

文章编号: 1001-3806(2016)02-0209-04

基于 SPR 增强的开放式悬挂芯光纤集成芯片

谭绪祥^{1,2}, 王冠军^{1,2*}, 王志斌^{1,2}

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051; 2. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 太原 030051)

摘要: 为了有效提升光纤表面等离子体共振 (SPR) 传感器场增强效果的响应速度和场增强特性, 采用悬挂芯光纤结合表面等离子体共振增强检测机理来提高表面场增强程度, 提出了一种新型的光纤 SPR-表面场增强芯片结构。采用有限元理论分析了上述结构的光场特性, 由分析可知, 当薄膜层在 40nm ~ 50nm 附近时存在比较强的场增强; 场增强程度与激发 SPR 共振波长密切相关; 而缩小包层厚度、降低纤芯折射率对比度也有利于大幅度增加场增强强度, 但半径和包层厚度变化对穿透深度几乎没有影响。结果表明, 优化后的光纤芯片具有较高的场增强效果。该研究为高灵敏、快速流体检测应用提供了一种解决思路。

关键词: 光纤光学; 表面等离子体共振; 开放式悬挂芯光纤; 光纤芯片**中图分类号:** TN253 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.02.012

Opened suspended core fiber chip based on surface plasma resonance enhancement mechanism

TAN Xuxiang^{1,2}, WANG Guanjun^{1,2}, WANG Zhibin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Instrumental Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: For solving the problems of low surface intensity enhancement and slow response speed of fiber surface plasma resonance (SPR) sensors, a new type of optical fiber SPR-induced surface enhancement chip structure was proposed by using the mechanism of surface plasma resonance to improve the surface field enhancement degree. The characteristics of the proposed chip structure were analyzed based on the finite element method. When Au film layer thickness was near 40nm ~ 50nm, a stronger field enhancement appeared. The degree of field enhancement was closely related with the transmitting wavelength. Reduction of cladding thickness, core diameter and refractive index contrast could increase the degree of field intensity enhancement, but radius and thickness of cladding had almost no effect on penetration depth. The results show that a good surface enhancement effort is feasible after optimization. The study could be beneficial for the application of fluid testing with high sensitivity and rapidity.

Key words: fiber optics; surface plasma resonance; opened suspended core fiber; fiber chip

引言

表面等离子体共振 (surface plasma resonance, SPR) 是由入射光波和金属导体表面的自由电子相互作用而产生, 金属薄膜表面可产生显著的局域场增强^[1-2], 此方面的研究有望发展为具有超高检测灵敏度的新型表面等离子体和表面增强光谱传感系统。20

世纪 90 年代初出现了光纤式 SPR 传感器^[3]。与棱镜 SPR 传感器相比, 它的体积小、灵敏度高、成本低。目前存在的 SPR 检测所使用的光纤类型覆盖锥形光纤^[4]、D 型光纤^[5]、光子带隙型微结构光纤^[6]和全反射型微结构光纤^[6]等。

但是, 直到近几年光纤 SPR 现象的高密度场增强特性才得以被人们充分重视, 并开始研究和传统的荧光或 Raman 光谱相结合以实现超高灵敏度荧光技术 (surface enhanced fluorescence, SEF) 及 Raman 技术。特别是基于壳层隔绝纳米粒子增强喇曼光谱效应比传统 Raman 光谱强 10^6 量级的表面增强 Raman 散射 (surface enhanced Raman scattering, SERS) 技术的出现^[7], 使得人们又憧憬把光纤 SPR 增强和 SHINER 增强两种增强机制结合起来开发更加灵敏的检测技术。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61405127); 山西省青年基金资助项目 (2014021023-1); 中国博士后科学基金资助项目 (2014M562202)

作者简介: 谭绪祥 (1987-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光传感与光电探测方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wangguanjun@163.com

收稿日期: 2015-01-14; 收到修改稿日期: 2015-03-16

另外,现有光纤 SPR 系统大都基于锥形、侧面部分抛光型单模/多模光纤或常规气孔闭合式微结构光纤,存在不同程度的结构脆弱或响应速度过慢问题。通过扩大气孔尺寸来加大流体传输和缩短扩散时间的改善效果十分有限^[8-9]。为提高光纤 SPR 流体传感器的响应时间,目前已出现一些新型结构的开放式 SPR 光纤^[10]。也有利用 D 型微结构光纤进行 SPR 实验的报道^[11]。但就如何在光纤结构稳定性和 SPR 特性之间寻求平衡仍是个需要考虑的问题。基于开放式悬挂芯光纤的表面等离子体共振增强流体传感器十分少见。

