

基于光谱干涉技术的玻璃厚度及折射率测量方法

赵媛媛¹, 肖作江¹, 梁旭²

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130000;
2. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要: 基于光谱干涉技术提出了一种能够同时测量玻璃厚度及折射率的方法, 该方法利用迈克尔逊光路, 通过傅里叶变换算法对光谱仪接收的干涉信号进行解算, 获取光谱干涉条纹的调制周期, 根据待测玻璃样品放入测量臂前后, 测量臂与参考臂所形成的光程差即可求出玻璃样品的几何厚度和折射率。该方法无需机械扫描延迟线并采用改进的傅里叶域下的相位提取算法, 提高了测量系统抗干扰能力, 探测速度快。实验结果表明: 对玻璃样品的厚度测量精度优于 $\pm 1 \mu\text{m}$, 折射率测量精度 $\pm 5 \times 10^{-4}$ 。
关键词: 光谱干涉; 傅里叶变换; 玻璃厚度; 折射率

中图分类号: TP394.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0213004

Measurement method of glass thickness and refractive index based on spectral interference technology

Zhao Yuanyuan¹, Xiao Zuojiang¹, Liang Xu²

(1. College of Optical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China;
2. College of Precision Instruments and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Based on spectral interference technique, a method for simultaneously measuring the thickness and refractive index of a glass was proposed. This method used the Michelson optical path to solve the interference signal received by the spectrometer through a Fourier transform algorithm to obtain the modulation period of the spectral interference fringe. The modulation period was determined according to the optical path difference formed between the measuring arm and the reference arm before and after the glass sample to be tested was placed in the measuring arm, and the geometric thickness and refractive index of the glass sample can be obtained. The method did not need mechanical scanning delay line and adopted the improved phase extraction algorithm in the Fourier domain, which improved the anti-interference ability of the measurement system and the detection speed was fast. The experimental results show that the thickness measurement accuracy of the glass sample is better than $\pm 1 \mu\text{m}$, and the refractive index measurement accuracy is $\pm 5 \times 10^{-4}$.

Key words: spectral interference; Fourier transform; glass thickness; refractive index

收稿日期: 2019-10-05; 修订日期: 2019-11-25

基金项目: 吉林省重点研发项目(20180201025GX)

作者简介: 赵媛媛(1994-), 女, 硕士生, 主要从事光电检测技术方面的研究。Email: 1792166418@qq.com

导师简介: 肖作江(1973-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事红外技术、军用光电侦察设备设计方面的研究。Email: xiao2706@126.com

0 引言

在高精密光学系统中玻璃镜片的厚度与折射率是影响光学系统成像质量的关键因素之一。目前对于玻璃厚度的检测方法大致分为接触式测量法和非接触式测量法；接触式测量法在测量过程中需要接触探头与被测玻璃表面接触，该方法极容易划伤玻璃膜层及抛光的玻璃表面^[1-3]对玻璃样品造成损坏；非接触式测量大致分为：图像处理法^[4-5]、差动共焦法^[6-7]及干涉法^[8-10]等；图像处理法测量结构简单，但测量精度较低，且需要高灵敏度 CCD。差动共焦法在测量过程中需要反复寻找聚焦光斑的位置并精确对准，测量繁琐周期长；光学干涉方法目前都是基于时域低相干测量技术，测量前需已知被测样品的介质折射率且需机械扫描机构进行光程的实时匹配，测量时间长，系统复杂^[11-13]。针对这些问题及测量缺陷，文中提出了一种能够同时检测玻璃厚度及折射率的方法，该方法采用傅里叶变换获取光谱干涉条纹的相位信息，通过测量解卷相位相对于光频的斜率解算出光学距离，从而获得玻璃厚度及折射率。该测量方法在不损坏待测玻璃的同时简化了测量系统的复杂程度，无需任何机械部件移动便可实现玻璃厚度及折射率的测量。

1 原理

1.1 测量原理

如图 1 所示，当宽谱光源射入迈克尔逊光路由

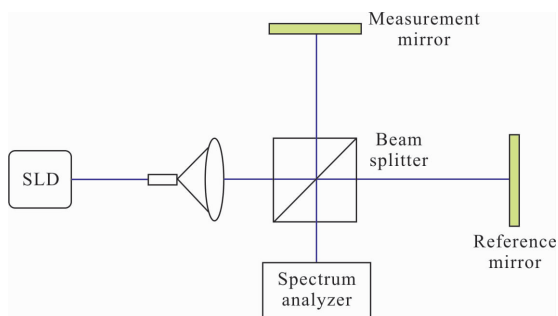


图 1 迈克尔逊光谱干涉原理图

Fig.1 Schematic of the Michelson spectral interference

光谱仪接收光谱干涉图样，其强度分布为：

$$I(f, L) = I_0(f) \cdot \left\{ 1 + \cos \left(2\pi \cdot \frac{2nL}{c} f \right) \right\} \quad (1)$$

