

一种基于相位测量的角漂移自适应结构表面 等离子体共振气体折射率测量系统

陈强华 罗会甫 王素梅 王 锋 陈新华

(北京理工大学机械与车辆学院先进加工技术国防重点学科实验室, 北京 100081)

摘要 提出了一种可抑制角漂移的表面等离子体传感器结构,并结合相位测量设计了相应的气体折射率测量系统。分析表明激光入射角、金膜厚度以及反射光 p、s 分量的相位差与气体折射率之间的固有非线性是影响相位响应度与折射率测量精度的主要因素。计算表明所提出的自适应结构将角漂移引起的误差降低了一个数量级并很大程度提高了测量灵敏度。同时分析设计了金膜厚度参数,并评估了反射光 p、s 分量的相位差与气体折射率之间固有非线性带来的误差。应用于空气折射率的测量比对实验显示其测量精度达到了 10^{-6} 量级。

关键词 测量;气体折射率;表面等离子体共振;角漂移自适应结构;相位测量

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1212003

Gas Refractive Index Measurement System Based on a Surface Plasmon Resonance Sensor with Self-Adaptive Structure for Angle Shift and Phase Detection

Chen Qianghua Luo Huifu Wang Sumei Wang Feng Chen Xinhua

(Key Laboratory of Advanced Machining Fundamental Science for National Defense,
School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract A surface plasmon resonance (SPR) sensor with self-adaptive structure for angle shift is presented. Combined with phase detection, a measurement system for the gas refractive index is designed. The theoretical analyses indicate that the factors which affect the response of phase detection and measurement precision are the incident angle of the laser beam, the thickness of the gold film and the nonlinearity between the phase difference of p and s polarization components of the reflected light and the refractive index of gas. The application of the self-adaptive SPR sensor reduces the measurement error by one-order of magnitude and greatly improves the sensitivity. The thickness of the gold film is designed and the error which results from the nonlinearity between the phase difference of p and s polarization components of the reflected light is evaluated as well. The comparison experiments of measuring the refractive index of air show that the accuracy of the gas refractive index measurement system reaches 10^{-6} order.

Key words measurement; gas refractive index; surface plasmon resonance; self-adaptive structure for angle shift; phase detection

OCIS codes 120.0280; 120.4570; 120.5050

1 引 言

表面等离子体共振 (SPR) 是金属表面自由电子的密度波动现象^[1], 通常是被边界上的外来电场所激发的表面电荷的量子振动。SPR 在特定条件下

可以被可见光的倏逝波场所激发, 因此在表面以及界面的光学性质研究^[2~6]中有重要意义, 以 SPR 效应为原理的折射率传感器已在光学、生物、化学和物理等多个领域得到了广泛应用^[7~13]。

收稿日期: 2012-06-21; **收到修改稿日期**: 2012-07-31

基金项目: 国家自然科学基金(51005022, 51105038, 90923039)资助课题。

作者简介: 陈强华(1978—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光学精密测量方面的研究。

E-mail: chenqianghua@tsinghua.org.cn

为满足光波与金属表面等离子体波之间的耦合条件,必须设计合适的激发结构,常见的主要有棱镜型^[14,15]、光栅型^[16,17]和波导型^[18,19],其中棱镜型结构简单,检测方便,同时分辨率也很高,因此发展比较成熟,应用广泛。SPR 折射率传感器的信号检测方法主要有强度调制^[20]、相位调制^[21]、波长调制^[22]和角度调制^[23]四种。角度调制或波长调制一般需要进行转角扫描或波长扫描,系统结构一般相对比较复杂,而且可动部件的存在降低了系统稳定性;强度调制由于受光源功率稳定性和环境扰动的影响,测量稳定性和精度受到一定限制;相位调制方法尽管有很高的精度,但一般高精度检测波面相位,受角度漂移影响也较大,光路系统及算法复杂。为进一步提高 SPR 折射率传感器的性能和应用,国内外许多学者做了大量的研究工作,在光路结构设计、多方法结合和算法优化等方面取得了诸多进展^[24~28]。

本文研究了一种基于相位测量的角漂移自适应结构表面等离子体共振气体折射率传感器系统,采用双频激光源进行外差相位测量,使系统具有良好的共光路结构,传感器件结构对光束角漂移产生的误差能够自补偿,系统具有较高的测量精度和稳定性。