基于上述分析,针对场增强检测方式,本文中提出了一种悬挂芯光纤 SPR-表面场增强芯片结构:利用光场激发表面等离子共振效应来获得高灵敏检测流体和传感区域表面场增强效果;同时也提出利用开放悬挂芯光纤集成微流控芯片结构方式来实现芯片集成与快速检测。在上述基础上,本文中对芯片性能进行了分析和结构优化。分析结果表明,该光纤芯片具有较高的场增强效果。研究结果为光纤芯片的实现提供了比较可行的解决思路。

1 芯片结构

图 1 是作者提出的光纤芯片结构示意图。其由微流控芯片、嵌入微流控芯片的开放式悬挂芯光纤及镀在开放式悬挂芯光纤开放气孔区域表面的金属薄膜层构成。开放式悬挂芯光纤由纤芯、悬臂、开放气孔、闭合气孔、包层组成。光纤纤芯区域处于 3 个悬臂交汇区域,由掺锗二氧化硅材料和二氧化硅材料共同组成。此情况下易于控制光纤模场特性,实现基模传输。光纤部分包层可以通过改进拉制工艺或者用离子束聚焦照射或者剖光等方法移去,形成开放式气孔结构。而

且该开放部分气孔底部镀一层厚度在几十纳米量级的金属薄膜层,可以激发金属薄膜层产生表面等离子体共振效应。所述开放式悬挂芯光纤集成流道尺寸与光纤尺寸相当,便于集成。传感区域上侧设置一可以嵌入芯片的微纳光信号接收探头用以高灵敏度接收产生的 Raman/荧光信号。

在分析过程中,假设流道区域填充了折射率为 n 的待测流体。镀金膜层厚度为 t_{Au} 。纤芯半径、掺锗二氧化硅材料悬臂厚度、二氧化硅材料厚度分别设为 R , t_{Ge} 和 t_{SiO_2} 。在仿真中,金薄膜层的介电参量源自 Drude 模型^[12],二氧化硅材料的折射率取自 Sellmeier 方程^[13-15]。掺锗二氧化硅材料和二氧化硅材料的折射率差设为 $\Delta = (n_{Ge} - n_{SiO_2})/n_{SiO_2}$,其中, n_{Ge} 和 n_{SiO_2} 表示掺锗二氧化硅和二氧化硅材料的折射率。光纤模场特性和有效折射率通过有限元法和 COMSO Lmultiphysics 软件得到^[16]。激发光源波长 λ 在 500nm ~ 750nm 之间。

图 2 是 TM 方向的基模模式场分布。可以看出,由于表面等离子体共振效应的存在,使得光场除了在纤芯分布外,在镀膜金属层表面存在一较强的场分布。图 3 中则进一步分析了光场在 y 截面 ($x = 0$) 的场分布,可以看出,该表面场增强在金属层表面强度最强,随后其分布随距离金属层表面的间隔呈指数下降状态。从金属表面到场强缩小至 e^{-1} 时的距离可以定义为穿透深度^[13-14]。在此类系统中,场增强和穿透深度是影响 SPR-表面场增强芯片的主要因素。

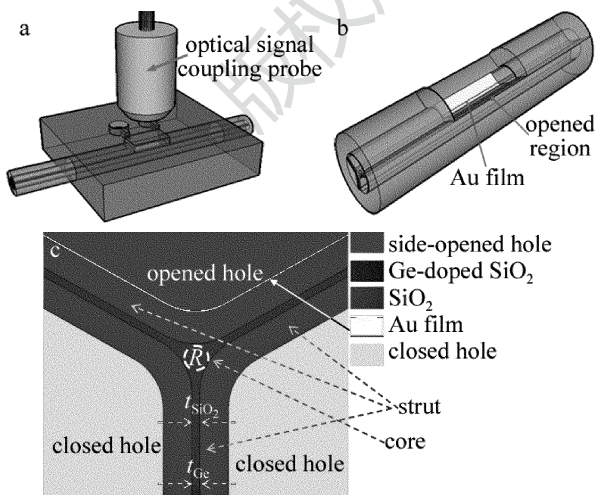


Fig. 1 Sketchup of the proposed suspended core fiber chip

a—3-D fiber chip structure b—3-D opened suspended core fiber configuration c—cross section of the suspended core fiber

