

# 基于表面等离子体共振和双频激光干涉相位测量的空气折射率测量

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** 设计了一种基于表面等离子体共振和相位检测的空气折射率实时测量系统, 该系统采用双频激光外差干涉光路和具有角漂移自适应结构的表面等离子体共振传感器。理论分析表明测量光信号的 p、s 分量的相位差相对于参考光信号的变化与空气折射率近似呈线性关系, 并由此得到测量公式, 传感器的自适应结构将角漂移引起的误差降低了一个数量级并大幅提高了测量灵敏度。与 Edlen 公式的测量比对实验结果表明, 在  $44.0^\circ$  入射角(共振角附近)和  $0.1^\circ$  的相位测量精度下, 空气折射率的测量精度优于  $5 \times 10^{-6}$ 。该测量系统还可为更高精度的空气折射率测量仪提供足够精确的初值。

**关键词** 测量; 空气折射率; 表面等离子体共振; 角漂移自适应结构; 相位测量; 干涉测量

**中图分类号** TP212.14; TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0108001

## Measurement of Air Refractive Index Based on Surface Plasmon Resonance and Phase Detection by Dual-Frequency Laser Interferometry

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 measurement system of refractive index of air (RIA) based on surface plasmon resonance (SPR) and phase detection is presented. A heterodyne interference optical path is built and a SPR sensor with self-adaptive structure for angle shift is applied. Theoretical analyses indicate that the variation of the phase difference between p and s polarization components of the measurement signal versus that of the reference signal is almost linear with RIA fluctuation. Thus the formula of RIA measurement is derived. The application of the self-adaptive SPR sensor reduces the measurement error by an order of magnitude and greatly improves the sensitivity. The comparison experiments with the method of Edlen equations show that the measurement accuracy reaches less than  $5 \times 10^{-6}$  at the phase detection precision of  $0.1^\circ$  and the incident angle of  $44.0^\circ$  (which is close to the resonance angle). Furthermore, the measurement system can provide an initial estimate of RIA accurate enough for other measuring instruments with higher precision.

**Key words** measurement; refractive index of air; surface plasmon resonance; self-adaptive structure for angle shift; phase detection; interferometry

**OCIS codes** 120.0280; 120.1088; 120.3180; 120.4570; 120.5050

### 1 引言

在空气环境下进行高精度测量时, 环境因素导致的空气折射率(RIA)变化成为限制测量不确定度的主要原因之一。以激光干涉长度测量为例, 当测

量位移量  $L$  为 100 mm, 空气折射率  $n$  为 1.00027, 激光在真空中的波长  $\lambda_0$  为 632.8 nm 时, 如果空气折射率的变化为  $10^{-5}$  量级, 其引起的测量误差约为  $1 \mu\text{m}^{[1]}$ 。因此在高精度光学测量中必须关注空气

收稿日期: 2012-08-15; 收到修改稿日期: 2012-09-04

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

折射率。

空气折射率测量方法通常分为间接测量和直接测量两大类。间接测量方法通过测量空气参数,根据 Edlen 公式等计算求得相应的空气折射率<sup>[2]</sup>。直接测量大多以长度干涉仪为基础,采用抽真空或插入真空室的方式,以获得大气环境及真空环境下的被测长度值变化,从而能实时测量出空气折射率值<sup>[3,4]</sup>。表面等离子体共振 (SPR) 是指金属表面自由电子的密度波动现象<sup>[5]</sup>,在表面以及界面的光学性质研究<sup>[6~10]</sup>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、物理等多个领域得到了广泛应用<sup>[11~17]</sup>。由于 SPR 中反射、透射光的光强及相位随入射角、介质折射率等参数的变化而剧烈变化,因此可利用该特性来测量空气折射率的变化。

常见的 SPR 激发结构主要有棱镜型<sup>[18,19]</sup>、光栅型<sup>[20,21]</sup>和波导型<sup>[22,23]</sup>,其中棱镜型结构简单、检测方便,同时分辨率也很高。SPR 的信号检测方法主要有强度调制<sup>[24]</sup>、相位调制<sup>[25]</sup>、波长调制<sup>[26]</sup>和角度调制<sup>[27]</sup>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;相位调制方法具有很高的精度,但一般要进行高精度的波面相位检测,受角度漂移影响也较大。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、算法优化等多方面取得了诸多进展<sup>[28~32]</sup>。

