

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107927

基于光纤激光频率分裂效应的折射率/厚度 双参量测量研究*

陈 恺^{1,2}, 祝连庆^{1,2}, 刘昭君², 鹿利单², 庄 炜²

(1. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 合肥 230009;
2. 北京信息科技大学光电测试技术及仪器实验室 北京 100192)

摘要: 折射率作为光学系统中应用最广泛的光学参数之一,对系统的光学性能具有极其重要的影响。厚度与折射率所组成的光学长度直接影响双折射器件在光学系统中的时延特性。本文提出一种基于光纤激光频率分裂效应的折射率/厚度双参量测量方法。该系统通过对插入激光腔内的双折射器件进行旋转,利用频率分裂效应对不同角度的器件的双折射参数进行测量。基于双折射器件中的折射率椭球,建立相位延迟、折射率、厚度和旋转角度之间的关系,通过拟合计算得到器件的折射率/厚度参数。实验结果表明,通过该系统对双折射元件的厚度测量误差为 210 nm,本征折射率进行测量误差为 10^{-5} ,可广泛应用于红外波段的双折射器件的本征折射率/厚度双参量测量。

关键词: 光纤激光;频率分裂;折射率;厚度;双参数测量

中图分类号: TH744 O439 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.20

Measurement of refractive index and thickness based on the fiber laser frequency splitting effect

Chen Kai^{1,2}, Zhu Lianqing^{1,2}, Liu Zhaojun², Lu Lidan², Zhuang Wei²

(1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Refractive index is the most widely used optical parameter in the optical system, which has an extremely important influence on the optical performance. The optical length consists of refractive index and thickness, which directly affects the time delay characteristics of birefringent devices in the optical system. In this article, a measurement method of refractive index and thickness based on the fiber laser frequency splitting effect is proposed. By rotating the birefringent device inserted into the laser cavity, the birefringent parameters of the device at different angles are measured by using the frequency splitting effect. Based on the refractive index ellipsoid of birefringent device, the relationship among phase delay, refractive index, thickness and rotation angle is established. The refractive index and thickness parameters of the device are achieved by fitting calculation. Experimental results show that the thickness measurement error of birefringent elements is 210 nm, and the intrinsic refractive index measurement error is 10^{-5} . It could be widely used in the measurement of intrinsic refractive index and thickness of birefringent elements in the infrared band.

Keywords: fiber laser; frequency splitting; refractive index; thickness; two parameter measurement

0 引 言

双折射器件作为精密光学系统的核心组成部分之

一,在偏振态转化^[1]、偏振保持^[2]及偏振调控^[3]等过程中起着关键作用。以双折射光学器件为核心的精密光学系统已经被广泛应用于天文观测^[4]、生物检测^[5]、激光产生^[6]以及航空航天^[7]等多个新兴领域。而光学材料的折

收稿日期:2020-05-14 Received Date: 2020-05-14

* 基金项目:高等学校学科创新引智计划(D17021)、国家自然科学基金(61903042)项目资助

射率是反映材料的本征特性的重要参数。厚度与折射率所组成的光学长度直接影响双折射器件在光学系统中的时延特性。因此,对双折射器件厚度与折射率的高精度测量需求日益增多。

为避免对精密光学系统内双折射器件抛光表面及镀膜破坏,非接触的测量方法成为主流。常见的非接触厚度/折射率测量方法有:最小偏向角法、V棱镜法、椭圆偏振法、数字全息法、白光干涉法及激光外腔回馈法等。其中,最小偏向角法^[8]与V棱镜法^[9]具有较高的测量精度,但需要大型测角仪器且其样品处理复杂且成本高昂。椭圆偏振法^[10-12]具有较大的光谱测量范围,但设备体积大、测量环境要求高,且测量需要配合数值建模,无法直接得到被测膜系的折射率与厚度。数字全息法^[13-15]可以重建出层析折射率分布,但对于电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)有较强的依赖。白光干涉法^[16-18]亦可以在宽光谱范围内获得折射率参数,但其测量准确性很大程度上取决于样品的厚度。激光外腔回馈法^[19-20]折射率测量精度高,但对回馈光功率敏感,因此对材料透射率有特定的要求。

随着对激光器腔内机理的研究深入,腔内双折射对激光纵模分裂现象影响的研究得到了越来越多的关注。2012年,Liu等^[21]首次提出基于He-Ne激光器的频率分裂现象的双折射测量系统。2019年,本课题组将频率分裂双折射测量方法引入光纤激光系统^[22]。双折射参数测量中包含着双折射器件的本征折射率/厚度信息。因此,本文提出了一种基于光纤激光频率分裂效应的厚度/折射率双参量测量系统。该系统通过对插入激光腔内的双折射器件进行旋转,利用频率分裂效应对不同角度的器件的双折射参数进行测量。基于双折射器件中的折射率椭圆,建立相位延迟、折射率、厚度和旋转角度之间的关系,通过拟合计算得到器件的折射率/厚度参数。本文提出的测量系统对于双折射器件的表面无接触、无破坏性,对双折射器件的在线、在役的厚度/折射率测量具有重要的意义。