式中： f 为光的频率； $I_0(f)$ 为光源的光谱强度分布； L 为测量臂和参考臂的几何距离差值； c 为光在真空中的速度； n 为空气折射率。对于一固定的 $L, I(f, L)$ 为一受 $I_0(f)$ 调制的余弦曲线，其频率周期为 $\alpha = 2n(f) \cdot L/c$ 。首先将公式(1)进行傅里叶变换得：

$$i(\tau) = FT\{I(f)\} = i_0(\tau) \times \left[\frac{1}{2} \delta(\tau + \alpha) + \delta(\tau) + \frac{1}{2} \delta(\tau - \alpha) \right] \quad (2)$$

式中： $\delta(\tau)$ 为狄拉克函数； τ 为两臂的延时， $i_0(\tau)$ 为 $I_0(f)$ 的傅里叶变换，因 $I(f)$ 本身为一实函数，经傅里叶变化后变为关于 $\tau=0$ 对称的3个干涉峰，为确定峰值位置，利用特定宽度的矩形窗截取干涉峰，经傅里叶逆变换为：

$$I'(f) = FT^{-1} \left\{ i_0(\tau) \times \frac{1}{2} \delta(\tau - \alpha) \right\} = \frac{1}{2} I_0(f) \exp(i\varphi(f)) \quad (3)$$

$i = \sqrt{-1}$ ，通过反正切函数获得相位 $\varphi(f)$ ：

$$\varphi(f) = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(I'(f))}{\text{Re}(I'(f))} \right] \quad (4)$$

因 $\varphi(f)$ 是以 π 为周期的卷裹相位，因此需通过解卷相位求得光频与相位之间的函数关系， $N = n + (dn/df)f$ ，为空气的群折射率。通过最小二乘拟合确定相频曲线的斜率便可得到几何距离 L ^[14-16]：

$$L = \frac{c}{4\pi N} \cdot \frac{d\varphi}{df} \quad (5)$$

1.2 测量方法

图 2 所示为同时测量玻璃厚度和折射率系统的光学原理示意图，文中采用经典的迈克尔逊干涉仪架构，利用中心波长为 1 550 nm，带宽为 90 nm 的超辐射发光二极管作为光源(THORLAB, SLD1550S-A2)；准直镜将光隔离器(ISO)的出射光束准直为直径为 2 mm 的极细光束，经分束器(BS)分束后，光束分别被参考反射镜(M1)和测量反射镜(M2)反射，并再次在分束镜处合束后发生干涉，由准直镜 2 耦合、单模光纤传导引入光谱仪(OSA)(AQ6370C, Yokogawa)进行采样，记录光谱干涉图样。

未放入待测样品之前(红色光线 1)参考臂与测量臂之间的光程差为：

$$L_1 = L_B + T + L_C - L_A \quad (6)$$

待测玻璃的光学厚度为：

$$L_2 = N \cdot T \quad (7)$$

将待测样品放入测量臂后(蓝色光线 2)，两臂的

光程差为:

$$L_3=L_B+NT+L_C-L_A \quad (8)$$

式中: L_A 为到达参考反射镜 M1 的光程; L_B 为到达待测玻璃样品表面的光程; T 为样品的几何厚度; L_C 为样品后表面到测量反射镜 M2 的光程; N 为待测样品的折射率。