本文采用了棱镜型激发结构与相位调制方式,并设计了具有角漂移自适应功能的 SPR 结构,采用双频激光外差干涉光路搭建了空气折射率实时测量

系统。该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

SPR 传感器采用“棱镜-金膜-空气”的三层 Kretschmann 棱镜型 SPR 结构<sup>[18]</sup>,由麦克斯韦方程可得到 p、s 偏振光的反射系数  $R$  分别为

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

式中

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

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

$$k_{iz} = \sqrt{\epsilon_i(\omega/c)^2 - k_x^2}, k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0} \sin \theta_{inc},$$

式中  $d$  为金膜厚度,  $\epsilon_i$  为各层介质的介电常数,  $\theta_{inc}$  为光入射到棱镜与金膜界面上的入射角,  $\omega$  为激光角频率,  $c$  为光速。

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、空气折射率为 1.00027 时,根据(1)式,反射光特性曲线如图 1 所示。图 1 表明, s 偏振分量的反射率与相位基本不变,不激发表面等离子体波;而 p 偏振分量在特定角度即 SPR 共振角附近其反射率与相位产生较大变化。当空气折射率变化时,曲线在形状基本不变的情况下发生平移,共振角改变。进一步计算可得到反射光 p、s 分量的相位差与空气折射率变化的关系曲线,如图 2 所示。由图 2 可知,从真空到大气环境范围内,二者成近似线性关系:

$$\Delta\varphi = S_{R1}n, \quad (2)$$

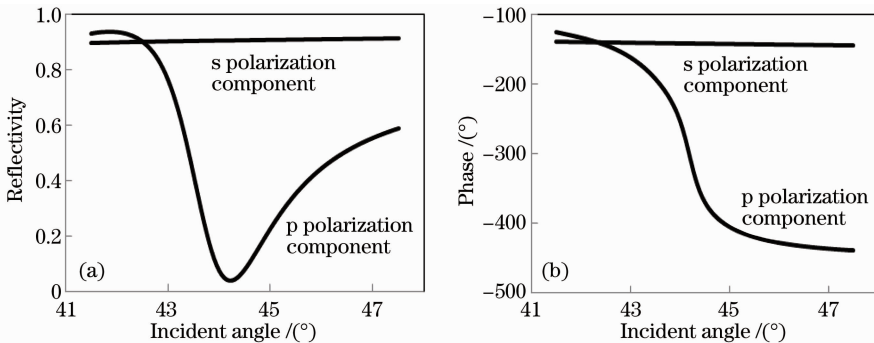


图 1 表面等离子体共振条件下反射光 p、s 分量的 (a) 反射率及 (b) 相位与入射角的关系曲线

Fig. 1 (a) Reflectivity and (b) phase of p and s polarization components of the reflected light versus the incident angle at SPR condition

式中  $\Delta\varphi$  为反射光 p、s 分量的相位差,  $n$  为空气折射率,  $S_{RI}$  为某一入射角度下的比例系数。

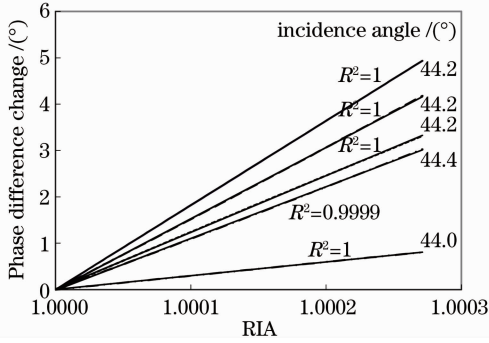


图 2 反射光 p、s 分量的相位差与空气折射率变化近似呈线性关系

Fig. 2 Almost linear relationship between the phase difference change of p and s polarized components of the reflected light and refractive index of air

$S_{RI}$  与金膜厚度  $d$  与入射角  $\theta$  有关, 定义为相位响应度:

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

从图 2 中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 ( $44.2^\circ$ ) 时, 相位响应度达到极大值, 如图 3 所示。这样只需用其他方法测量任意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入射角的相位响应度  $S_{RI}$  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, 就可以得到任意状态下的空气折射率值