1 折射率/厚度双参量测量机理

1.1 光纤激光频率分裂双折射测量机理

测量所用光纤激光器为腔长较长的分布式布拉格反射(distributed Bragg reflector, DBR)结构,为多纵模激光器。多纵模激光器中具有若干纵模同时激发,首先选取分析最接近中心波长 λ_c 的纵模,规定该纵模为第 m 级纵模。

将器件插入谐振腔,当激光第 m 级纵模穿过插入器件时,其偏振态若平行于器件的 o 光与 e 光方向,则分别以 o, e 表达,则可表示为:

$$\nu_o = \nu_1 = m_1 \frac{c}{2L - \delta_o} = m_1 \frac{c}{2L_o} = m\Delta_o \quad (1)$$

$$\nu_e = \nu_2 = m_2 \frac{c}{2L + \delta_e} = m_2 \frac{c}{2L_e} = (m+n)\Delta_e \quad (2)$$

其中, $m_1 = m, m_2 = m+n$ 为纵模序数, n 为两纵模序数之差,该部分表示器件双折射超过 π 的整数倍周期; $L_o = L - \delta_o/2, L_e = L + \delta_e/2$ 分别为 o, e 光偏振方向上的物理腔长, Δ_o, Δ_e 为纵模间隔。由此可知,激光输出的频率之差为:

$$\Delta\nu = \nu_o - \nu_e = -n\Delta_e + \frac{2}{c}\nu_o\Delta_e(L_e - L_o) \quad (3)$$

$$\frac{\Delta\nu}{\Delta_e} = -n + \frac{2}{\lambda_o}(L_e - L_o) = -n + \frac{\delta_e - \delta_o}{\lambda_o} \quad (4)$$

多纵模激光器在测量时,除了同级频率分裂纵模会产生拍频,也会跟相邻级次的纵模产生拍频。因此,推导出与 $m-1$ 级纵模的频差为:

$$\nu'_o = (m-1) \frac{c}{2L'_o} = (m-1)\Delta'_o \quad (5)$$

$$\nu'_e = \nu_e = (m+n) \frac{c}{2L_e} = (m+n)\Delta_e$$

其中, L'_o 为对应 $m-1$ 级纵模的 o 光偏振方向上的物理腔长, Δ'_o 为此波长下的等效纵模间隔。此时的拍频分量满足以下关系:

$$\frac{\Delta\nu'}{\Delta_e} = (n+1) - \frac{\delta_e + \delta'_o}{\lambda'_o} \quad (6)$$

联立式(4)与(6),则得到插入器件的实际相位差:

$$\phi_0 = \frac{2\delta_e \left(1 + \frac{\delta_o + \delta_e}{\lambda_o} - \frac{\delta'_o + \delta_e}{\lambda'_o} \right)}{(n+1) \frac{\delta_o + \delta_e}{\lambda_o} - n \frac{\delta'_o + \delta_e}{\lambda'_o}} \left(\frac{\Delta\nu}{\Delta_e} \frac{\Delta\nu'}{\Delta_e} \pi + n\pi \right) \quad (7)$$

在光纤多纵模激光器中,激光器纵模间的频率间隔较小,通常在几十到几百兆左右。因此 $d\lambda/d \approx 5 \times 10^{-7}$,因此 $\lambda_o \approx \lambda'_o$,此时材料折射率变化非常小,色散可以忽略。由此可知, $\delta_o \approx \delta'_o \approx \delta_e \approx \delta'_e$,此时式(7)可被近似简化为:

$$\phi_0 = \frac{\lambda_o}{\lambda_c} \left(\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu + \Delta\nu'} \pi + n\pi \right) \quad (8)$$

其中, λ_o 为最接近 λ_c 的 m 级纵模的波长,多纵模激光器中亦存在若干同时激发的纵模,它们对称的出现在中心波长 λ_c 两侧。实际测量中,最终得到的相位差,为所有纵模同时发挥作用的结果,因此将上式累加后得到:

$$\phi_0 = \frac{\lambda_c + \sum_{-N}^N n\Delta}{\lambda_c} \left(\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu + \Delta\nu'} \pi + n\pi \right) = \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu + \Delta\nu'} \pi + n\pi, N = 0, 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