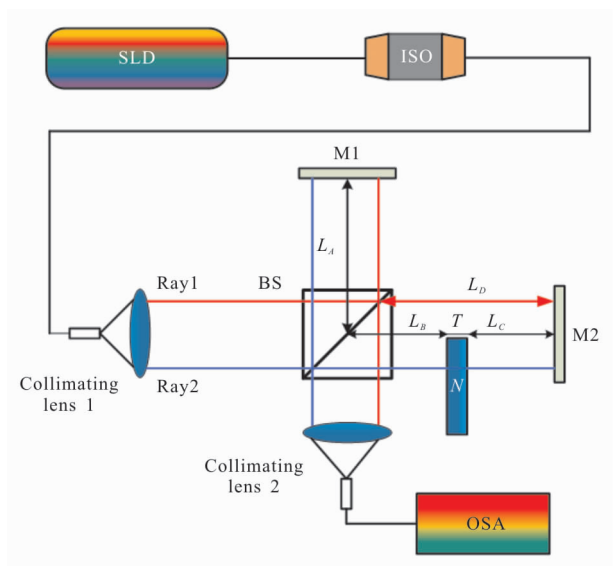


图 2 基于光谱干涉同时测量玻璃厚度和折射率的实验光路图

Fig.2 Experimental optical path diagram for simultaneous measurement of glass thickness and refractive index based on spectral interference

通过三路光程差 L_1, L_2, L_3 即可确定待测玻璃的厚度和折射率为:

$$T=L_2-(L_3-L_1) \quad (9)$$

$$N=L_2/T \quad (10)$$

2 实验

图 3 所示为该实验所用的光源的光谱图,其波长范围为 1 480~1 630 nm, 为了能够全部接受光源光谱, 将光谱仪波长采样范围设置为 1 470~1 670 nm^[17]。通常情况下光谱仪以等波长间隔进行采样,为在频域下进行有效的傅里叶变换,需要将光谱仪采集到干涉图样的横坐标从波长变为频率;由于波长与光频的相对光速成反比例关系,横坐标从波长变换为频率后,采样间隔将变得不均匀,当被测玻璃厚度逐渐增大时,傅里叶域下对应的干涉峰将会拓宽,这将严重影响相位解算精度,因此文中选择通过线性插值的方法来对频域下的干涉图样进行重采

样,从而保证采样的均匀性。

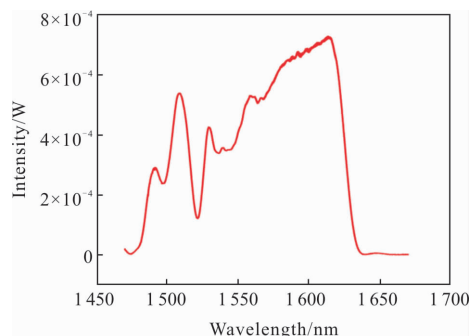
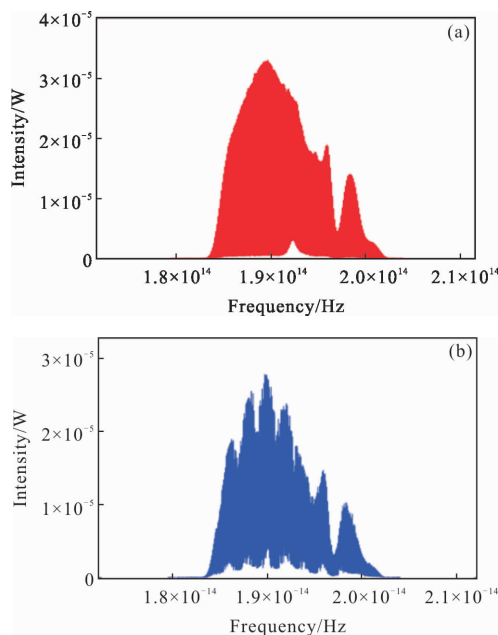


图 3 光源的光谱

Fig.3 Spectrum of the light source

将插值后的干涉光谱添加高斯窗,获得干涉峰的峰值点,以干涉峰为中心左右对称的选取 5 个采样点组成矩形窗来截取干涉峰,将其余采样点置零后进行后续的傅里叶变换来提取相位差,经线性插值和 Gaussian 加窗后干涉峰变得十分锐利,可有效提高测量系统对环境因素的抗干扰能力。

在温度为 18.5 °C, 99.84 kPa 和相对湿度为 35.7%RH 下,通过 Ciddor 公式计算其空气折射率为 1.000 266 9 的环境下进行实验,图 4(a)、(b)分别为玻璃样品插入测量臂前后光谱仪接收的光谱干涉图样;图 4(c)、(d)为其经过傅里叶变换后得到的干涉图样。当玻璃放入测量光路中时,系统中的四束反射光两两之间发生干涉(玻璃前表面、玻璃后面、测量镜及参考镜的反射光),并在傅里叶域下产生多个“无关”的干涉峰。为了更直观地获取 L_2, L_3 对应的干