2 测量原理

光路系统如图 1 所示,将 SPR 气体折射率传感器放置在气室中,气室配有通气口及阀门,底部安装一片光窗以便激光束通过。光源为横向塞曼双频氦氖激光器,输出一对波长为 633 nm 并相互正交的线偏振光。光束通过一个半透半反镜后被分成两束

光,其中反射光作为参考光被光电探测器 1 接收形成参考信号并被送入相位计,透射光被全反射镜 1 反射后,通过气室的光窗正入射到镀有金膜的 SPR 传感器上,该传感器对角漂移可进行自修正。光束在 SPR 传感器中经一系列反射后以平行入射光的方向出射,被全反射镜 2 反射后由光电探测器 2 接收形成测量信号并被送入相位计。当气室内由真空状态变化到与待测气体环境状态一致时,SPR 传感器出射光的 p 和 s 偏振分量的相位产生相应变化,其与参考光的 p 和 s 偏振分量的相位差之差被相位计记录,由此可计算出待测气体的折射率。由于 p 和 s 光处于共光路状态,有效抑制了相位噪声,因此系统的抗扰动能力强,系统结构比较简单。

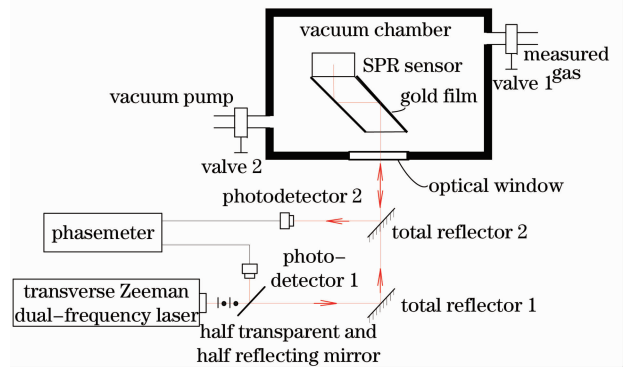


图 1 SPR 传感器气体折射率测量光路系统示意图

Fig. 1 Schematic of the gas refractive index measurement system configuration of SPR sensor

对于图 2(a)所示的 3 层 Kretschmann 棱镜型 SPR 结构^[14],由麦克斯韦方程可得到 p、s 偏振光的反射系数分别为

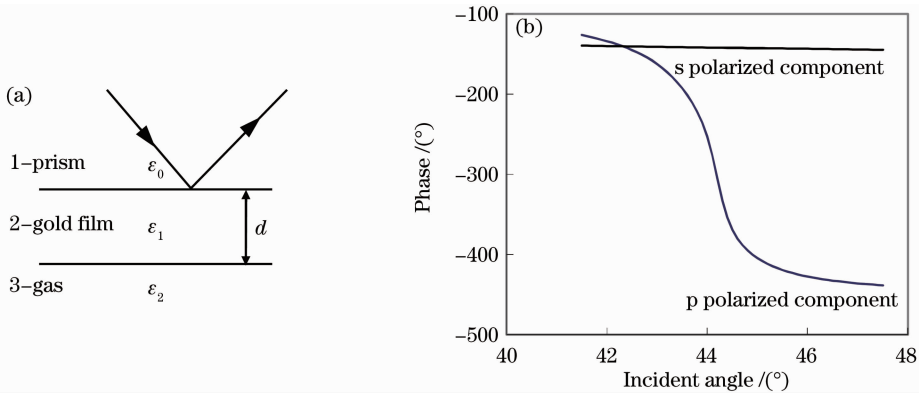


图 2 表面等离子体共振条件下反射光相位与入射角关系曲线。(a) Kretschmann 型 SPR 激发结构;

(b) 反射光 p、s 分量的相位与入射角的关系

Fig. 2 Curve of relation between the phase of the reflected light and the incident angle on SPR condition. (a) Kretschmann excitation structure; (b) relation between the phases of p and s polarized components of the reflected light and the incident angle

$$r_{012}^q = \frac{r_{01}^q + r_{12}^q \exp(2ik_{1z}d)}{1 + r_{01}^q r_{12}^q \exp(2ik_{1z}d)}, \quad q = p, s \quad (1)$$