其中测量只关心小数部分,因此:

$$\phi_0 = \frac{\Delta\nu}{\Delta} \pi \quad (10)$$

1.2 光纤激光频率分裂折射率/厚度测量机理

双折射器件具有垂直于光轴且相互正交分布的折射率分布,该现象被称作材料的折射率椭球。激光光束沿光轴方向入射进入样品,当样品沿垂直于光轴平面内任意方向旋转时,激光方向与光轴方向产生夹角,进而引起出射光在正交偏振方向上的相位差发生改变。为方便计算,将平面内任意方向旋转分解为沿折射率分布中正交的快轴与慢轴旋转,并据此对出射激光相位延时与旋转夹角之间的关系进行分析。

当材料旋转一定角度后,激光穿过材料光路如图 1 所示。由晶体光学知,当样品沿其快轴旋转时,穿过其激光的 e 光折射率改变;当样品沿其慢轴旋转时,其折射率均不发生变化。同时,无论沿何方向发生旋转时,激光穿过样品所走的路径几何长度均发生改变。

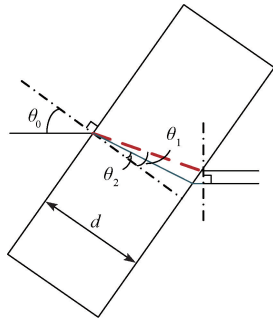


图 1 旋转双折射器件后光路图

Fig. 1 Optical path diagram after birefringent device rotation

图 1 中所示虚线路径表示 o 光光路,实线路径表示 e 光光路,因此所产生的相位延迟的变化量可表示为:

$$\Delta\delta = \frac{2\pi d}{\lambda} \left[\left(\frac{n_2}{\cos\theta_2} - \frac{n_1}{\cos\theta_1} \right) + (\tan\theta_1 - \tan\theta_2) \sin\theta \right] + \delta_0 \quad (11)$$

其中, δ_0 为沿光轴入射样品时激光正交偏振方向产生的相位延迟量; $\Delta\delta$ 为该相位延迟量在旋转过程中产生的变化量; d 为厚度; θ 为样品测量过程中的旋转角; θ_1 、 θ_2 分别对应激光 o 光与 e 光在进入样品时的折射角, n_1 、 n_2 分别对应旋转后样品 o 光与 e 光的折射率。经推导,当样品分别沿快轴和慢轴旋转后,其折射率 n_1 、 n_2 可被如式(12)和(13)表示。

$$\begin{cases} n_1 = n_o \\ n_2 = \frac{\sqrt{n_o^2 n_e^2 + (n_o^2 - n_e^2) \sin^2\theta}}{n_o} \end{cases} \quad (12)$$

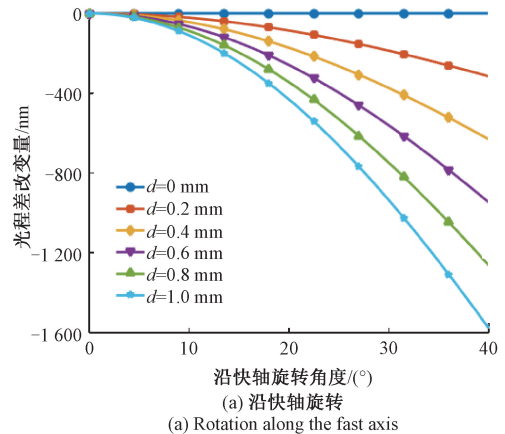
$$\begin{cases} n_1 = n_o \\ n_2 = n_e \end{cases} \quad (13)$$

通过斯涅尔公式,将式(12)与(13)带入式(11),可得到样品沿折射率分布中正交的快轴和慢轴旋转时出射激光相位延迟与样品旋转角之间的关系,如式(14)和(15)所示。

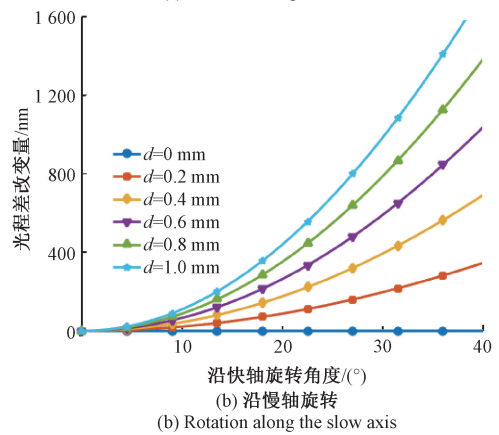
$$\delta = \frac{2\pi d \sqrt{n_o^2 - \sin^2(\theta_0 + \Delta\theta)}}{\lambda} \left(\frac{n_e}{n_o} - 1 \right) - 2\pi \times N \quad (14)$$

$$\delta = \frac{2\pi d (\sqrt{n_e^2 - \sin^2(\theta_0 + \Delta\theta)} - \sqrt{n_o^2 - \sin^2(\theta_0 + \Delta\theta)})}{\lambda} - 2\pi \times N \quad (15)$$