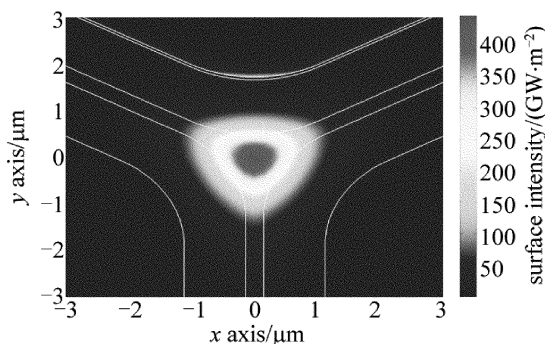


Fig. 2 Fundamental mode distribution of TM polarization

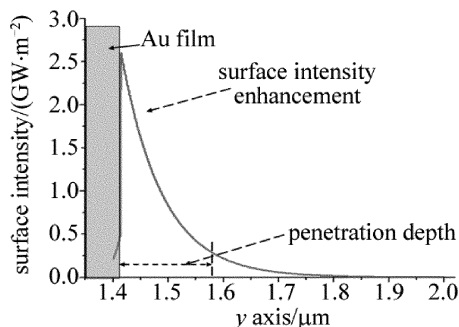


Fig. 3 Surface intensity changing with the penetration depth

2 结果及分析

光纤表面等离子体效应一方面会影响到基模传输的损耗特性,实现高灵敏传感,另一方面也会在传感区域表面产生明显的场增强。此类剧烈的场增强效应将有助于极大地增加 Raman/荧光信号的强度。本文中从场增强与光纤参量入手,对影响此类光纤芯片表面场增强的因素进行分析。

首先分析了场增强程度与光源波长的关系,如图 4 所示。可以看出,存在一最佳的激发波长,使得场增强程度最佳。而且该波长与 SPR 谱中衰减峰一致。可见场增强程度与激发 SPR 共振波长密切相关。偏离中心波长则相应的场增强程度会有急剧降低,当光源波长在 600nm 时(偏离中心波长 50nm),场增强程度约为最佳波长的 24%。

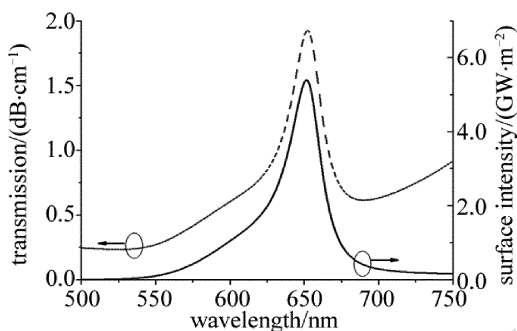


Fig. 4 Relationship among surface intensity, transmitting and wavelength

同时,也分析了改变 Au 薄膜厚度与场增强的关系,从图 5 可以看出,当薄膜层在 40nm ~ 50nm 附近时存在比较强的场增强。过厚金属层相应的场增强程度会有适度的降低。具体原因有可能与过厚的金属层厚度不利于激发表面等离子体效应和场能量穿透金属膜层有关。

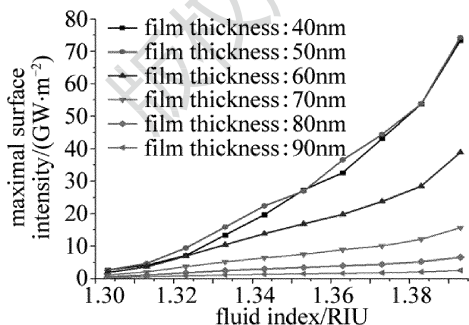


Fig. 5 Relationship between characteristics of SPR-surface intensity enhancement chip and Au film thickness

从图 6 可以看出,缩小纤芯半径将有助于增强表面等离子体效应,提高表面等离子体波在金属表面的峰值强度。当光纤半径从 1200nm 缩小至 800nm 时,相应的场增强程度可以增加 1 倍以上,这将有利于增强所产生的 Raman 信号强度。从图 7a、图 8a 中也可