式中

$$r_{i,i+1}^q = \frac{X_i^q - X_{i+1}^q}{X_i^q + X_{i+1}^q}, \quad i = 0, 1$$

$$X_i^q = \begin{cases} \epsilon_i/k_{iz}, & q = p \\ k_{iz}, & q = s \end{cases}$$

$$k_{iz} = \sqrt{\epsilon_i(\omega/c)^2 - k_x^2}, \quad k_x = \omega/c \cdot \sqrt{\epsilon_0} \sin \theta. \quad (2)$$

当棱镜材料为 K9 玻璃(介电常数 2.2944)、金膜(介电常数 $-10.92 + 1.49i$)厚度为 40 nm、气体为空气时,根据(1)式,反射光相位特性曲线如图 2(b)所示。图中表明,s 偏振分量的相位基本不变,不激发表面等离子体波;而 p 偏振分量在特定角度即 SPR 共振角附近其相位产生较大变化。当气体折射率变化时,曲线在形状基本不变地情况下发生平移,共振角改变。进一步可以计算出反射光 p、s 分量的相位差随气体折射率的变化曲线,如图 3 所示。

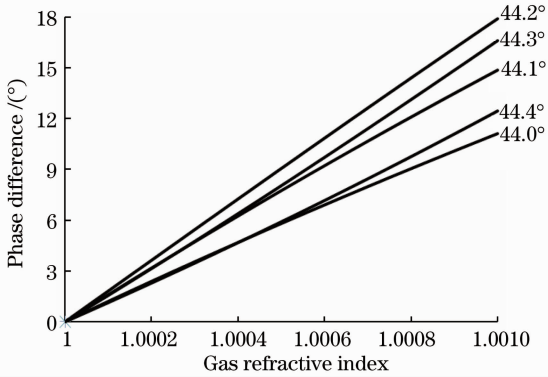


图 3 反射光 p、s 分量的相位差随气体折射率的变化曲线

Fig. 3 Curve of relation between the phase difference of p and s polarized components of the reflected light and gas refractive index

由图 3 可知,在合适的棱镜、金属膜厚度等参数下,气体折射率为 1~1.001 范围内(该范围覆盖了绝大多数气体),反射光 p、s 分量的相位差与气体折射率变化可看作成线性关系。为计算方便,定义相位响应度为某入射角处的局部斜率

$$S_{RI} = \left. \frac{\partial(\Delta\varphi)}{\partial n} \right|_{d,\theta}, \quad (3)$$

式中 $\Delta\varphi$ 为反射光 p、s 分量的相位差, n 为气体折射率, d 为金膜厚度, θ 为入射角。从图 3 可认为对于固定的入射角, S_{RI} 近似为常数,且当入射角等于共振角(图中为 44.2°)时,相位响应度达到极大值。这样只需用其他方法测量出某一状态下的气体折射

率,例如标准状态下的空气折射率,然后通过抽气使 SPR 传感器处于真空状态,并测量出这个过程的相位变化量,就可以标定出对应于特定的入射角的相位响应度和初始相位值 $\Delta\varphi_0$ 。利用相位响应度值和测量到的相位值,就可以得到任意环境中的气体折射率值

$$n - 1 = \frac{\Delta\varphi - \Delta\varphi_0}{S_{RI}}. \quad (4)$$

在前述参数条件下,可知当入射角为共振角(44.2°)时,相位响应度约为 1.8×10^4 ,在不确定度为 0.1° 的相位测量精度下,气体折射率的测量精度为 $0.1/S_{RI} = 5.6 \times 10^{-6}$,测量范围为 $360/S_{RI} = 2.0 \times 10^{-2}$ 。

3 误差分析及参数结构设计

由(3)、(4)式可知,金膜厚度和入射角是影响相位响应度的关键因素,此外,从图 3 可知,反射光 p、s 分量的相位差与气体折射率变化并不严格成线性关系,其固有非线性误差也影响了相位响应度,这些因素最终会影响到气体折射率的测量精度,需评估其影响并做相应的参数与结构设计。

3.1 金膜膜厚的选择

图 4 计算了不同金膜厚度下的折射率测量分辨率,从图 4 可知,膜厚从 20 nm 变化到 40 nm 时,最小分辨率是逐渐提高的;而 50 nm 膜厚下的分辨率曲线形状变化很大。根据文献[29],以 47 nm 厚度为界,大于该厚度为厚膜,小于为薄膜,这两类的相位特性完全不同,对于相位测量来说应使用薄膜。