其中, θ_0 为双折射材料与激光光轴的初始角度, $\Delta\theta$ 为旋转的角度。 N 为级数,相位延迟等于 2π 或 360° 的部分为 1 级, N 表示产生的相位延时的整数部分有几级。式(14)和(15)是折射率和厚度测量的原理公式。图 2 为分别沿快轴与慢轴旋转时,相位延时变化量与转角的关系。



(a) 沿快轴旋转
(a) Rotation along the fast axis



(b) 沿慢轴旋转
(b) Rotation along the slow axis

图 2 光程差随角度变化仿真

Fig. 2 Simulation of optical path difference changing with angle

由图2可以看出,当沿快轴旋转,随着旋转角度增大,相位延时量逐渐减小;当沿慢轴旋转时,随旋转角度增大,相位延时量逐渐增大。且都随旋转角度增大,其变化斜率逐渐增大。

从式(14)与(15)中可知,除待测参数:相位延迟与厚度,还有 n_o 、 n_e 、 d 、 θ_0 和 N 5个物理量未知。通过多次改变转角,并将数据进行拟合后,可求解得到样品的 o 光折射率 n_o 、 e 光折射率 n_e 、厚度 d 、初始角度 θ_0 和级数 N 5个物理量。

2 光纤激光频率分裂折射率/厚度测量系统

图3所示为光纤激光频率分裂折射率/厚度测量系统结构。其由1 m掺铒光纤,一个980/1550波分复用器(wavelength division multiplexing, WDM),一个光纤光栅(fiber Bragg grating, FBG),一个光纤准直器和一个介质膜反射镜(high reflection, HR)组成,全腔长度约为2.2 m。该激光器由带单模尾纤输出的976 nm的半导体激光器(laser diode, LD)进行泵浦。所用的掺铒光纤(Nuferm公司,EDFL-980-HP)在976 nm处的吸收系数约为17.5 dB/m。本文所用激光谐振腔为光纤半外腔,由光纤半腔与空间半外腔组成。输出镜选用透射率为10%的光纤光栅,激光由此输出后进入分辨率为0.02 nm的光谱分析仪(Yokogawa AQ6370D),对激光器的输出光谱进行测量。该光纤光栅长约22 mm,3 dB带宽约0.13 nm。光纤半腔的另一端由光纤准直器进行准直后输出,由1550 nm波长下反射率>95%的HR作为线形谐振腔另一侧的高反镜。高反镜背面抛光并镀1550 nm波段增透膜,由此透射的光保持准直。透射光由此输出先后穿过长波通滤波片将残余泵浦光滤掉,穿过偏振片将相互正交的光在偏振片光轴方向产生拍频信号,最后由InGaAs光电探测器(380 MHz)将产生的拍频信号接收,通过频谱仪显示输出。采用精密转台对插入器件的角度进行精密调节,转台精度为0.002°,量程为360°。采用相同精度的旋转调节架来将双折射元件快轴与旋转台的旋转轴对准。图4为折射率/厚度测量系统实物图。

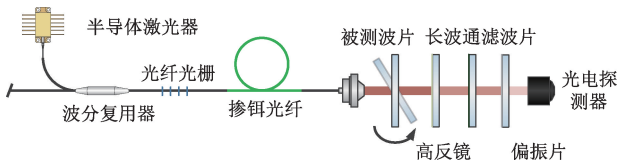


图3 光纤激光频率分裂折射率/厚度测量系统结构

Fig. 3 Structure of the measurement system of refractive index and thickness based on fiber laser frequency splitting effect

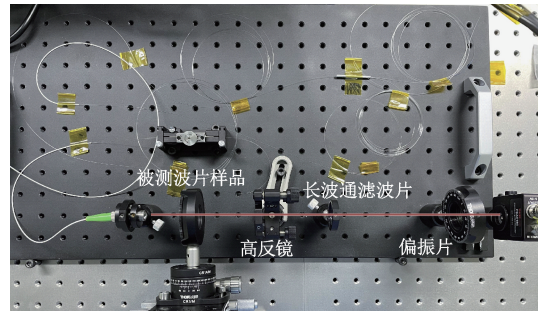
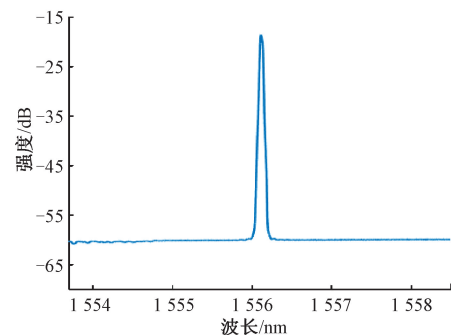


