.
- 宋超,郝鹏,余慕欣,等. 金纳米线与亚波长狭缝结合实现局域场增强研究[J]. 光子学报,2014,**43**(1):0116001.
- [28] SHARMA N K. Performances of different metals in optical fiber based surface plasmon resonance sensor[J]. *Pramana*, 2012, **78**(3):417-427.