

文章编号: 0258-7025(2004)07-0838-05

# 光纤表面等离子体波共振温度传感器的研究

曾 捷<sup>1</sup>, 梁大开<sup>1</sup>, 曹振新<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室, 江苏 南京 210016)  
<sup>2</sup> 东南大学无线电工程系, 江苏 南京 210016)

**摘要** 根据液体折射率随温度变化而改变的特性, 提出了一种基于表面等离子体波共振 (SPR) 效应的新型光纤温度传感器, 分析了表面等离子体波共振光纤探头感应环境温度变化的原理。对表面等离子体波共振探头结构进行了优化设计, 并进行了相关实验, 为实现高折射率液体介质的感温测试和扩大测温范围提供依据。通过自行设计的一套光纤温度传感测试系统, 得到系统输出的表面等离子体波共振光谱信号随温度变化的特性曲线, 并提出对共振波长和最小光强反射率进行实时双参数测量的方法。实验结果表明, 该测试系统具有结构简单、全光纤化、易远程测量等优点。

**关键词** 传感器技术; 表面等离子体波共振; 光纤传感器; 温度测量; 折射率; 共振波长

**中图分类号** TN 253; TP 212.14 **文献标识码** A

## Study on a Novel Optical Fiber Temperature Sensor Based on Surface Plasmon Resonance

ZENG Jie<sup>1</sup>, LIANG Da-kai<sup>1</sup>, CAO Zhen-xin<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> The Aeronautical Science Key Laboratory for Smart Material and Structures,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)  
<sup>2</sup> Radio Department, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract** Liquid refractive index changes when temperature changes. According to this theory, a novel optical fiber optical temperature sensor based on surface plasmon resonance (SPR) is presented in this paper. And the theory of the SPR probe testing the change of environmental temperature is analyzed. The structure of SPR probe is optimized in order to measure the temperature of liquid with high refractive index and enlarge the measurement range. The characteristic curve of SPR spectrum changing with temperature is obtained by using a optical fiber SPR temperature testing system. A real-time double-parameter measure method, based on resonance wavelength  $\lambda_{\text{spr}}$  and the lowest light intensity reflectivity  $R_{\text{min}}$ , is also presented. The experimental results show that this sensing system features simple structure, all light transmitted by fiber, and easiness to realize long distance measurement.

**Key words** sensor technique; surface plasmon resonance; optical fiber sensor; temperature measurement; refractive index; resonant wavelength

## 1 引 言

表面等离子体波共振 (SPR) 现象是一种发生在金属与电介质界面的物理化学现象<sup>[1]</sup>, 它对附着在金属表面电介质的折射率变化非常敏感。表面等离

子体波共振效应的特性参数如: 共振波长、最小光强反射率会因生物或化学分子在金属膜上的吸附而产生变化, 因而可以高灵敏度、快速地进行多参数测量。目前国内外基于表面等离子体波共振效应的传感器已经在医疗环保、生物传感以及结构健康监测

收稿日期: 2003-04-10; 收到修改稿日期: 2003-07-21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50135030) 和航空基础科学基金 (00G52065) 资助课题。

作者简介: 曾 捷 (1976—), 男, 江西南昌人, 南京航空航天大学硕士研究生, 主要从事计算机测控及光纤传感技术方面的研究。E-mail: zengjiez@yahoo.com.cn

等许多领域得到广泛的研究和应用。

本文提出了一种将光纤技术和表面等离子体波共振效应巧妙结合在一起的温度传感系统。通过表面等离子体波共振传感探头来感应液体介质折射率随环境温度变化的情况,进而获得外部温场信息。由于这种光纤探头的传感结构非常简单、传感段尺寸小,因而在许多特殊场合可以发挥重要作用。为扩展该传感器的应用范围,通过增覆 SiO 膜的方法对表面等离子体波共振探头结构进行了改进,实验证明可以有效扩大测温范围。此外,这种基于光谱分析技术的共振波长调制型温度传感器能够有效克服光源功率漂移、光纤微弯损耗等引入的误差源。