图4 光纤激光频率分裂厚度/折射率测量系统实物图

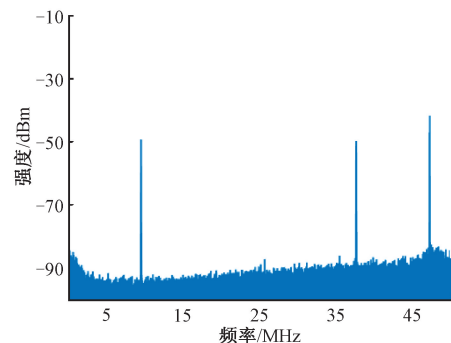
Fig. 4 The measurement system of refractive index and thickness based on fiber laser frequency splitting effect

3 折射率/厚度测量实验结果及分析

首先,对空腔的激光输出特性进行测量。逐步升高泵浦功率,令激光器激射,同步调整偏振控制器,直至得到功率稳定的激光输出,此时泵浦功率约为100 mW。激光输出波长为1556.12 nm,3 dB带宽为0.039 nm。激光器空腔光谱图如图5(a)所示。此时调整偏振片后,通过偏振控制器,得到频率分裂频谱如图5(b)所示。分析测试结果发现,激光器纵模间隔为47.20 MHz,几何腔长为2.19 m。



(a) 折射率/厚度测量频率分裂激光器光谱图
(a) Optical spectrogram of frequency split laser for refractive index and thickness measurement



(b) 折射率/厚度测量频率分裂激光器空腔频谱图
(b) Frequency spectrum of cavity frequency splitting laser for refractive index and thickness measurement

图5 激光器空腔输出特征

Fig. 5 Output characteristics of laser cavity

由空腔频率图可知,激光器因弯曲等原因,空腔内存在双折射现象,图 5(b)中 9.60 MHz 与 37.64 MHz 的频率分量分别为 $\Delta\nu_B$ 和 $\Delta-\Delta\nu_B$,但空腔中的双折射方位角的空间指向性未知。腔内存在的固有双折射在与插入双折射方位角没有对齐的情况下,叠加为非线性叠加。

本文实验选用的样品为 THORLABS 公司的多级四分之一波片@1 550 nm(型号:WPMQ10 M-1550)。在室温 25℃,空气压力为 101.84 kPa 下。将样品波片快轴通过旋转调节架与精密转台的旋转轴调节对准。通过位移台将样品波片插入激光器光路,沿波片快轴逐级旋转精密转台,每次旋转 1°,共旋转 7 次,分别取到 7 组频率分裂量与方位角变化。但插入激光器中的样品双折射方位角难以与光线激光器内部固有双折射方位角重合,其叠加为非线性叠加,根据琼斯矩阵及激光器自洽原理,其双折射合成遵循以下叠加模型:

$$\cos \phi' = \cos \phi \cos \phi'' - \sin \phi \sin \phi'' \cos [2(\psi - \psi'')] \quad (16)$$

$$\tan \psi' = \frac{\sin(\phi/2) \sin(\phi''/2) \sin[2(\psi - \psi'')] }{\cos(\phi/2) \cos(\phi''/2) - \sin(\phi/2) \sin(\phi''/2) \cos[2(\psi - \psi'')] } \quad (17)$$

其中,光纤腔内固有双折射等效为一个双折射光学元件 $V(\phi, \psi)$,其中 ϕ 表示光纤腔的相位延迟, ψ 表示其光轴的方位角,内腔中插入的双折射表示为 $V(\phi'', \psi'')$,相位延迟为 ϕ'' ,方位角为 ψ'' 。当两者光轴夹角成 θ 角度时,激光器可以等效为一个整体,其“等效双折射”的 Jones 矩阵为 $V(\phi', \psi')$, ϕ' 为等效双折射元件相位延迟量, ψ' 为等效双折射元件快轴方位角。