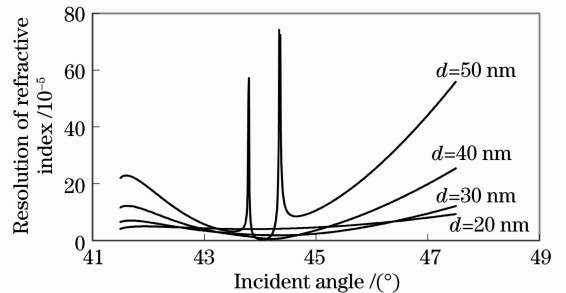


图 4 不同金膜厚度下的测量分辨率曲线

Fig. 4 Curve of measurement resolution at different thicknesses of the gold film

对于薄膜情况,计算分析了不同厚度下系统的抗干扰能力,如图 5 所示。可以看到,40 nm 膜厚在最小分辨率处(图中黑点的位置)因 1×10^{-5} rad 角漂引起的测量误差与 30 nm 相当,略小于 20 nm 处。综合以上分析,为便于相位测量,同时保证足够

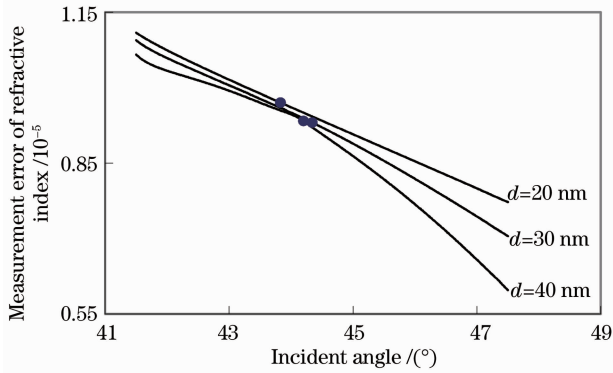


图 5 1×10^{-5} rad 角漂扰动引起的气体折射率测量误差
Fig. 5 Error of gas refractive-index measurement when the shift of incident angle is 1×10^{-5} radian

的测量分辨率和好的抗干扰能力,并考虑到制作工艺,40 nm 厚的金膜是比较合适的选择。

3.2 相位差与折射率的非线性关系造成的系统误差

当入射角为共振角(44.2°)时,得到的反射光 p、s 分量的相位差及相位响应度随气体折射率变化的曲线如图 6 所示,由图可知,气体折射率为 $1 \sim 1.001$ 范围内时,相位响应度最大相对误差为 1.26%,根据(3)式可知系统误差小于 2×10^{-6} 。可认为由于相位差与折射率的非线性关系造成的系统误差不会影响测量结果。

3.3 入射角漂移造成的测量误差及自适应设计

由图 3 可知,当入射角有漂移时,相位响应度将受到影响。当入射角为共振角时,入射角漂移产生

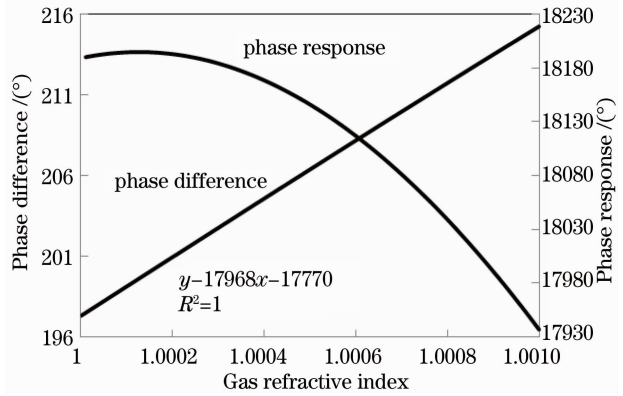


图 6 反射光相位差及相位响应度与气体折射率的关系曲线

Fig. 6 Curve of relation between the phase difference as well as the phase response of the reflected light and gas refractive index

的气体折射率的测量误差如图 7(a) 所示, 1×10^{-5} rad 的入射角变化将导致气体折射率测量结果出现同量级的误差。因此必须采取措施减少激光角漂的影响。根据图 3 中相位差与折射率关系曲线的特点,提出了采用自适应误差修正的方法来减少误差。即通过光路设计,在两个表面产生表面等离子体波。当入射光有角漂时,使在该两表面上的入射角变化相反,从而使相应的相位误差反相变化,把两个表面上的相位差变化平均后就能消除角漂误差。修正后的结果如图 7(b) 所示,误差减小了一个数量级,不影响测量结果。