## 2 测温原理

### 2.1 光纤表面等离子体波共振原理

光纤表面等离子体波温度传感器的探头结构如图 1 所示。当一束经过 P 型偏振片处理的宽带光耦合进入光纤后,将会发生色散形成若干以不同全反射角  $\theta_i$  传播的单色 P 偏振光。由于金属本身的复介电性,导致该入射光在到达纤芯 / 银层界面后将部分渗透到金属内部形成倏逝波。当它的水平波矢与金属膜内表面电子波(称为等离子体激元)的波矢  $k_{sp}$  相匹配时,电子吸收了这一频率光子的能量,导致入射光到表面等离子体波的能量共振转移,反射光强出现降低<sup>[2,3]</sup>,形成表面等离子体波共振效应。

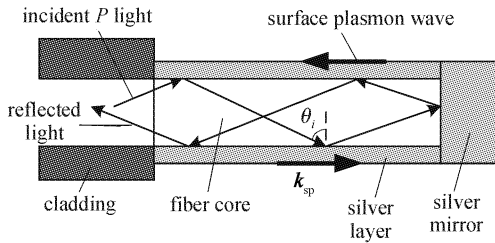


图 1 表面等离子体波共振光纤探头结构

Fig. 1 Structure of SPR optical fiber probe

光纤本身作为激发表面等离子体波共振效应的基体,既起到传感作用,又承担了传光的功能。根据 Maxwell 方程和金属的复介电性,可以得到表面等离子体波的波矢<sup>[4]</sup>为

$$k_{sp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m n_1^2}{\epsilon_m + n_1^2}} \quad (1)$$

入射光波矢  $\mathbf{K}$  在  $x$  方向上的分量为

$$k_x = \frac{\omega}{c} n_0 \sin \theta_{spr} \quad (2)$$

当发生等离子体波共振时有

$$k_x = k_{sp} \quad (3)$$

由式(1),(2),(3)可以得到

$$\sin \theta_{spr} = \sqrt{\frac{\epsilon_m n_1^2}{\epsilon_m + n_1^2}} / n_0 \quad (4)$$

其中  $\theta_{spr}$  表示产生表面等离子体波共振效应时的共振角度, $n_0, n_1$  分别表示纤芯和液体介质的折射率, $\epsilon_m$  表示金属的复介电常数, $c$  和  $\omega$  分别表示光在真空中的速度和角频率。由(4)式可知,共振角度  $\theta_{spr}$  对  $n_0, n_1$  和  $\epsilon_m$  的变化非常敏感。当  $n_0, \epsilon_m$  一定时, $\theta_{spr}$  与  $n_1$  存在对应关系。因为只有那些全反射角  $\theta_i$  刚好等于共振角  $\theta_{spr}$ , 并且其水平波矢刚好等于表面等离子体波矢  $k_{sp}$  的单色光波才能激发表面等离子体波共振,所以当表面等离子体波共振光纤探头的结构一定时,共振波长  $\lambda_{spr}$  不仅对液体介质的折射率变化非常敏感,而且与液体介质的折射率存在对应关系。

这种表面等离子体波共振效应的激发结构,不再象棱镜型表面等离子体波共振传感器那样,光线仅仅入射到金属/介质界面的一个点上,而是巧妙地在纤芯柱面形成激发表面等离子体波共振效应的三维构造。根据多层薄膜反射理论和边界条件,可以得到该模型的反射系数与各参数的关系<sup>[5]</sup>

$$R = [\theta_i, t, l, n_m(\lambda, t), n_1(\lambda), n_0(\lambda)]^{N(\theta_i, l, d)} \quad (5)$$

式中, $N$  为光纤内银层表面反射次数, $\theta_i$  为入射角, $l$  为传感段长度, $d$  为纤芯直径, $t$  为银层厚度, $n_0(\lambda)$  为纤芯折射率, $n_1(\lambda)$  为环境介质(液体)折射率, $n_m(\lambda, t)$  为金属折射率。