采用以上双折射叠加模型对该测量结果进行分解,分解出的光程差与方位角变化如图 6 所示。

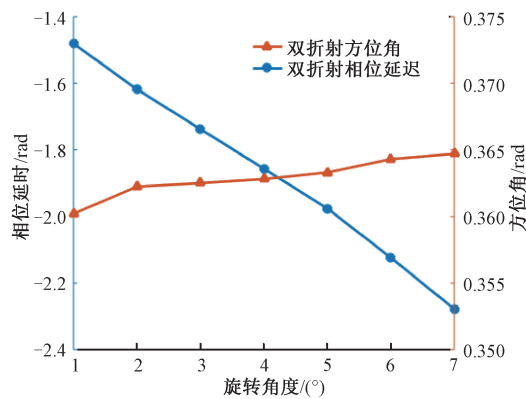


图 6 插入元件光程差与方位角随旋转角度变化

Fig. 6 Optical path difference and azimuth change with the rotation angle

沿快轴旋转过程中,相位差随角度增大而减小,与式(14)所表现趋势相同。波片快慢轴在垂直方向的投影方位角始终不变,因此双折射的方位角基本维持不变。此时将光程差与旋转角度带入式(14)中,得到以下方程组:

$$\begin{cases} \delta_1 = \frac{2\pi d \sqrt{n_o^2 - \sin^2(\theta_0 + \Delta\theta_1)}}{\lambda} \left(\frac{n_e}{n_o} - 1 \right) - 2\pi \times N \\ \delta_2 = \frac{2\pi d \sqrt{n_o^2 - \sin^2(\theta_0 + \Delta\theta_2)}}{\lambda} \left(\frac{n_e}{n_o} - 1 \right) - 2\pi \times N \\ \dots \\ \delta_7 = \frac{2\pi d \sqrt{n_o^2 - \sin^2(\theta_0 + \Delta\theta_7)}}{\lambda} \left(\frac{n_e}{n_o} - 1 \right) - 2\pi \times N \end{cases} \quad (18)$$

方程组中共有 5 个未知数分别为: n_o 、 n_e 、 d 、 θ_0 、 N ,利用最小二乘法通过以上 7 组数据对方程进行拟合后,拟合结果如图 7(a) 所示,且得到如表 1 所示拟合参数。

表 1 测量值与参考值比较

Table 1 Comparison of measurement and reference value

参数	厚度/mm	h_o	n_e	N
参考值	0.959 83	1.527 614	1.536 085	5
测量值	0.960 04	1.527 573	1.536 090	5
偏差	0.000 21	4.1×10^{-5}	0.5×10^{-5}	0

由表 1 可知,该波片的 o 光与 e 光的折射率分别为 1.527 573 与 1.536 090。而其折射率参考值分别为: 1.527 614 与 1.536 085,该参考值由如下色散公式^[23]求得:

$$\begin{aligned} n_o^2 &= 1.286\ 041\ 41 + \frac{1.070\ 440\ 83\lambda^2}{\lambda^2 - 1.005\ 859\ 97 \times 10^{-2}} + \\ &\frac{1.102\ 022\ 42\lambda^2}{\lambda^2 - 100} \\ n_e^2 &= 1.288\ 518\ 04 + \frac{1.095\ 099\ 24\lambda^2}{\lambda^2 - 1.021\ 018\ 64 \times 10^{-2}} + \\ &\frac{1.156\ 624\ 75\lambda^2}{\lambda^2 - 100} \end{aligned} \quad (19)$$

折射率测量实验值于参考值之间的误差为: 4.1×10^{-5} 与 0.5×10^{-5} 。其厚度误差为 210 nm,厚度参考值由激光干涉仪测得。

旋转角度的精确测量对保证以上测量精度具有重要意义。因此,通过误差原理对由旋转角度测量误差所引起的测量误差进行分析。

旋转角度与折射率 n_o 与 n_e 的关系符合式(14), 根据误差理论有:

$$\Delta n_o = \frac{\partial n_o}{\partial \theta} \cdot \Delta \theta \quad (20)$$

$$\Delta n_e = \frac{\partial n_e}{\partial \theta} \cdot \Delta \theta$$

其中, $\Delta \theta$ 为角度测量误差, Δn_o 与 Δn_e 为随 $\Delta \theta$ 影响所产生的折射率 n_o 与 n_e 误差。将式(14)代入得:

$$\Delta n_o = \frac{2n_o(n_e - n_o) \sin \theta \cos \theta}{n_e \sin^2 \theta - n_o^3} \cdot \Delta \theta \quad (21)$$

$$\Delta n_e = \frac{2(n_e - n_o) \sin \theta \cos \theta}{n_o^2 - \sin^2 \theta} \cdot \Delta \theta$$

将转台角度误差 $\Delta \theta = 0.02^\circ$ 与结果代入上式, 可得 $\Delta n_o = -4.6372 \times 10^{-6}$ 与 $\Delta n_e = 1.5228 \times 10^{-7}$ 。均低于所得到的折射率 n_o 与 n_e 精度一个数量级, 因此, 旋转精度满足测量需要。

