

文章编号: 1001-3806(2017)04-0554-04

## 基于磁光波导的液体折射率传感特性研究

张艳芬, 唐婷婷\*, 李 杰

(成都信息工程大学 光电技术学院, 成都 610225)

**摘要:** 为了对溶液折射率进行精确测量和传感, 采用转移矩阵法对 Ce:YIG/Ag/liquid 3 层基于磁光表面等离子共振的结构与棱镜组成耦合系统进行了数值计算, 并用有限元法进行了模拟仿真。由低损耗的 Ag 和强磁光性的 Ce:YIG 组成的结构在入射光波长为 980nm 时, 灵敏度达到 4.082/RIU (溶液折射率  $n = 1.330 \sim 1.340$ )。结果表明, 与其它传统的表面等离子共振传感结构相比, 本文中提出的折射率传感器的灵敏度大大提高。该结构在实际应用中可以更加简便地探测溶液的折射率。

**关键词:** 传感器技术; 折射率传感; 表面等离子共振; 磁光效应

**中图分类号:** TP212.4; O436

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.04.019

## Highly sensitive refractive index sensor based on magneto-optical waveguide

ZHANG Yanfen, TANG Tingting, Li Jie

(College of Optoelectronic Technology, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** In order to measure and detect refractive index of solution, by using transfer matrix method, the coupling system of Ce:YIG/Ag/liquid three-layer structure and prism based on magneto-optic surface plasma resonance was studied. Numerical calculation was carried out and finite element method was used to simulate. For the structure composed of low loss Ag and strong magneto-optical Ce:YIG, its sensitivity is to 4.082/RIU, solution refractive index is 1.330 ~ 1.340 when incident light wavelength is 980nm. The results show that compared with other conventional surface plasma resonance sensing structures, the sensitivity of the refractive index sensor presented in this paper is greatly improved. The structure can be used to detect refractive index of the solution more easily.

**Key words:** sensor technique; refractive index sensing; surface plasmon resonance; magneto-optical effect

### 引 言

溶液浓度测量和分析在基础研究、化学分析、医疗诊断以及工业应用都有着及其重要的作用。折射率 (refractive index, RI) 是反映物质内部信息的一个物理量, 它与温度、浓度等密切相关。本文中提出一种基于磁光表面等离子波 (magneto-optical surface plasmon resonance, MOSPR) 的折射率传感器对溶液的折射率进行测量研究, 进而得知溶液的浓度。

表面等离子波 (surface plasmon resonance, SPR) 是约束在金属和介质界面上传播的一种电磁波。SPR 具有不同于光导波的特性、有效折射率的存在范围大、强的场增强效应等。而且表面等离子波对介质折射率变化十分敏感, 对波导中传输的光能起到调制作用, 通

过测量波导中的反射光强和相位的变化, 进而可以得到折射率的变化。这些特点使得它不仅在集成光电子领域, 而且在生化传感器等测量领域获得广泛的关注。基于 SPR 的折射率传感器的测量方式有角度调制型<sup>[1]</sup>、波长调制型<sup>[2]</sup>、光强调制型<sup>[3]</sup>、相位调制型<sup>[4]</sup>等。光波导传感被认为是在微量采样测试领域具有广阔应用前景的技术之一。

灵敏度是传感器的特征参量, 也是传感器的关键指标。随着生物、材料、纳米科学技术的飞速发展, 对传感器灵敏度的要求也越来越高。目前, 传统 SPR 折射率传感器的探测精度只有  $10^{-6}$  RIU (入射光波长  $\lambda = 633\text{nm}$ )<sup>[5]</sup>, 而且所用结构在实际应用中有些复杂。基于这些因素, 提高传感器的灵敏度和改进结构是现在要研究的关键课题。

SPR 对磁光克尔效应 (magneto-optical Kerr effect, MOKE) 有着很好的增强作用, 因此关于磁光 SPR (MOSPR) 折射率传感的研究引起了很大关注<sup>[6-7]</sup>。高质量的 SPR 对横向磁光效应有增强作用, 过阻尼的 SPR 对极向和纵向的磁光效应有增强作用<sup>[8-9]</sup>。如果

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61505016)

作者简介: 张艳芬 (1991-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光波导器件及应用。

\* 通讯联系人。E-mail: skottt@163.com

收稿日期: 2016-08-16; 收到修改稿日期: 2016-11-28

使用磁光信号来代替反射信号作为传感参量,这种增强的磁光效应将会使 SPR 传感器的灵敏度加倍提升<sup>[7,10]</sup>。而且,在 MOSPR 中,当入射光波长在 1000nm 附近时,Ce:YIG 相比其它磁光材料可以获得更大的法拉第旋转<sup>[11-12]</sup>,所以本文中采用 Ce:YIG 作为磁光材料层。