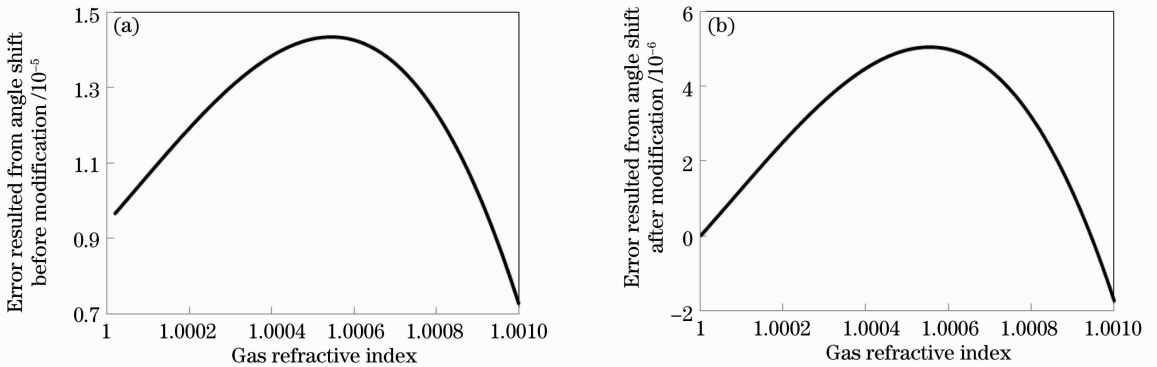


图 7 自适应修正前后 1×10^{-5} rad 入射角漂移造成的测量误差(44.2°)时。(a)修正前;(b)修正后

Fig. 7 Error of gas refractive-index measurement when the shift of incident angle is 1×10^{-5} radian (44.2°). (a) Before modification; (b) after self-adaptive modification

减小角漂误差的 SPR 棱镜结构如图 8(a)、(b) 所示,由一个平行六面体棱镜和一个屋脊棱镜组成。屋脊棱镜的脊边平行于入射面。平行六面体的上下表面 A 和 B 上镀有金膜。平行六面体棱镜的内角 θ_0 等于选定的入射角 θ_{inc} ,以保证在 B 表面的反射光垂直入射到屋脊棱镜中。在平行六面体棱镜中,

在镀膜表面 A 和 B 上总共反射 4 次,进入屋脊棱镜之前和之后各两次。图 8(c) 分析了自适应传感器的工作原理。当入射角漂移 $\Delta\theta$ 时,即从 B 表面反射进入屋脊棱镜的光入射角为 $\Delta\theta$,那么根据屋脊棱镜的性质,其反射光出射角为 $-\Delta\theta$ 。因此对于光线进入屋脊棱镜之前的两次反射,其入射角为 $\theta_{inc} +$

$\Delta\theta$;而对于从屋脊棱镜出来后的两次反射,其入射角为 $\theta_{inc} - \Delta\theta$ 。因此,该结构可以有效地减小角漂引起的测量误差。由于光在镀膜表面总共反射了 4

次,这样大大增加了 p 偏振光的相位变化,提高了相位响应度与测量灵敏度。

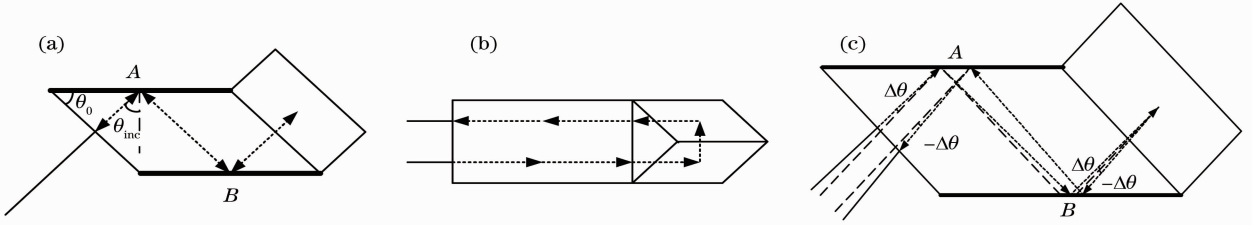


图 8 角漂自适应 SPR 棱镜结构示意图。(a) 正视图;(b) 俯视图;(c) 自适应 SPR 棱镜光路分析

Fig. 8 Schematic of SPR prism with self-adaptive structure for angle shift. (a) Front view; (b) vertical view;