图7(a)插图 of 波片旋转影响光程差的完整拟合曲线, 由图7(a)可知, 在波片样品倾斜为 0° 时, 样品在激光器波长产生的光程差为 387.6 nm, 因此, 该 1550 nm 的四分之一波片, 在 1556 nm 处的延时量为 89.68° 。将波片样品置于激光器谐振腔内, 并在每个角度对其进行多

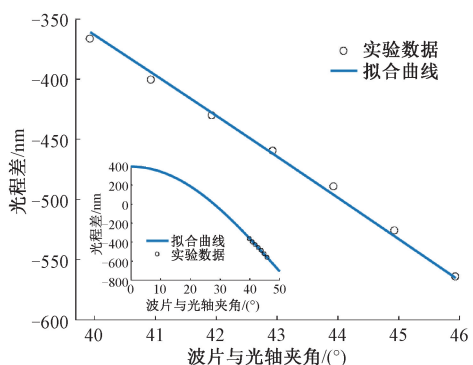
次采样。旋转到每个角度后, 以 1 min 为间隔对频率信号进行读取, 连续读取 25 次。实验证明, 本系统拟合值与测量值均值之间的误差为 $-13.09 \sim 13.46$ nm, 且每个角度下的误差标准差小于 1.79 nm, 且单点最大误差优于 15.85 nm, 如图7(b)所示。

4 结 论

本文提出一种基于基于光纤激光频率分裂效应的厚度/折射率双参量测量方法。通过激光器纵模理论, 分析了多模激光器中频率分裂拍频信号与腔内双折射的关系, 结合折射率变化规律与斯涅尔公式, 得到了双参量同步测量模型。搭建了多纵模光纤激光双折射元件厚度/折射率同步测量系统。实验研究了频率分裂光纤激光器的输出特征, 得到了插入器件沿快轴旋转时, 角度变化与腔内双折射的关系。实验结果表明, 通过该系统对双折射元件的厚度测量误差为 210 nm, 本征折射率测量误差为 10^{-5} , 测量标准差优于 1.79 nm, 单点测量最大误差优于 15.85 nm。测得设计波长为 1550 nm 的四分之一波片, 在 1556 nm 时的相位延时为 89.68° 。本测量原理不受波长限制, 可通过改变所用激光器波长, 获得器件在目标波段内的相位延时变化曲线。因此, 本文提出的测量系统对于双折射器件的特定波长下的时延修正以及非接触非破坏性在线、在役的厚度/折射率测量具有重要的意义。

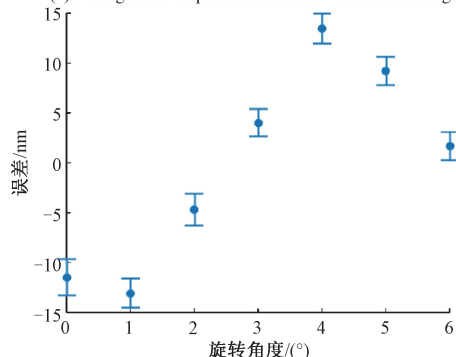
参考文献

- [1] PORFIREV A P, KHONINA S N. Astigmatic transformation of optical vortex beams with high-order cylindrical polarization [J]. JOSA B, 2019, 36(8): 2193-2201.
- [2] BUTT M A, KAZANSKIY N L. Two-dimensional photonic crystal heterostructure for light steering and TM-polarization maintaining applications [J]. Laser Physics, 2021, 31(3): 036201.
- [3] NICHOLLS L H, RODRIGUEZ-FORTUÑO F J, NASIR M E, et al. Ultrafast synthesis and switching of light polarization in nonlinear anisotropic metamaterials [J]. Nature Photonics, 2017, 11(10): 628-633.
- [4] FRIEDMAN A S, GERASIMOV R, LEON D, et al. Improved constraints on anisotropic birefringent Lorentz invariance and C P T violation from broadband optical polarimetry of high redshift galaxies [J]. Physical Review D, 2020, 102(4): 043008.