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

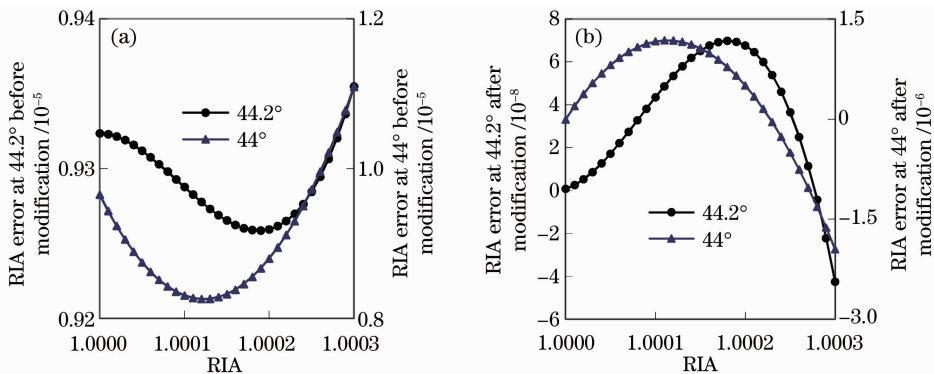


图 4 入射角漂移为  $1 \times 10^{-5}$  rad 时修正前后的空气折射率测量误差。(a)修正前;(b)修正后  
Fig. 4 Error of RIA measurement before and after modification when the shift of incident angle is  $1 \times 10^{-5}$  rad. (a) Before modification; (b) after modification

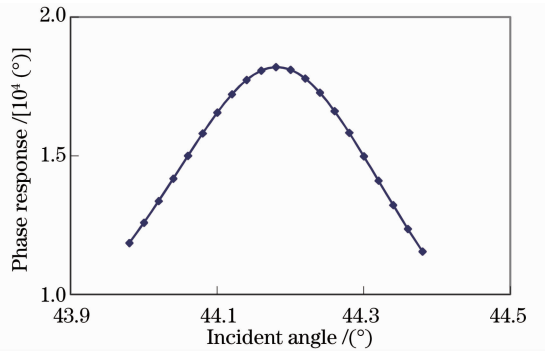


图 3 相位响应度与入射角关系曲线

Fig. 3 Relationship between the phase response and the incident angle

在所述参数条件下, 由图 3 可知当入射角为共振角 ( $44.2^\circ$ ) 时, 相位响应度最大, 约为  $1.8 \times 10^4$ , 在不确定度为  $0.1^\circ$  的相位测量精度下, 单次反射时空气折射率的测量精度可达  $0.1/S_{RI} = 5.6 \times 10^{-6}$ 。

### 3 方案设计及实验结果

分析发现入射光的角漂移是影响测量精度的主要误差源<sup>[33]</sup>。由图 4(a)可知  $1 \times 10^{-5}$  rad 的入射角漂移在共振角 ( $44.2^\circ$ ) 及其附近处引起的空气折射率测量误差达到了  $10^{-5}$  量级, 因此必须采取措施减少激光角漂移的影响。根据图 2 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。通过光路设计, 在两个表面分别产生表面等离子体波, 当入射光有角漂移时, 其在该两表面上的入射角变化相反, 从而使相位误差反相变化, 将其平均后就能极大地减小角漂移误差。修正后的结果如图 4(b) 所示, 可知在  $44.2^\circ$  的共振入射角处角漂移引起的最大测量误差减小到低于  $10^{-7}$  量级, 在其附近的  $44^\circ$  入射角处, 修正后的最大测量误差也小于  $2 \times 10^{-6}$ 。

所设计的角漂移自适应 SPR 棱镜结构如图 5(a)所示,由一个平行六面体棱镜和一个屋脊棱镜胶合而成。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,其内角  $\theta_0$  等于选定的入射角  $\theta_{inc}$ ,以保证在 B 表面的反射光垂直入射到屋脊棱镜中,光在镀膜表面 A 和 B 上总共反射 4 次,进入屋脊棱镜之前和之后各两次。光路分析如图 5(b)所示,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  $\Delta\theta$ ,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个反射,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移引起的测量误差。由于光在镀膜表面总共反射了 4 次,这样还大大增加了 p 偏振光的相位变化,提高了相位响应度与测量灵敏度。