### 2.2 液体折射率随温度变化特性

由于液体介质大都属于具有负温度系数的温敏材料,即其折射率随温度的升高而线性下降。温度每升高  $1^\circ\text{C}$ , 液体介质折射率大约要下降 0.0004, 这种变化因介质类型的不同略有差异<sup>[6]</sup>, 这样就可将共振波长改变与温敏材料的温度变化联系起来实现测温的目的。

### 2.3 测温系统

光纤温度传感测试系统如图 2 所示。入射光由波长从 400~1000 nm 的宽带光源产生,在经过了 P 偏振片处理后,通过 Y 型光纤耦合器一端进入传感光纤。由于实验中所关注的是光谱信号,使用 Y 型光纤耦合器即可,还可减少光的传输损耗<sup>[7]</sup>。入射光线在到达传感探头后,会与液体介质相互作用产生表面等离子体波共振效应。在经过纤芯端面的全

反射镜作用后形成反射光线,通过 Y 型光纤耦合器另一端进入波长分辨率为 0.25 nm 的 EPP2000 型光谱仪,经过计算机处理输出反射光强和光波长之间的关系曲线。光纤探头置于可控温加热炉中,为保证能够实时、准确地了解表面等离子体波共振感温探头附近的温场信息,在其附近配置一支精度达到 0.1℃ 的 Pt 电阻温度计作为温度参考标准。

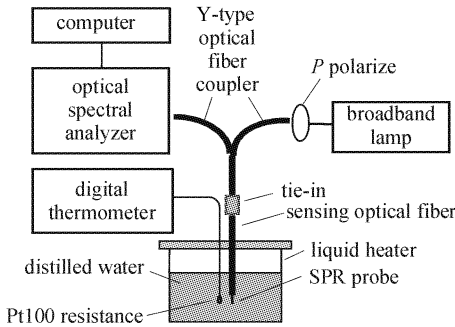


图 2 测温系统框图

Fig. 2 Sketch of temperature measurement system

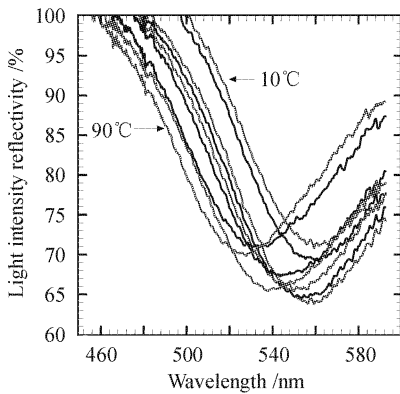


图 3 各温度下对应的表面等离子体波共振光谱

Fig. 3 SPR spectra versus corresponding temperature

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 测温实验

为充分了解这种表面等离子体波共振光纤探头结构的感温特性,选取蒸馏水作为液体介质,在相同的环境下,分别使用同一批次加工镀膜的 6 根光纤探头进行感温实验。此外,针对同一根传感光纤,还重复测量了其在升/降温两个过程的输出值。图 3 给出了在不同温度下传感器输出的表面等离子体波共振光谱图。从图中可以看出,水温在从 10℃ 变化到 90℃ 的过程中,表面等离子体波共振光谱的波谷即共振波长依次左移。不同温度与其对应的共振波长的关系曲线如图 4 所示。从中可以发现,随着水温的升高,对应的共振波长依次从 562.75 nm 下降

到 527.00 nm,呈近似线性关系,其线性拟合度为 0.9971,共振波长的温度灵敏度为 0.5015 nm/℃。图 5 给出了各温度下水的折射率与其对应共振波长的关系曲线。由于水温的升高,导致其对应的折射率不断下降,进而引起共振波长的变化,这一点和前面的分析相一致。