金属在低频条件下可以看作理想的导体,虽然在紫外区域电子等离子体振荡的响应,无法保持为良好的导体,但是仍可以制成低损耗的金属波导,在这种结构中,电磁场在金属中以迅衰场形式存在。而且 Ag 是一种高价金属,通过 TM 偏振模激发横向磁光克尔效应,从而提高传感器的灵敏度<sup>[13]</sup>,Ag 的介电常数大约为  $-62.485 + i4.331$  ( $\lambda = 1000\text{nm}$ ),实部绝对值远大于虚部,所以介电损耗很低。

作者采用经典的棱镜波导耦合系统,不同的是将 Ag 放在最下层与待测溶液接触,形成 prism/Ce:YIG/Ag 结构来进行溶液折射率传感的研究。本文中对该结构的传感能力进行了系统化的数值仿真,研究了该结构中磁场的分布。然后基于衰减全反射 (attenuated total reflection, ATR) 技术,通过反射率变化的研究来研究灵敏度,以及不同波长对该结构灵敏度的影响。

## 1 基本原理

本文中所提出的传感结构如图 1 所示。当外部入射光以共振角通过棱镜耦合进该结构时,在 Ag 和传感介质交界面产生表面等离子共振波。外加磁场  $H$  沿垂直于光的入射面方向,从而产生横向磁光克尔效应。

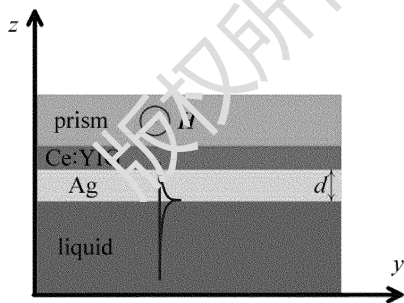


Fig. 1 Cross-section of magneto-optical structure in Cartesian coordinate system

磁光层 (Ce:YIG) 为各向异性的,所以采用转移矩阵法来计算该结构的反射率,转移矩阵法对于计算多层薄膜结构是非常有效的,YEI 和 VIŠŇOVSKÝ 等人已经对转移矩阵法进行了改进,并形成了具体的过程和方法<sup>[14-15]</sup>。当外加相反磁场时,所得反射率分别为  $R(H_+)$  和  $R(H_-)$ ,  $\Delta R = |R(H_+) - R(H_-)|$ 。当传感介质浓度改变时,其折射率也会随之改变, $R$  的波矢也

会相应改变,并且 MOSPR 谱也会随着入射角偏移。所以该结构的灵敏度  $F$  (figure of merit, FOM) 为:

$$F = \frac{\partial \Delta R}{\partial n} = \left[ \frac{\partial |R(H_+) - R(H_-)|}{\partial \theta} \right]_{\theta=\theta_s} \cdot \left( \frac{\partial \theta}{\partial n} \right) \quad (1)$$

式中,  $\theta$  为入射角,  $\theta_s$  为固定的工作角,本文中即为  $\Delta R$  随角度变化最快处所对应的角度,  $R$  为光的反射率,  $H$  是外加磁场,  $n$  是传感介质的折射率,灵敏度分前后两项的乘积计算。

入射光波长是影响该传感结构灵敏度的关键因素,不同波长的光能引起磁光材料不同大小的磁光效应,也会引起介质折射率变化,光强也会受到影响。层厚度是另一个关键影响因素,当材料厚度不同时,对光的损耗和吸收也不同,会影响反射率和场分布。基于上述原因,作者研究最佳的波长和厚度使得该结构的灵敏度达到最大值。

本文中采用有限元法 (finite element method, FEM) 对提出的结构进行了物理场仿真,然后采用转移矩阵法来计算该结构的反射率,进而得出灵敏度。通过系统地数值仿真得到本次设计的最佳波长和厚度 (最高的灵敏度时的波长和厚度)。最后对该结构的最高灵敏度的适用测量范围进行了仿真分析。

## 2 结果分析

利用有限元法 (FEM) 对该结构进行了物理场仿真,其中 Ce:YIG 层的厚度设为 200nm, Ag 层的厚度设为 20nm,溶液为水 ( $n = 1.333$ ),通过不同的边界条件的设定,所得的场强度分布如图 2 所示。光从棱镜入射,通过 Ce:YIG 和 Ag 层进入待测液体,且从图中可以看出,磁场基本集中在 Ag 和传感介质交界面的下表面,即是在溶液中,所以传感效果更好。