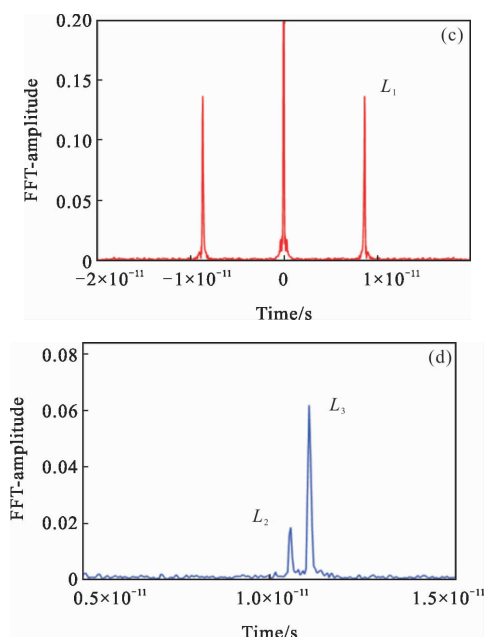


图 4 L_1 、 L_2 、 L_3 所对应的光谱干涉图样及傅里叶域下图样

Fig.4 Spectral interference pattern corresponding to L_1 , L_2 , L_3 and the pattern under the Fourier domain

涉峰,在被测玻璃未放入测量臂中时,调整测量臂和参考臂中两反射镜的位置,如图 2 所示;保证两反射镜到分束镜的距离大于光谱仪最大探测距离的 2 倍,即 $L_A > 2L_{max}$, $L_D > 2L_{max}$ (L_{max} 为光谱仪最大探测范围)。当待测玻璃插入测量臂时,保证玻璃前表面到分束镜和玻璃后表面到测量镜的距离大于最大探测距离,即 $L_B > L_{max}$, $L_C > L_{max}$ 。从而滤除“无关”的干涉峰,保证光谱仪接受的干涉图样仅为玻璃前后表面反射光及测量镜 M2 和参考镜 M1 反射光产生的。如图 4(d)所示,傅里叶域下正半轴的干涉峰数目减小至 2 个,极大地简化了干涉峰的提取步骤。

图 5 为三路光程差 L_1 、 L_2 、 L_3 解卷相位后最小二

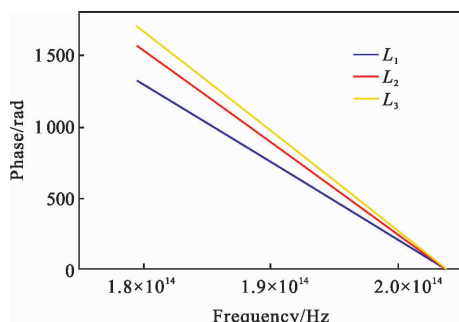


图 5 三路光程差所对应的相频曲线

Fig.5 Phase-frequency curve corresponding to the three-path optical path difference

乘拟合的相频曲线,斜率越大,两臂光程差越大,将相频曲线的斜率值代入公式(5)并结合公式(6)、(7)即可得到待测玻璃的几何厚度和折射率。

该实验所使用的玻璃样本为 CAF2(Thorlabs WG50530)和 N-BK7(Thorlabs WG11010),由标准玻璃库可知其折射率分别为 1.433 849 和 1.536 48。表 1、表 2 分别表示了文中测量方法所测出的两玻璃的测量结果。

表 1 玻璃 CAF2 的测量结果

Tab.1 Measurement results of glass CAF2

No.	$L_1/\mu\text{m}$	$L_2/\mu\text{m}$	$L_3/\mu\text{m}$	$T/\mu\text{m}$	N
1	1 200.89	4 301.95	2 502.25	3 000.59	1.433 701
2	1 200.16	4 301.39	2 502.49	2 999.06	1.434 246
3	1 200.56	4 301.88	2 502.11	3 000.33	1.433 802
4	1 200.97	4 302.05	2 502.01	3 001.01	1.433 534
5	1 200.75	4 301.38	2 502.05	3 000.08	1.433 755
6	1 200.24	4 301.79	2 501.88	3 000.15	1.433 858
7	1 200.36	4 301.68	2 501.45	3 000.59	1.433 611
8	1 200.76	4 302.33	2 502.02	3 001.07	1.433 599
9	1 200.55	4 302.08	2 501.92	3 000.71	1.433 687
10	1 200.68	4 301.94	2 501.75	3 000.87	1.433 564
Mean	1 200.592	4 301.847	2 501.993	3 000.446	1.433 736
Standard deviation	0.270 752	0.299 483	0.279 486	0.592 025	0.000 208