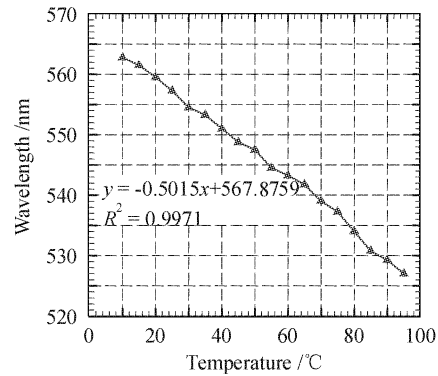


图 4 温度与 λ<sub>spr</sub> 的关系

Fig. 4 Temperature versus λ<sub>spr</sub>

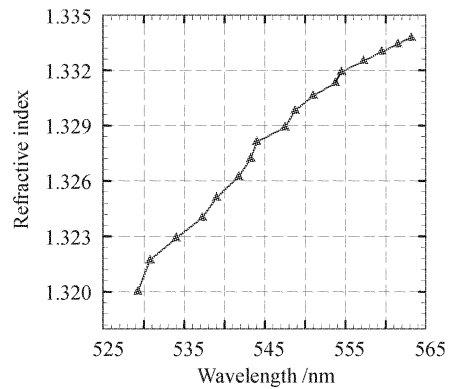


图 5 各温度下 λ<sub>spr</sub> 与折射率的关系

Fig. 5 λ<sub>spr</sub> versus refractive index under different temperature

通过分析比对,可发现在相同的环境温度下,每根光纤探头所对应的共振波长点存在较好的重复性与稳定性。对于出现的实验偏差,主要是由于在使用不同光纤探头测温时,光纤探头与标准铂电阻在液体介质中摆放的相对位置存在偏差所造成。表面等离子体波共振探头对外界环境的折射率变化异常敏感,其分辨率<sup>[8]</sup>达到  $3.5 \times 10^{-5}$ 。因此从理论上说,环境温度的任何细微变化都将导致共振波长的位移,由于这类传感器主要进行的是光谱检测,选择高分辨率的光谱分析仪将进一步提高该类传感器的测量精度和灵敏度。

考察表面等离子体波共振光谱特征主要有:共

振波长、光强最小反射率以及半波宽度三个参量。而影响它们的因素涉及到纤芯折射率、环境介质折射率以及金属膜层表面等离子体波振动情况等。实际上光纤纤芯在可见光部分的折射率温度系数要比水低两个数量级,因此在理论分析中可以忽略。金属膜层表面等离子体波的固有振动频率为

$$\omega_p = \sqrt{4\pi n e^2 / m_e} \quad (6)$$

式中  $m_e$  和  $e$  分别表示电子质量和电荷量,  $n$  为电子密度。由于表面等离子体波振动实际上是一种金属表面电子的集体振荡,随着环境温度  $T$  升高,导致电子能量增大,振动加快,单位体积电子密度  $n$  增大,由公式(6)可知这将引起  $\omega_p$  的增大,从而引起等离子体激元的波长  $\lambda_p$  减少。根据激发表面等离子体波共振效应的条件可知,与  $\lambda_p$  相匹配的  $\lambda_{\text{spr}}$  也必将随环境温度的升高而减少。这就从另一个角度解释了实验中得到的共振波长  $\lambda_{\text{spr}}$  随水温升高而下降的现象。