(c) optical path analysis of the self-adaptive SPR prism

4 实验结果验证及分析

鉴于空气折射率可根据 Edlen 公式通过测量压强、温度、湿度等参数得到,可以用于本实验系统的标定比对,因此根据图 1 搭建了实验平台并进行了空气折射率的测量比对实验。实验在恒温恒湿环境下进行,采用抽气法,利用抽气前后的相位变化可以标定出对应于共振入射角的 S_{RI} 和 $\Delta\varphi_0$ 值。实验中所用相位计的分辨率为 0.1° ,真空室中用热电偶温度计(分辨率为 0.01°C)和真空计(不确定度为 5 Pa)来测量真空室内的温度和气压值。

实验曲线如图 9 所示,为三个周期的测量结果,两个采样点之间的间隔约为 2 S 。每个周期的测量过程依次为:连通大气状态(ab)、缓慢抽气(bc)、快速抽气(cd)、真空状态(de)、缓慢充气(ef)、快速充气(fg)。缓慢抽气及充气过程是为了避免气压迅速变化导致温度产生较大变化,快速抽气过程是为了提高真空室内的真空度,同时快速抽气及充气过程可

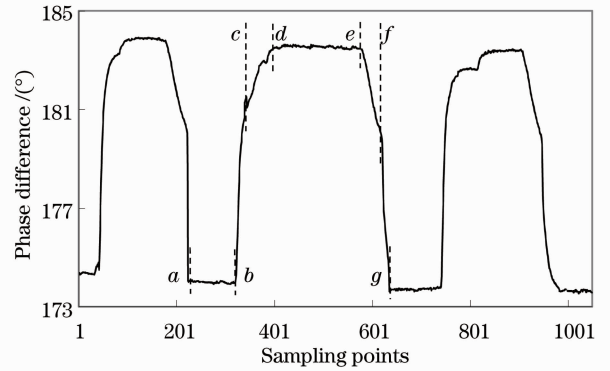


图 9 空气折射率测量实验曲线

Fig. 9 Experimental curve of the measurement of the air refractive index

缩短整个实验过程的时间。

由于抽气及充气过程存在较大的非线性,因此采用平衡状态下的数值进行测量,即连通大气状态和真空状态。表 1 为图 9 中三个周期下的温度、湿度、气压值,并根据 Edlen 公式得出其相应的空气折射率值。

表 1 各周期空气参数及折射率值

Table 1 Values of air parameters and refractive index of each period

Period	Atmosphere connection state				Vacuum state		
	$T / ^\circ\text{C}$	H / Pa	P / Pa	$n-1$	$T / ^\circ\text{C}$	P / Pa	$n-1$
1	21.5	1079.73	101595	2.6748×10^{-4}	21.46	140	3.7×10^{-7}
2	21.5	1079.73	101595	2.6748×10^{-4}	21.56	140	3.7×10^{-7}
3	21.5	1079.73	101595	2.6748×10^{-4}	21.59	140	3.7×10^{-7}

采用前两个周期的数据对 S_{RI} 和 $\Delta\varphi_0$ 进行标定,并用第三个周期的数据来得到标定后的实验系统的测量误差。根据图 9 可标定出前两个周期连通大气状态和真空状态下的相位平均值,如表 2 所示。

根据表 2 可知 SPR 实验系统的空气折射率测量公式为

$$n = \frac{\Delta\varphi - 183.38}{-36288} + 1. \quad (5)$$

利用(5)式与第三周期中连通大气状态的相位值(173.68°)可知其空气折射率为 1.00026725 ,与表 1 中 Edlen 公式结果相比对,测量误差为 2.3×10^{-7} ,鉴于实验周期较少,其可信的测量误差能达到 10^{-6} 量级。

表 2 S_{RI} 和 $\Delta\varphi_0$ 的标定
Table 2 Calibration of S_{RI} and $\Delta\varphi_0$