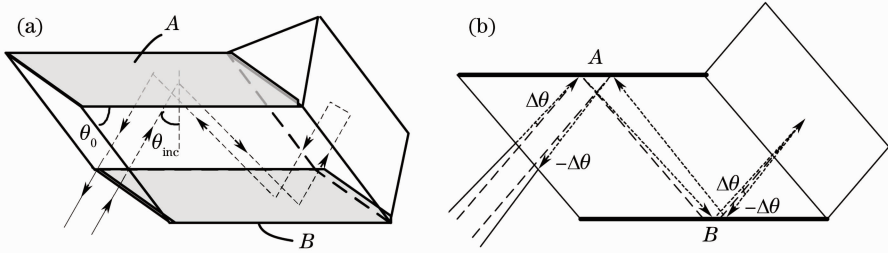


图 5 角漂移自适应 SPR 棱镜结构示意图(膜厚为 40 nm)。(a)立体图;(b)自适应光路分析

Fig. 5 Schematic of SPR prism with self-adaptive structure for angle shift (the thickness of the gold film is 40 nm). (a) Solid diagram; (b) optical path analysis of the self-adaptive SPR prism

测量实验光路系统如图 6 所示,将 SPR 传感器放置在真空室中,其内角  $\theta_0$  为  $44.0^\circ$ 。真空室配有抽气口和热电偶、真空计接口,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 632.8 nm 并相互正交的线偏振光<sup>[34]</sup>。光束通过一个分光镜后被分成两束光,该两束光中均包含 p 和 s 偏振分量。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,相位计的分辨率为  $0.01^\circ$ 、不确定度为  $0.1^\circ$ 。透射光被全反射镜 1 反射后,通过真空室的光窗正入射到角漂移自适应 SPR 传感器上。光束在 SPR 传感器中经一系列反射后以平行于入射光的方向出

射并被全反射镜 2 反射(出射光与入射光不共路,全反射镜 2 不遮挡入射光),然后由光电探测器 2 接收形成测量信号并被送入相位计。当真空室内通过抽气与充气由真空状态变化到与大气状态一致时,SPR 传感器出射光的 p、s 偏振分量的相位差产生相应变化,其与参考光的 p、s 偏振分量相位差之差被相位计记录,由此标定出对应于入射角的  $S_{RI}$  和  $\Delta\varphi_0$  值,从而测出空气折射率值。为标定本实验方案的测量精度,采用 Edlen 公式法进行比对,其所需的温度和气压参数值分别由热电偶温度计(分辨率为  $0.01^\circ\text{C}$ )和真空计(不确定度为 5 Pa)测得,湿度参数值由实验室中的湿度计(相对湿度不确定度为 1.5%,

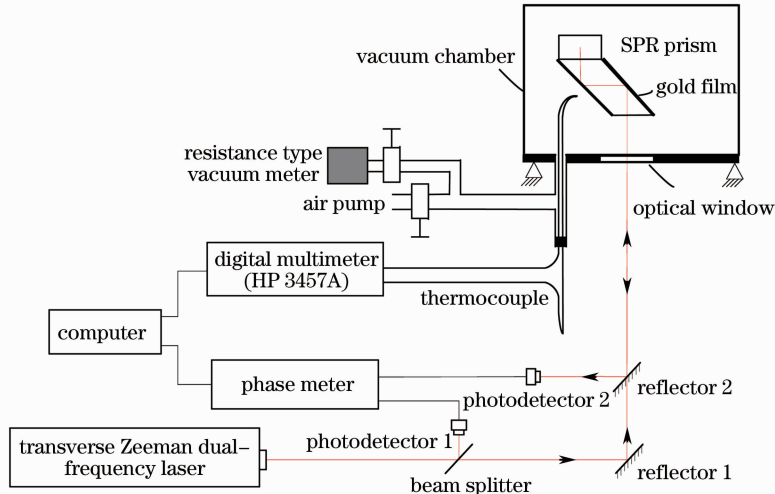


图 6 空气折射率测量光路系统示意图

Fig. 6 Schematic of RIA measurement system configuration

图 6 中未标出)测得。

实验曲线如图 7 所示,为 4 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 段)、缓慢抽气(bc 段)、快速抽气(cd 段)、真空状态(de 段)、缓慢充气(ef 段)、快速充气(fg 段)。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缩短整个实验过程的时间。