表 2 玻璃BK7 的测量结果

Tab.2 Measurement results of glass BK7

No.	$L_1/\mu\text{m}$	$L_2/\mu\text{m}$	$L_3/\mu\text{m}$	$T/\mu\text{m}$	N
1	1 200.35	1 537.89	1 737.05	1 001.19	1.536 06
2	1 200.44	1 537.25	1 737.04	1 000.65	1.536 25
3	1 200.26	1 537.28	1 737.35	1 000.19	1.535 98
4	1 200.89	1 537.94	1 737.04	1 001.79	1.536 17
5	1 200.26	1 537.68	1 737.05	1 000.89	1.536 31
6	1 200.41	1 537.57	1 737.11	1 000.87	1.536 23
7	1 200.17	1 537.92	1 737.16	1 000.93	1.536 49
8	1 200.08	1 537.08	1 737.21	999.95	1.536 15
9	1 200.68	1 537.22	1 737.44	1 000.46	1.536 31
10	1 200.38	1 537.15	1 737.79	999.74	1.536 55
Mean	1 200.39	1 537.49	1 737.22	1 000.67	1.536 25
Standard deviation	0.24	0.34	0.24	0.61	0.000 2

表 1、2 为使用文中方法测得两标准玻璃样品的实验结果,在玻璃样品插入测量臂前后分别快速测量 10 次,测得折射率的平均值分别为 1.433 736 和 1.536 25,标准差分别为 0.000 208 和 0.000 2,其精度优于 $\pm 5 \times 10^{-4}$ 。测量厚度的平均值和分别为 3 000.446 和 1 000.67 μm 。标准偏差分别为 0.59 μm 和 0.61 μm ,其测量精度优于 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。

为了验证该方法的测量结果,通过使用蔡司三坐标测量机 (Coordinate Measuring Machine, ZEISS PRISMO) 分别测量 10 次相同玻璃样品的中心厚度,该测量机测量范围可达 1 600 mm,测量精度可达 0.5 μm 。根据连续 10 次的测量结果,玻璃样品的平均厚度分别为 3 000.17 μm 和 1 000.61 μm ,图 6 显示了玻璃样品在两种测量方法下的厚度及其标准偏差的对比测量结果。

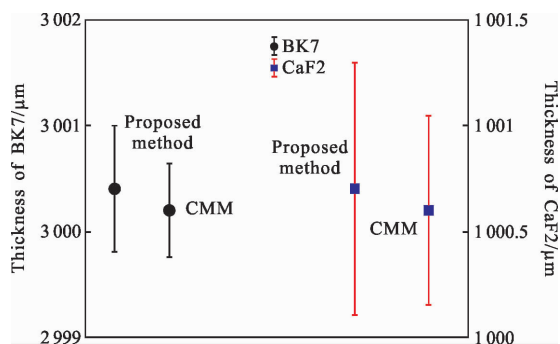


图 6 两玻璃样本的厚度测量值及标准差对比测量结果

Fig.6 Comparison of thickness measurement and standard deviation of two glass samples

图 6 的实验数据表明,该系统的测量精度与高精度 CMM 相比具有较好的一致性。

该实验所使用的光源为宽带光源,公式(6)中, L_2 与 L_3 相减会消去色散对测量玻璃厚度 T 的影响。透镜厚度及折射率的测量精度主要由 FFT 算法的精度、光谱仪本身波长的读取精度和空气折射率的不确定度来决定。文中通过数学仿真来验证 FFT 的算法精度,在 matlab 仿真实验中,保证仿真与实际实验光谱仪同样的采样间隔和采样点数,在 0.2~2 mm 距离差的范围内(覆盖 L_1 、 L_2 、 L_3)以 0.2 mm 为步长,评价 FFT 算法的精度,如图 7 所示,仿真结果显示相位差计算精度约为 1×10^{-5} 。

光谱仪中光栅本身的制造误差以及光栅与探测

器之间的对准误差将影响光频读取精度,由光谱仪厂商的技术指标得知光谱仪波长的读取精度为 0.01 nm,SLD 光源的中心波长为 1 550 nm 则相对精度约为;本实验搭建的是几乎等臂的迈克尔逊干涉光路,因测量环境比较稳定、两路光程差又比较小,基于 Ciddor 公式本身的测量不确定度为 $L \times 10^{-7}$,引入的测量误差可忽略不计。