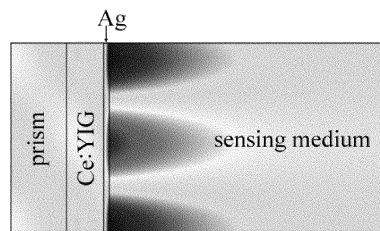


Fig. 2 Magnetic field distribution of MOSPR sensing system

通过磁场分布仿真分析,表明该结构更适合于实际应用。用转移矩阵法来计算该结构的反射率,由于磁场的作用,使得各层的折射率发生改变,根据横向磁光克尔效应,  $R$  曲线发生偏移。利用磁光材料 Ce:YIG 作为耦合层,为了获得更大的法拉第旋转,选用外部入射光波长  $\lambda = 980\text{nm}$ 。图 3 是在横向加相反方向磁场

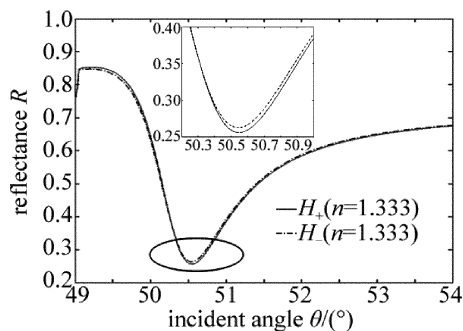


Fig. 3 Relationship between reflectance  $R$  and incident angle

时,所得的反射谱之间的变化。由图 3 可知,随着角度的增大,反射率先减小到最低点再增大,在反射谱上出现一个极小值点,该极值点即为共振角。当传感介质的折射率  $n = 1.340$  时,此时的共振角  $\theta_{\text{res}}$  大约为  $50.5^\circ$ ,在反射率最小点附近,共振角处所对应的  $\Delta R = |R(H_+) - R(H_-)|$  最大。根据(1)式,要找到灵敏度最大的点,只要使得前后两项的乘积最大,所以要找的是使两项偏导最大的点。

由图 3 得到了外加正反方向磁场的反射率谱,在这个基础上,由  $\Delta R = |R(H_+) - R(H_-)|$  再进行角度扫描可以得到  $\Delta R$  的曲线,如图 4 所示。图 4 中使得(1)式  $\partial |R(H_+) - R(H_-)| / \partial \theta$  项最大的点是  $\Delta R$  曲线斜率最大的点,该点在共振角  $\theta_{\text{res}}$  附近,称之为工作角  $\theta_s$ ,即是(1)式中的  $\theta_s$ 。

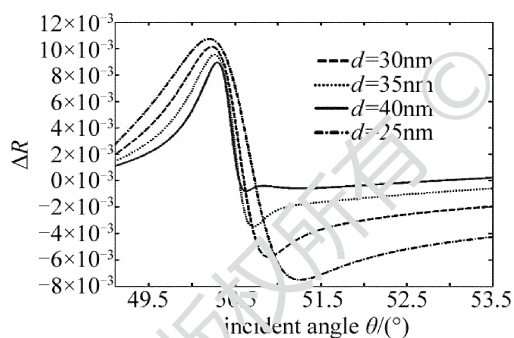


Fig. 4 Relationship between  $\Delta R$  and incident angle

层厚度是影响灵敏度的重要因素,图 4 为改变银薄膜厚度所得  $\Delta R$  的曲线,银层薄膜厚度分别  $d$  为 25nm,30nm,35nm,40nm。可以看出,随着银层厚度的变化  $\Delta R$  曲线发生偏移,工作角  $\theta_s$  为两峰值中间的一段的一点,该点的斜率在 35nm ~ 40nm 处取得最大,所以使得灵敏度最大的 Ag 层厚度在 35nm ~ 40nm 范围内改变溶液的折射率 1.333 ~ 1.340,得到折射率和角度时间的关系。即为(1)式右边的一项,得知前后两项之后,即可求得该折射率传感器的灵敏度。在波长等条件一定的情况下,求得灵敏度基于 Ag 层和 Ce:YIG 层厚度的分布如图 5 所示。横轴和纵轴坐标分别为 Ce:YIG 和 Ag 层的厚度,该结构所得最大灵敏