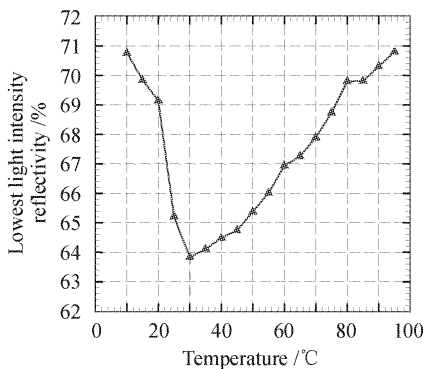


图 6 温度与  $R_{\text{min}}$  的关系

Fig. 6 Temperature versus  $R_{\text{min}}$

另一个值得关注的问题是表面等离子体波共振光谱的最小光强反射率  $R_{\text{min}}$  随温度变化的情况,如图 6 所示。从图中可以看到水温从 10°C 升高到 30°C,  $R_{\text{min}}$  从 70.77% 急剧下降至 63.83%,表面等离子体波共振光谱的波谷变深,即表面等离子体波共振效应更加明显。随着水温的继续上升,  $R_{\text{min}}$  出现了相对缓慢的回升,从 63.83% 回升到 70.89%,表面等离子体波共振效应的强度逐渐减弱。对于不同波长的每一根光线在光纤纤芯中都存在多点反射传播过程。当某一波长的光线满足激发表面等离子体共振的条件时,会在多点激发表面等离子体波共振效应,这一现象使精确的理论计算变得非常复杂。从式(5)可知光强反射率实际上是一个与多个参量相关的复变函数。当其他参量一定时,随着温度的升

高,纤芯、液体介质、金属薄膜三者的折射率必定产生不同程度变化,尤其对液体介质的折射率变化影响最为明显,从而引起  $R_{\text{min}}$  的差异。在实际应用中,可以根据不同的测温要求,对该类传感器进行定标即可。

银膜易氧化问题在相当程度上制约该传感器的应用,可从两个方面去解决这一问题:一是在已沉积的 Ag 膜上再涂覆一层具有长链结构烷硫赶自组膜或者 MgF 膜,以防止银的氧化和脱落现象发生。二是直接使用 Au 膜作为金属层,这主要考虑 Au 膜的稳定性好,具有较强的化学惰性,可适用于 Ag 膜不便使用的测量环境。

通过对不同温度下对应的表面等离子体波共振光谱图像分析,可以同时实现  $\lambda_{\text{spr}}$  和  $R_{\text{min}}$  的双参数测量。

### 3.2 表面等离子体波共振感温探头的优化

不同类型的液体介质往往具有不同的沸点,因此完全可以根据不同的测温范围,选取不同的液体介质来扩展量程。由表面等离子体波共振效应的激发条件可知,光密介质(纤芯)的折射率  $n_0 = 1.468$  必须大于液体介质的折射率  $n_1$ ,否则表面等离子体波的色散曲线将无法和光波的色散曲线相交,也即  $k_{\text{sp}}$  不可能与  $k_x$  相匹配,因而无法激发表面等离子体波共振效应。对于某些高沸点的液体,如果其折射率大于纤芯折射率,可以先在裸露的光纤探头周围镀上一层  $n = 1.85$  的 SiO 膜,膜厚为 20  $\mu\text{m}$ ,然后再镀上 Ag 膜,如图 7 所示。这样就大大提高与金属膜接触的光密介质的折射率,满足了激发条件。

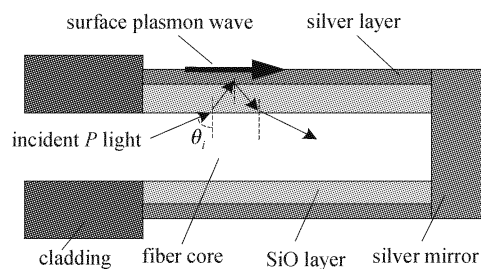


图 7 镀有 SiO 层的表面等离子体波共振光纤探头结构

Fig. 7 Structure of SPR probe coated with SiO layer

分别选取四种具有较高折射率的分析纯三乙醇胺、苯、硝基苯、苯胺作为液体介质,它们的折射率分别为:1.4870,1.5005,1.5520,1.5859。为便于比较输出效果,在进行测试时,同时使用了普通和镀 SiO 层两类表面等离子体波共振光纤探头。测试结果如图 8 所示,普通表面等离子体波共振探头输出的光