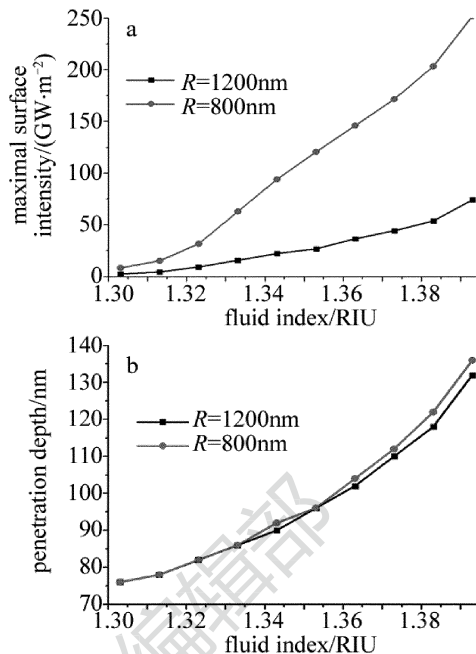


Fig. 6 Relationship of between characteristics of SPR-surface intensity enhancement chip and fiber core radius
a—surface intensity b—penetration depth

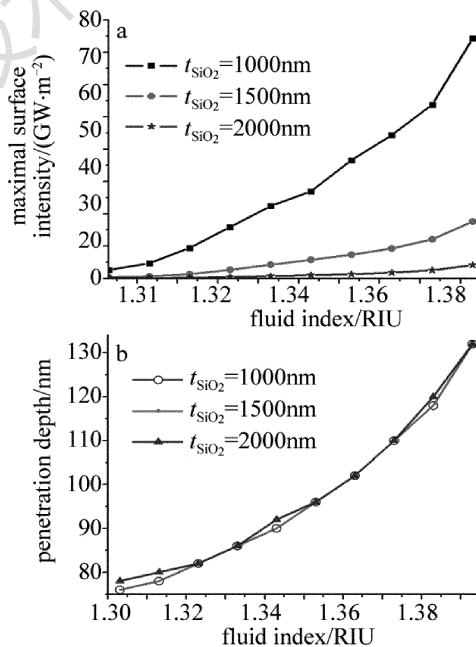


Fig. 7 Relationship between characteristics of SPR-surface intensity enhancement chip and cladding thickness
a—surface intensity b—penetration depth

以看出,缩小小包层厚度、降低纤芯折射率对比度也有利于大幅度增加场增强强度。但如图 7b、图 8b 所示,纤芯半径和包层厚度变化对穿透深度影响几乎没有影响。图 8 则显示,降低纤芯折射率对比度有利于大幅度增加场增强强度。

另外,作者也分析了产生的场增强程度与流体折射率范围的关系。从图 9 可以看出,待测流体样品折射率也密切关系着产生的场增强程度。分析原因可能

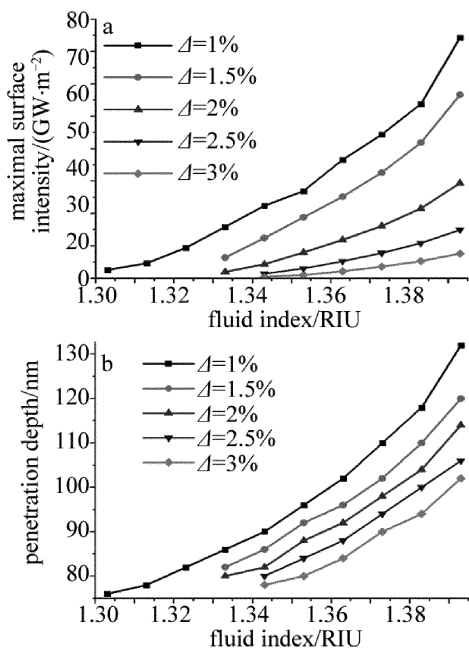


Fig. 8 Relationship between characteristics of SPR-surface intensity enhancement chip and core/cladding index contrast
a—surface intensity b—penetration depth

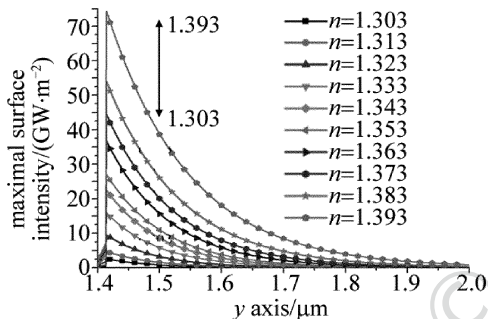


Fig. 9 Relationship between surface intensity enhancement and the filled fluidic index