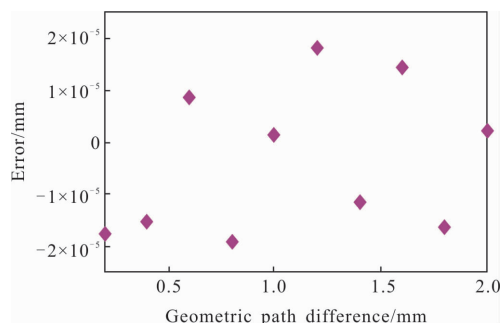


图 7 FFT 算法精度仿真图

Fig.7 Simulation diagram of FFT algorithm accuracy

3 结论

文中提出一种基于光谱干涉可同时测量玻璃厚度和折射率的方法,利用傅里叶变换算法提取参与光谱干涉两臂的相位差,由相位与光频的斜率可求得两臂光程差,不需要任何机械扫描装置,可同时测量玻璃的几何厚度和群折射率,优化了测量光路,简化了各干涉峰的提取,通过对提取干涉峰的算法的改进,提高了系统的抗干扰能力。实验及误差分析表明,该系统对厚度的测量精度优于 $\pm 1 \mu\text{m}$,对折射率测量精度优于 $\pm 5 \times 10^{-4}$ 。

参考文献:

- [1] Shi Zhonghua, Yang Baoxi, Wei Zhangfan, et al. Research progress in optical mirror spacing measurement technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(4): 1-6. (in Chinese)
- [2] Lu Yi, Xu Xiping, Shi Nuo, et al. Research on measurement method and device of lens center thickness [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2013, 36(3): 28-31. (in Chinese)
- [3] Song Qiang, Yang Baoxi, Yuan Qiao. Research on detection method of large diameter convex aspherical surface shape [J].

- Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41 (4): 0408003. (in Chinese)
- [4] Li Yanfeng, Li Xiuyu, Yang Liu. A fast glass refractive index measurement method based on machine vision[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(11): 138–144. (in Chinese)
- [5] Xiong Fen, Hu Zhong, Jiang Mingda. High-precision non-contact measurement of refractive index based on parallel plates[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(1): 148–152. (in Chinese)
- [6] Qiao Yang, Zhang Ning, Xu Xiping, et al. Design of lens thickness measurement system based on confocal method[J]. *Journal of Instrument and Instrument Technology*, 2011, 32 (7): 1635–1641. (in Chinese)
- [7] Shi Libo, Qiu Lirong, Wang Yun, et al. Development of laser thickness confocal lens center thickness measurement system [J]. *Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(3): 683–688. (in Chinese)
- [8] Xue Hui. Measurement method of physical thickness of optical film based on white light interference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1877–1880. (in Chinese)
- [9] Wang Zhibin, Shi Guohua, He Yi, et al. Application of optical coherence tomography in optical surface spacing measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20 (7): 1469–1474. (in Chinese)
- [10] Galli M, Marabelli F, Guizzetti G. Direct measurement of refractive-index dispersion of transparent media by white-light interferometry[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(10): 3910–3914.
- [11] Hee Joo Choi, Hwan Hong Lim, Han Seb Moon, et al. Measurement of refractive index and thickness of transparent plate by dual-wavelength interference [J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 9429–9434.
- [12] Jin Chaoqun, Yang Baoxi, Hu Xiaobang, et al. Measurement method of low-coherence light interference high-precision lens center thickness [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0604002. (in Chinese)
- [13] Liu Fuguo, Zha Xuejun, Yang Bo, et al. Research on lens center thickness measurement method based on fiber low coherence interference technique[J]. *Applied Laser*, 2016, 36 (5): 605–610. (in Chinese)
- [14] Balling P, Mašika P, Kien P, et al. Length and refractive index measurement by Fourier transform interferometry and frequency comb spectroscopy [J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(7): 12–15.
- [15] Bae J, Park J, Ahn H, et al. Total physical thickness measurement of a multi-layered wafer using a spectral-domain interferometer with an optical comb[J]. *Opt Express*, 2017, 25(6): 12689–12697.
- [16] Arosa Y, Lago E L, Fuente R de la. Refractive index measurements in absorbing media with white light spectral interferometry[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 7578–7586.
- [17] Maeng S, Park J, Jin J. Uncertainty improvement of geometrical thickness and refractive index measurement of a silicon wafer using a femtosecond pulse laser [J]. *Opt Express*, 2012, 20(13): 12184–12190.