Period	Item	$\Delta\varphi / (^\circ)$		$\Delta\varphi - \Delta\varphi_0 / (^\circ)$	$S_{RI} / (^\circ)$	$\Delta\varphi_0 / (^\circ)$
		Atmosphere connection state	Vacuum state			
1	Average value (standard deviation)	174, 169 (0.03)	183, 871 (0.03)	9, 702	-36323	183.87
2	Average value (standard deviation)	173, 8565 (0.03)	183, 540 (0.05)	9, 683	-36253	183.54
—	Average value (standard deviation)				-36288 (49.5)	183.38 (0.23)

5 结 论

通过对具有角漂移自适应结构的 SPR 气体折射率传感器系统的设计和分析发现,所设计的自适应结构 SPR 传感器采用相位调制,避免了入射角或波长扫描的复杂结构和光强调制的不稳定性,其传感器内部光路简单,且能够对光束角漂移产生的误差进行自补偿修正,使角漂移引起的误差降低了一个数量级,同时相位响应度与测量灵敏度得到显著提高。同时分析设计了金膜厚度参数,并评估了反射光 p、s 分量的相位差与气体折射率之间固有非线性带来的误差。整个测量系统采用双频光源进行外差相位测量,使系统具有良好的共光路结构,系统具有较高的测量精度和稳定性。应用于空气折射率的测量比对实验显示其测量精度达到 10^{-6} 量级。该测量系统可应用于空气折射率修正、环境监测、气体检测等领域,具有很好的应用价值。

参 考 文 献

- 1 W. H. Weber, S. L. McCarthy. Surface-plasmon resonance as a sensitive optical probe of metal-film properties[J]. *Phys. Rev. B*, 1975, **12**(12): 5643~5650
- 2 Zheng Rongsheng, Lu Yonghua, Lin Kaiqun *et al.*. Recent progress of research on surface plasmon resonance sensors[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2008, **25**(6): 658~664
郑荣升, 鲁拥华, 林开群等. 表面等离子体共振传感器研究的新进展[J]. *量子电子学报*, 2008, **25**(6): 658~664
- 3 Berrier Audrey, Offermans Peter, Cools Ruud *et al.*. Enhancing the gas sensitivity of surface plasmon resonance with a nanoporous silica matrix[J]. *Sensor and Actuators B-Chemical*, 2011, **160**(1): 181~188
- 4 Leong Haisheng, Guo Junpeng. Surface plasmon resonance in superperiodic metal nanoslits[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(24): 4764~4766
- 5 Pelosoff Gilad, Tel-Vered Ran, Willner Itamar. Amplified surface plasmon resonance and electrochemical detection of Pb(2+) ions using the Pb(2+)-dependent DNAzyme and Hemin/G-quadruplex as a label[J]. *Analytical Chemistry*, 2012, **84**(8): 3703~3709
- 6 Hong Xiaogang, Xu Wendong, Zhao Chengqiang *et al.*. Optimal design of surface plasmon resonance films structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2164~2169

- 洪小刚, 徐文东, 赵成强等. 表面等离子体共振膜系结构优化设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2164~2169
- 7 Schuster Tobias, Herschel Reinhold, Neumann Niels *et al.*. Miniaturized long-period fiber grating assisted surface plasmon resonance sensor[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2012, **30**(8): 1003~1008
- 8 Li Ying, Zhong Jingang, Zhang Yonglin *et al.*. Construction basis of biotic gene chip checking system with surface plasmon resonance imaging[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2290~2293
李莹, 钟金钢, 张永林等. 表面等离子体共振成像生物芯片检测系统[J]. *光子学报*, 2007, **36**(12): 2290~2293
- 9 Liu Zhigang, Huang Haizhen, Yuan Ping. Detection of binding of antibodies with recombinant house dust mite allergen (rDer p2) by surface plasmon resonance technique[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(2): 293~296
刘志刚, 黄海珍, 袁萍. 表面等离子体共振技术检测重组户尘螨变应原 rDer p2 与抗体的结合[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(2): 293~296
- 10 Shi Xueliang, Zheng Shilie, Chi Hao *et al.*. All-optical modulator with long range surface plasmon resonance[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2012, **44**(5): 1442~1445
- 11 Li Ying, Liu Xia, Lin Zhao. Recent developments and applications of surface plasmon resonance biosensors for the detection of mycotoxins in foodstuffs[J]. *Food Chemistry*, 2012, **132**(3): 1549~1554
- 12 Wu Pinghui, Gu Juguan, Liu Bin *et al.*. Experimental research on wavelength modulation surface plasmon resonance sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(2): 022501
吴平辉, 顾菊观, 刘彬等. 波长检测型表面等离子体共振传感器的实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(2): 022501
- 13 Zhang Mei, Dai Jixiang, Yang Minghong *et al.*. Fiber-optic surface plasmon resonance hydrogen sensor based on palladium coating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1205005
张美, 代吉祥, 杨明红等. 基于表面等离子体共振的钯膜氢气传感器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1205005
- 14 E. Kretschmann, H. Raether. Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light [J]. *Zeitschrift fur Naturforschung A*, 1968, **A23**(12): 2135~2136
- 15 A. Otto. Excitation of surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection[J]. *Zeitschrift fur Physik A*, 1968, **216**(4): 398~410
- 16 J. Homola, I. Koudela, S. Yee. Surface plasmon resonance sensor based on diffraction gratings and prism couplers: sensitivity comparison [J]. *Sensors and Actuators B*, 1999, **54**(1): 16~24
- 17 Liu Chang, Zou Zhengfeng, Chen Shufen *et al.*. Surface plasmon resonance sensor based on compact disk grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0314001