(a) 相位差随转角变化拟合曲线

(a) Fitting curve of phase difference with rotation angle



(b) 测量值于拟合值误差

(b) Error between measured value and fitting value

图7 相位差测量拟合

Fig. 7 Phase difference measurement fitting

- [5] WEI Y, JANG C H. Selective and direct detection of free amino acid using the optical birefringent patterns of confined nematic liquid crystals [J]. *Liquid Crystals*, 2017, 44(2): 303-311.
- [6] ZHANG B, LI L, WANG L, et al. Second harmonic generation in femtosecond laser written lithium niobate waveguides based on birefringent phase matching [J]. *Optical Materials*, 2020, 107: 110075.
- [7] SHAO Z F, WANG J J, WANG H, et al. Analyze of the stress-birefringence of the fused silica with large aperture [C]. *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications Ltd, 2017, 726: 38-42.
- [8] 孟庆华, 向阳. 高精度测量光学玻璃折射率的新方法 [J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(11):2114-2119.
MENG Q H, XIANG Y. Novel high accurate measurement method for refractive index of optical glass [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2008, 16(11):2114-2119.
- [9] 孙桂林. 一种折射率测量新方法 [J]. *应用光学*, 1995(1):58-61.
SUN G L. A new refractive index measuring method [J]. *Journal of Applied Optics*, 1995(1):58-61.
- [10] NESTLER P, HELM C A. Determination of refractive index and layer thickness of nm-thin films via ellipsometry [J]. *Optics Express*, 2017, 25 (22): 27077-27085.
- [11] HANSEN P E, MADSEN J S. Thickness and refractive index analysis of ellipsometry data of ultra-thin semi-transparent films [C]. *Laser Applications to Chemical, Security and Environmental Analysis*, Optical Society of America, 2018.
- [12] HILFIKER J N, STADERMANN M, SUN J, et al. Determining thickness and refractive index from free-standing ultra-thin polymer films with spectroscopic ellipsometry [J]. *Applied Surface Science*, 2017, 421: 508-512.
- [13] KUMAR M, MATOBA O, QUAN X, et al. Decoupling the refractive index and thickness by dual-wavelength digital holographic microscopy [C]. *Holography: Advances and Modern Trends VII*. International Society for Optics and Photonics, 2021, 11774: 1177400.
- [14] 曹秒,刘畅,林响,等. 基于 CCD 成像自动对准技术的玻璃折射率测量系统研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34 (11):2565-2571.
- CAO M, LIU CH, LIN Y, et al. Research on the glass refractive index measurement system based on CCD imaging self aligning technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(11):2565-2571.
- [15] 谷婷婷, 黄素娟, 闫成, 等. 基于数字全息图的光纤折射率测量研究 [J]. *物理学报*, 2015, 64 (6): 157-166.
- GU T T, HUANG S J, YAN CH, et al. Refractive index measurement research for optical fiber based on digital hologram [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64 (6): 157-166.
- [16] AROSA Y, LAGO E L, DE LA FUENTE R. Refractive index measurements in absorbing media with white light spectral interferometry [J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 7578-7586.
- [17] CLAVEAU R, MONTGOMERY P, FLURY M, et al. Local inspection of refractive index and thickness of thick transparent layers using spectral reflectance measurements in low coherence scanning interferometry [J]. *Optical Materials*, 2018, 86: 100-105.
- [18] JAN C M, LIU C S, CHEN C L, et al. Optical interference system for simultaneously measuring refractive index and thickness of slim transparent plate [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 145: 106668.
- [19] CHEN W, ZHANG S, LONG X. Thickness and refractive-index measurement of birefringent material by laser feedback technique [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(6):998-1000.
- [20] XU L, ZHANG S, TAN Y, et al. Simultaneous measurement of refractive-index and thickness for optical materials by laser feedback interferometry [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(8):1693.
- [21] LIU W, LIU M, ZHANG S. Method for the measurement of phase retardation of any wave plate with high precision [J]. *Applied Optics*, 2008, 47 (30): 5562-5569.
- [22] 陈恺, 祝连庆, 牛海莎, 等. 基于 1 556 nm 光纤激光器频率分裂效应的应力测量 [J]. *物理学报*, 2019, 68(10):73-80.
- CHEN K, ZHU L Q, NIU H SH, et al. Stress measurement based on 1 556 nm fiber laser frequency

splitting effect[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(10): 73-80.

- [23] GHOSH G. Dispersion-equation coefficients for the refractive index and birefringence of calcite and quartz crystals[J]. Optics communications, 1999, 163(1-3): 95-102.

作者简介



陈恺, 2013 年于山东科技大学获得学士学位, 2017 年于北京信息科技大学获得硕士学位, 现为合肥工业大学博士在读, 主要研究方向为光纤激光器、光纤传感器。

E-mail: chen_kai_0413@163.com

Chen Kai received his B. Sc. degree from Shandong University of Science and Technology in 2013, and received his M. Sc. degree from Beijing University of Information Technology University in 2017. He is currently pursuing his Ph. D. degree at

Hefei University of Technology. His research interests include fiber laser and fiber sensing.



祝连庆 (通信作者), 1984 年于合肥工业大学获得学士学位, 1989 年于合肥工业大学获得硕士学位, 2013 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为光纤激光器、光纤传感器。

E-mail: zhulianqing@sina.com

Zhu Lianqing (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Hefei University of Technology in 1984 and 1989, and received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2013. He is currently a professor at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include fiber laser and fiber sensing.