是流体折射率过低,基模模式能量更多地束缚在纤芯区域,不利于激发表面等离子体波。增加流体折射率有助于增强光纤产生 SPR 的程度和场增强程度。

为了最大程度激发表面等离子体效应和提高表面场增强,需要从缩小纤芯半径、包层金属厚度、包层厚度和选择共振波长入手。虽然代价是光纤芯片在传感区域的损耗程度也急剧增加,但在采用 SPR-表面场增强检测模式下,Raman 信号可以采用微纳透镜结构从光纤侧面收集,而无需考虑光源过传感区域的衰减程度。

3 结 论

提出一种新型的光纤 SPR-表面场增强芯片结构,并采用悬挂芯光纤结合表面等离子体共振增强检测机理来提高表面场增强程度。理论分析认为,在此类芯片结构中,当薄膜层在 40nm ~ 50nm 附近时存在比较

强的场增强;场增强程度与激发 SPR 共振波长密切相关;而缩小包层厚度、降低纤芯折射率对比度也有利于大幅度增加场增强强度,但半径和包层厚度变化对穿透深度几乎没有影响。分析结果表明,该类光纤芯片具有较高的场增强效果,具体的增强程度取决于光纤参量、镀膜厚度、传输波长和流体折射率。研究结果为高灵敏、快速流体检测应用提供了一种解决思路。

参 考 文 献

- [1] WAN M, LUO P F, JIN J Y, *et al.* Fabrication of localized surface plasmon resonance fiber probes using ionic self-assembled gold nanoparticles[J]. *Sensors*, 2010, 10(7):6477-6487.
- [2] FU Y L, FU J, WU Y C, *et al.* Development and application of surface plasmon resonance sensor technique[J]. *Laser Journal*, 2006, 27(6):15-17 (in Chinese).
- [3] SLAVÍK R, HOMOLA J, ČTŘOKY J. Miniaturization of fiber optic surface plasmon resonance sensor[J]. *Sensors and Actuators*, 1998, B51(1/3):311-315.
- [4] YUN H, MAUNG K K O, SVETLANA S, *et al.* Photonic crystal fiber as an optofluidic platform for surface-enhanced raman scattering[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2010, 7839: 783908.
- [5] LIU Y, XU Sh P, TANG B, *et al.* Note: simultaneous measurement of surface plasmon resonance and surface-enhanced Raman scattering[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(3):036105.
- [6] LISCIDINI M, GALLI M, PATRINI M, *et al.* Enhancement of light-matter interaction using surface states in photonic crystal structures[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2010, 7608:76080W.
- [7] LI J F, HUANG Y F, DING Y, *et al.* Shell-isolated nanoparticle-enhanced Raman spectroscopy[J]. *Nature*, 2010, 464(7287):392-395.
- [8] GUAN Ch Y, YUAN L B. Surface plasmon resonance refractive index fiber sensor with hole assisted structure[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2011, 7753:775310.
- [9] HASSANI A, SKOROBOGATIY M. Design of the microstructured optical fiber-based surface plasmon resonance sensors with enhanced microfluidics[J]. *Optics Express*, 2006, 14(24):11614-11621.
- [10] WANG A N, DOCHERTY A, KUHLMEY B T, *et al.* Side-hole fiber sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(24):3890-3892.
- [11] LIN H Y, TSAI W H, TSAO Y Ch, *et al.* Side-polished multimode fiber biosensor based on surface plasmon resonance with halogen light[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(5):800-806.
- [12] JOHNSON P B, CHRISTY R W. Optical constants of the noble metals[J]. *Physical Review*, 1972, B6(12):4370-4379.
- [13] WEBER M J. *Hand book of optical materials*[M]. London, UK: CRC Press LLC, 2003:99-100.
- [14] CHABOT V, MIRON Y, GRANDBOIS M, *et al.* Long range surface plasmon resonance for increased sensitivity in living cell biosensing through greater probing depth[J]. *Sensors and Actuators*, 2012, B174(1):94-101.
- [15] SHAVKAT N, VLADIMIR M M. Self-referencing SPR-biosensors based on penetration difference of evanescent waves[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2011, 28(1):263-269.
- [16] HAUTAKORPI M, MATTINEN M, LUDVIGSEN H. Surface-plasmon-resonance sensor based on three-hole microstructured optical fiber[J]. *Optics Express*, 2008, 16(12):8427-8432.