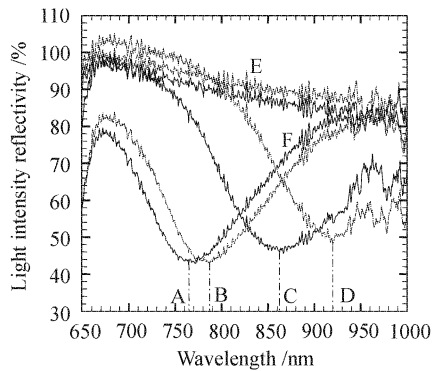


图 8 探头改进后输出的表面等离子体波共振光谱  
Fig. 8 SPR spectra of improved probe

谱几乎是一条水平线,不出现共振凹谷(如曲线 E, F 所示),而镀 SiO 层的探头所输出的四条光谱曲线均有明显的共振凹谷(图中曲线 A, B, C, D 分别表示三乙醇胺、苯、硝基苯、苯胺),同时它们的共振波长随着液体折射率提高而增大。

#### 4 结 论

从理论和实验两方面讨论了一种基于表面等离子体波共振效应的新型光纤温度传感系统。实验结果表明该系统在 10℃ 到 95℃ 测量范围内,温度分辨率可达到 0.5℃。如果选取高沸点的液体介质,将进一步扩展表面等离子体波共振探头的感温范围。通过对分布式光纤传感结构的讨论,证明了该方案的可行性。整个感温系统实现了全光纤化且感温探头尺寸小、实时性好,在诸如生物医学测温、工业控温及远程遥测等领域具有相当好的应用前景。

#### 参 考 文 献

- Zhao Xiaojun, Chen Huanwen, Song Daqian *et al.*. Surface plasmon resonance sensor I: Principles [J]. *Analysis Apparatus*, 2000, (4):1~2  
赵晓君,陈焕文,宋大千等. 表面等离子体共振传感器 I: 基本原理[J]. *分析仪器*, 2000, (4):1~2
- Tang Yongxin, Yang Hua, Guo Jihua *et al.*. Study on the principle of Q modulation of surface plasmon laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(7):866~869  
唐永新,杨华,郭继华等. 表面等离子体激光 Q 开关原理研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(7):866~869
- Qiu Hao, Liang Da-kai, Zhang Huan-chun *et al.*. Research on the surface plasmon resonance fiber optical sensor for cure monitoring [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6):545~549  
邱浩,梁大开,张焕春等. 光纤表面等离子体波传感器用于固化监测的研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(6):545~549
- Cui Dafu, Li Xiangming, Cai Haoyuan *et al.*. Development of surface plasmon resonance (SPR) biochemical analysis instrument [J]. *Modern Scientific Instruments*, 2001, (6):34~38  
崔大付,李向明,蔡浩原等. 表面等离子体谐振 (SPR) 生化分析仪的研制[J]. *现代科学仪器*, 2001, (6):34~38
- Matthias Niggermann, Andreas Katekamp, Maria Pellmann *et al.*. Intrinsic fibre optical gas sensor based on surface plasmon resonance spectroscopy [C]. *SPIE*, 1995, **2508**:303~311
- Zhang Xiangyu. Application Chemistry Manual [M]. Beijing: Publishing House of National Defence Industry, 1986. 619~620  
张向宇等编. 实用化学手册[M]. 北京:国防工业出版社, 1986. 619~620
- Cao Zhenxin, Liang Dakai, Guo Mingjiang. Experimental study on the relationship between film thickness and resonant wavelength based on the optical fiber SPW sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1):125~128  
曹振新,梁大开,郭明江. 光纤表面等离子体波传感器中膜厚与共振波长关系的实验研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1):125~128
- Gu Zhentian, Liang Peihui, Zhang Weiqing *et al.*. Optical chemo-sensor and progress [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 1998, (8):1~7  
顾铮天,梁培辉,张伟清等. 光化学传感器及其进展[J]. *激光与光电子学进展*, 1998, (8):1~7