从图 7 中的曲线可以看到,在 bd 和 eg 阶段中相位差的变化并不连续,而是在温度变化处有突变,这是因为在抽气及充气过程中,气体密度的迅速变化伴随着温度的快速变化,使空气折射率产生突变,从而导致相位差产生额外变化,图 8(a)中的实验曲线突出地显示了这一点。随着抽气及充气过程结束,真空室内温度、气压趋于平衡状态,产生的额外

相位差消失,因此该突变并不影响测量结果。此外,抽、充气引起的气体密度非线性变化会导致相位差与空气折射率的变化呈非线性关系,如图 8(b)所示。因此,无法利用抽、充气过程中的数据进行测量。

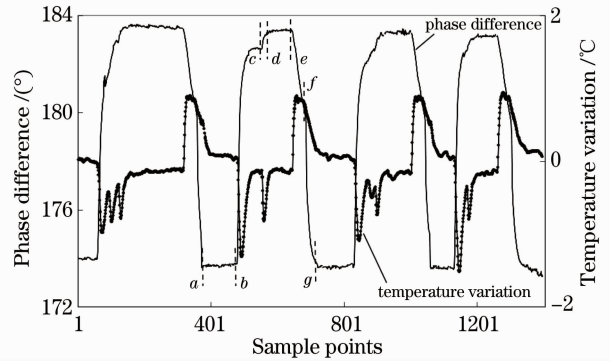


图 7 空气折射率测量实验曲线

Fig. 7 Experimental curve of the measurement of the refractive index of air

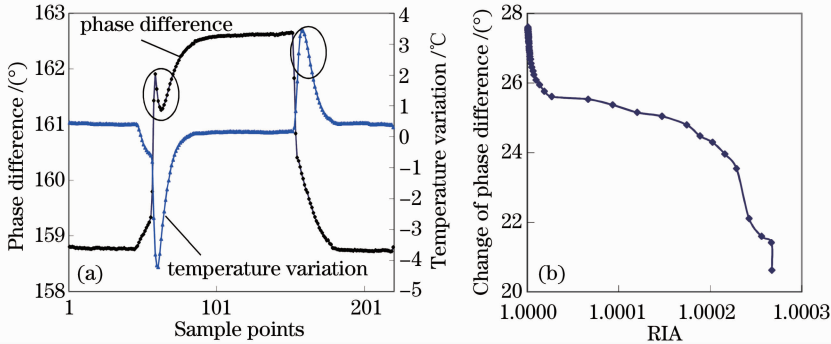


图 8 测量过程中的非线性分析。(a)温度变化产生额外相位变化;(b)抽气过程中相位差随空气折射率呈非线性变化  
Fig. 8 Analysis of nonlinearity in the measurement process. (a) Temperature fluctuation causes additional phase difference change; (b) nonlinear relationship between the phase difference and air refractive index during the air-pumping process

鉴于抽、充气过程存在较大的非线性,采用连通大气状态和真空状态下的数值进行测量。表 1 为图 7 中 4 个周期下的温度( $T$ )、湿度( $H$ )、气压( $P$ )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		
	$T / ^\circ\text{C}$	$H / \text{Pa}$	$P / \text{Pa}$	$n-1$	$T / ^\circ\text{C}$	$P / \text{Pa}$	$n-1$
1	21.5	1078.62	101595	$2.6746 \times 10^{-4}$	21.36	140	$3.7 \times 10^{-7}$
2	21.6	1074.26	101595	$2.6741 \times 10^{-4}$	21.39	140	$3.7 \times 10^{-7}$
3	21.6	1075.21	101600	$2.6743 \times 10^{-4}$	21.33	140	$3.7 \times 10^{-7}$
4	21.6	1072.75	101585	$2.6737 \times 10^{-4}$	21.34	140	$3.7 \times 10^{-7}$

采用前两个周期的数据对  $S_{\text{RI}}$  和  $\Delta\varphi_0$  进行标定,并采用后两个周期的数据来检验标定后空气折射率的测量误差。根据图 7 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 可知本实验系统的空气折射率测量公式为

$$n = \frac{\Delta\varphi - 183.47}{-36290} + 1. \quad (5)$$

根据(5)式与第 3、4 周期中连通大气状态的相位值,可得到该两周期的空气折射率测量结果及其与 Edlen 公式方法之间的比对误差,如表 3 所示,可见本实验系统的空气折射率测量不确定度优于  $5 \times 10^{-6}$ 。