- 刘畅, 邹正峰, 陈淑芬等. 基于光盘光栅的表面等离子体共振传感器[J]. 中国激光, 2012, **39**(3): 0314001
- 18 C. R. Lavers, J. S. Wilkinson. A waveguide-coupled surface-plasmon sensor for an aqueous environment [J]. *Sensors and Actuators B*, 1994, **22**(1): 75~81
- 19 R. C. Jorgenson, S. S. Yee. A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Sensors and Actuators B*, 1993, **12**(3): 213~220
- 20 Yu Xinglong, Wang Dongsheng, Wang Dingxin. Micro-array detection system for gene expression products based on surface plasmon resonance imaging [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2003, **91**(13): 133~137
- 21 S. G. Nelson, K. S. Johnston, S. S. Yee. High sensitivity surface plasmon resonance sensor based on phase detection [J]. *Sensors and Actuators B*, 1996, **35**(36): 187~191
- 22 J. S. Yuk, H. S. Kim, J. W. Jung *et al.*. Analysis of protein interactions on protein arrays by a novel spectral surface plasmon resonance imaging [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2006, **21**(8): 1521~1528
- 23 J. B. Beusink, A. M. C. Lokate, G. A. J. Besselink *et al.*. Angle-scanning SPR imaging for detection of biomolecular interactions on microarrays [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2008, **23**(6): 839~844
- 24 Lü Qiang, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua. Stability research of water quality analysis system based on surface plasmon resonance [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1268~1272
- 吕强, 黄德修, 元秀华. 基于表面等离子体共振的水质分析系统稳定性研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(7): 1268~1272
- 25 Wan Yan, Liang Dakai, Zeng Jie *et al.*. Prism surface plasmon wave sensor system based on polarizing beam splitter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1354~1357
- 万艳, 梁大开, 曾捷等. 基于偏振分光棱镜的表面等离子体波传感系统[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1354~1357
- 26 Wang Yuandong, Ma Xiaohong, Zhao Huafeng. SPR sensor base on phase detection by using harmonics analysis [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(10): 1298~1301
- 王远东, 马晓红, 赵华凤. 基于谐波分析的相位型表面等离子体共振传感器[J]. 光电子·激光, 2009, **20**(10): 1298~1301
- 27 Guan Chunying, Yuan Libo, Shi Jinhui. Microstructured-fiber surface plasmon resonance sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0206003
- 关春颖, 苑立波, 史金辉. 微孔光纤表面等离子体共振传感特性分析[J]. 光学学报, 2011, **31**(2): 0206003
- 28 Zheng Long, Zhang Xia, Shi Lei *et al.*. Surface plasmon resonance sensors based on Au-metalized nanolayer in microstructured optical fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(1): 012401
- 郑龙, 张霞, 施雷等. 基于金纳米层的微结构光纤表面等离子体共振传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(1): 012401
- 29 Chen Tao, Guo Jihua. Locus of reflectivity in complex coordinates during surface plasma resonance [J]. *J. Tsinghua University*, 2003, **43**(2): 285~288
- 陈涛, 郭继华. 光激发表面等离子体波反射系数在复平面的轨迹[J]. 清华大学学报, 2003, **43**(2): 285~288

栏目编辑: 何卓铭