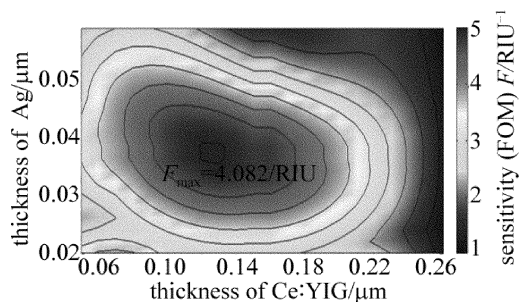


Fig. 5 Relationship between thickness Ag and thickness of Ce:YIG at 980nm

度  $F_{\text{max}} = 4.082/\text{RIU}$  ( $x = 0.13\mu\text{m}$ ,  $y = 0.035\mu\text{m}$ ),随着层厚度的增大,灵敏度  $F$  呈先增大到峰值再减小的趋势。横轴为磁光层的厚度,当磁光层厚度增大时,横向磁光克尔效应将会随之增大,这有利于提升灵敏度,但是,同时磁光层的吸收和损耗都会增加,所以如图 5 所示,Ce:YIG 的厚度范围为  $0.1\mu\text{m} \sim 0.18\mu\text{m}$  范围内灵敏度较高。Ag 为高价金属,随着厚度的增加,SPR 模场耦合进入溶液变强,但是随着厚度增大,吸收增强,同时场分在 Ag 层中也会变大,从而影响溶液中的场分布。和前面所述影响因素呼应,所以灵敏度在 ( $x \in [0.1, 0.18]\mu\text{m}$ ,  $y \in [0.03, 0.04]\mu\text{m}$ ) 的厚度范围内比较高。

### 3 结 论

作者结合了表面等离子共振波和横向磁光克尔效应的优点,所提出的棱镜和 Ce:YIG/Ag/liquid 3 层组成的传感器结构灵敏度高达  $F_{\text{max}} = 4.082/\text{RIU}$ ,比传统光学传感器的灵敏度大大提高。可测溶液的折射率范围为  $n = 1.330 \sim 1.340$ ,并且该传感结构将金属银层与溶液接触,很好地利用了金属亲水性良好的特点,且误差很小,这些特点都使得所提出的结构在实际应用中有很大的优势。

### 参 考 文 献

- [1] CHENG Y Y, SU W K, LIOU J H, *et al.* Application of a liquid sensor based on surface plasmon wave excitation to distinguish methyl alcohol from ethyl alcohol [J]. Optical Engineering, 2000, 39 (1): 311-314.
- [2] LIN W B, NINCOLE J R, CHOVLON J M, *et al.* Optical fiber as a whole surface probe for chemical and biological application [J]. Sensors and Actuators, 2001, B74(1/3):207-211.
- [3] SLAVIK R, HOMOLA J, CTYROK J, *et al.* Novel spectral fiber sensor based on surface plasmon resonance [J]. Sensors and Actuators, 2001, B74(1/3):106-111.
- [4] NOTCOVICH A G, ZHUK V, LIPSON S G. Surface plasmon resonance imaging [J]. Applied Physics Letters, 2000, 39 (1):1665-1667.
- [5] PILIARIK M, HOMOLA J. Surface plasmon resonance (SPR) sensors: approaching their limits[J]. Optics Express, 2009, 17(19): 16505-16517.

- [6] ARMELLES G, CEBOLLADA A, GARCÍA-MARTÍN A, *et al.* Magnetoplasmonics: combining magnetic and plasmonic functionalities [J]. *Advanced Optical Materials*, 2013, 1(1):10-35.
- [7] SEPULVEDA B, CALLE A, LECHUGA L, *et al.* Highly sensitive detection of biomolecules with the magneto-optic surface-plasmon-resonance sensor[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(8):1085-1087.
- [8] BONOD N, REINISCH R, POPOV E, *et al.* Optimization of surface-plasmon-enhanced magneto-optical effects[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2004, B21(4):791-797.
- [9] LAHAV A, AUSLENDER M, ABDULHALIM I. Sensitivity enhancement of guided-wave surface-plasmon resonance sensors[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(21):2539-2541.
- [10] QIN J, DENG L J, XIE J L, *et al.* Highly sensitive sensors based on magneto-optical surface plasmon resonance in Ag/Ce:YIG heterostructures[J]. *AIP Advances*, 2015, 5(1):017118.
- [11] YANG Q, XIE K, JIANG X D, *et al.* Review of the research for YIG film materials based on the magneto-optical waveguide [J]. *Magnetic, Material, Devices*, 2006, 37(6):13-16 (in Chinese).
- [12] BI L, HU J, JIANG P, *et al.* On-chip optical isolation in monolithically integrated non-reciprocal optical resonators[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(12):758-762.
- [13] REGATOS D, SEPULVEDA B, FARIÑA D, *et al.* Suitable combination of noble/ferromagnetic metal multilayers for enhanced magneto-plasmonic biosensing[J]. *Optics Express*, 2011, 19(9): 8336-8346.
- [14] YEH P. Optics of anisotropic layered media: a new 44 matrix algebra [J]. *Surface Science*, 1980, 96(1/3):41-53.
- [15] VIŠŇOVSKÝ Š. Magneto-optical ellipsometry [J]. *Czechoslovak Journal of Physics*, 1986, B36(5):625-650.