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

Period	Item	$n-1$		$\Delta\varphi - \Delta\varphi_0 / (^\circ)$	$S_{RI} / (^\circ)$	$\Delta\varphi_0 / (^\circ)$
		Atmosphere connection state	Vacuum state			
1	Average value (standard deviation)	173.980(0.03)	183.540(0.04)	9.685	-36262	183.54
2	Average value (standard deviation)	173.729(0.02)	183.386(0.02)	9.698	-36319	183.39
—	Average value (standard deviation)				-36290(40.3)	183.47(0.11)

表 3 空气折射率测量结果的比对  
Table 3 Comparison of air refractive index measurement

Period	Phase difference / (°)	$n-1$		Uncertainty
		Edlen equations	Presented method	
3	173.65	$2.6743 \times 10^{-4}$	$2.7060 \times 10^{-4}$	$3.2 \times 10^{-6}$
4	173.59	$2.6737 \times 10^{-4}$	$2.7225 \times 10^{-4}$	$4.9 \times 10^{-6}$

## 4 结 论

设计并搭建了基于双频激光外差干涉光路的 SPR 空气折射率传感器系统,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。双频激光外差干涉光路使系统具有良好的共光路结构,有较高的测量精度和稳定性。理论分析表明测量光信号的 p、s 分量的相位差相对于参考光信号的变化与空气折射率近似呈线性关系,并由此得到测量公式。比对实验表明测量系统的不确定度达到  $5.6 \times 10^{-6}$ 。该测量系统可应用于空气折射率修正、环境监测、空气检测等领域,还可为更高精度的空气折射率测量仪提供足够精确的初值,具有较好的应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Qianghua, Yan Juqun, Liu Zhongyao *et al.*. Air refractometer with dual vacuum chambers based on the method of equivalent synthetic wave[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, **25**(3): 203~206  
陈强华, 闫聚群, 柳忠尧 等. 基于等效合成波方法的双真空管空气折射率测量仪[J]. *计量学报*, 2004, **25**(3): 203~206
- 2 B. Edlen. The refractive index of air[J]. *Metrologia*, 1966, **2**(2): 71~80
- 3 M. Kaoru, O. Hidekazu, N. Hideyuki *et al.*. Two-wavelength laser interferometer system which reduces the uncertainty caused by the fluctuation of the refractive index of air[J]. *Int. J. Automat. Technol.*, 2011, **5**(2): 126~131
- 4 M. Ishige, M. Aketagawa, T. B. Quoc *et al.*. Measurement of

- air-refractive-index fluctuation from frequency change using a phase modulation homodyne interferometer and external cavity laser diode[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2009, **20**(8): 084019
- 5 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
- 6 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
- 7 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*, 2011, **160**(1): 181~188
- 8 Leong Haisheng, Guo Junpeng. Surface plasmon resonance in superperiodic metal nanoslits[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(24): 4764~4766
- 9 Pelossof 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]. *Anal. Chem.*, 2012, **84**(8): 3703~3709
- 10 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结构优化设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2164~2169
- 11 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
- 12 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
- 13 Liu Zhigang, Huang Haizhen, Yuan Ping *et al.*. 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, 袁萍等. 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
- 14 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
- 15 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
- 16 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
- 17 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
- 18 E. Kretschmann, H. Raether. Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light [J]. *Zeitschrift fur Naturforschung A*, 1968, **23**(12): 2135~2136
- 19 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
- 20 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
- 21 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
- 22 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
- 23 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
- 24 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*, 2003, **91**(13): 133~137
- 25 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**(1-3): 187~191
- 26 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
- 27 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
- 28 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
- 29 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
- 30 Wang Yuandong, Ma Xiaohong, Zhao Huafeng. SPR sensor based 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]. 光子学报, 2009, **20**(10): 1298~1301
- 31 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
- 32 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
- 33 Chen Qianghua, Luo Huifu, Wang Sumei *et al.*. Gas refractive index measurement system based on a surface plasmon resonance sensor with self-adaptive structure for angle shift and phase detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(12): 1212003
- 陈强华, 罗会甫, 王素梅等. 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[J]. 光学学报, 2012, **32**(12): 1212003
- 34 Chen Qianghua, Lin Dejiao, Wu Jian *et al.*. Straightness/coaxiality measurement system with transverse Zeeman dual-frequency laser [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2005, **16**(10): 2030~2037