

# 基于光谱光纤低相干的透射样品色散和 折射率测量方法

陈朝良 高万荣

(南京理工大学光电学院光学工程, 江苏 南京 210094)

**摘要** 提出了一种利用光纤式低相干技术测量光学介质折射率和群延迟色散的方法。该方法中,在系统参考臂使用步进电机扫描,干涉光信号经过光谱仪后由 CCD 探测,利用样品上下表面的光谱干涉信号计算相位差值,然后利用多项式拟合求出群延迟色散。其优点是系统中由于光纤而引起的参考臂与样品臂之间的色散不匹配不会影响测量结果。色散测量精度可以达到  $\pm 0.2747 \times 10^{-14}$  fs<sup>2</sup>/mm。在样品臂中放入反射镜,可以测量系统色散不匹配值,该数值能够用于系统色散的定量补偿。与传统的根据半峰全宽的变化来评定色散补偿结果的方法相比,定量补偿可以提高补偿精度和减小重复计算半峰全宽的工作量,定量补偿的精度为  $\pm 0.019 \times 10^{-12}$  fs<sup>2</sup>。

**关键词** 光谱学;低相干技术;色散;光谱测量;折射率

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.1008005

## Method of Measuring Dispersion and Refractive Index of Transparent Object Based on Spectral Fiber Low Coherence Interferometry

Chen Chaoliang Gao Wanrong

(Department of Optical Engineering, School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technique,  
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** A method of measuring dispersion and refractive index of transparent object based on spectral fiber low coherence interferometry is proposed, in which the path length of the reference arm is changed by a step motor and the interferometric signals are measured by a CCD detector. The difference between the signals from the upper and lower surfaces of a transparent plate is found and a polynomial fitting-based method is used to find the group delay dispersion. One advantage of the method is that the value of the measured dispersion is not affected by the dispersion introduced due to the mismatch between dispersions of the sample and reference arms of the system. The accuracy of the dispersion measurement is  $\pm 0.2747 \times 10^{-14}$  fs<sup>2</sup>/mm. By placing a reflective mirror in the sample arm of the interferometer, the values of dispersion mismatch can be measured and can be employed to quantitatively compensate the system dispersion. Compared with traditional methods of measuring variation of the full width at half maximum (FWHM), the proposed method can improve the accuracy and efficiency of the dispersion compensation. The dispersion compensation accuracy achieved is  $\pm 0.019 \times 10^{-12}$  fs<sup>2</sup>.

**Key words** spectroscopy; low coherence technology; dispersion; spectral measurement; refractive index

**OCIS codes** 030.1640; 040.1520; 140.3510; 230.1950

## 1 引言

当非单色光在介质中传播时,会发生群延迟现象,即光脉冲信号通过该光学元件后包络信号出现

时间延迟,它可以通过将光波的频谱相位对角频率求导来计算。色散是由于光学介质折射率随光波长的变化而引起的,当光脉冲信号在色散介质中传播

收稿日期: 2013-04-19; 收到修改稿日期: 2013-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(61275198,60978069)

作者简介: 陈朝良(1989—),男,博士研究生,主要从事生物医学成像方面的研究。E-mail: chaoliangchen@163.com

导师简介: 高万荣(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事生物医学光学方面的研究。E-mail: gaowangrong@yahoo.com

时,色散会引起光脉冲包络信号展宽和变形。在激光的很多应用中<sup>[1-2]</sup>,色散引起的误差是必须考虑的。为了精确估计和减小误差,需要知道光学材料的色散大小,所以,色散的测量和补偿一直以来都是人们非常关注的问题。到目前为止,人们已经提出了很多色散测量和补偿的方法<sup>[3-16]</sup>,其中文献[3-5,7-12]提出的测量方法是通过计算插入样品后光谱干涉信号的相位变化,再利用多项式拟合来实现。文献[12]使用光纤式干涉系统来测量光学介质的群折射率,并且光纤的色散不会影响测量结果。色散测量方法还能应用在活体生物组织上,如文献[10]使用低相干系统测量了人眼的折射率。

上述色散的测量方法中,大部分都是基于空间白光干涉仪和空间低相干干涉仪实现的。由于光纤有较强的色散,所以在光纤式干涉系统中,参考臂和样品臂中光纤长度差和光学元件会引入色散不匹配,其中,光纤长度差起主要作用,并且不匹配值与长度差成正比。本文提出的方法充分利用了光学介质前后表面的干涉信号,因此可以在光纤式干涉系统中实现光学介质群延迟色散的测量。

尽管光纤式干涉系统有系统紧凑和便携的优点,但是光纤的色散给光学应用带来了不便。如在光学相干层析成像(OCT)系统中,参考臂和样品臂中的色散不匹配会降低系统的分辨率,所以提出了很多色散补偿方法<sup>[13-15]</sup>。Fercher等<sup>[13]</sup>通过数值补偿的方法来进行色散补偿,它的优点是简单容易实现。Xie等<sup>[14]</sup>通过声光晶体来实现色散补偿。Gao<sup>[15]</sup>分析得

出可以在快速扫描延迟线(RSOD)中调节光栅与傅里叶透镜之间的距离和光栅夹角来实现色散补偿,该方法的优点是能够补偿随着样品深度增加而增加的色散值。Meadway等<sup>[16]</sup>利用了光谱干涉信号来评定RSOD的色散补偿结果,这种方法比用包络半峰全宽和包络强度值来评定的方法精确度高。

上述色散补偿方法都是通过重复调节色散引入量根据实验结果的变化来恒定补偿色散的,文献[13-15]是通过计算系统点扩展函数的半峰全宽实现的,文献[15]是通过计算光谱分量发生干涉的时间差来计算的。利用本文提出的方法可以直接测量出色散不匹配值,从而一次性实现色散补偿,能够大大减小工作量。

## 2 理论模型

如图1所示,该实验系统的结构是光纤式迈克尔孙干涉仪,光源为中心波长830 nm,带宽50 nm的超发光二极管,光源出射光先经过50:50的光纤耦合器分为两束光,一束进入参考臂,经准直后照在平面反射镜上,反射镜放置在一个精密移动的步进电机上;该系统中使用的步进电机的步进距离为625 nm。另外一束光进入样品臂,由光纤出射的光先通过准直镜准直,然后通过显微物镜会聚在样品上;干涉光束由光纤出射后经准直再通过频谱仪后由CCD探测。该系统中使用的CCD是1024 pixel的线阵CCD,像元大小为10 μm,线扫描频率是27 kHz。

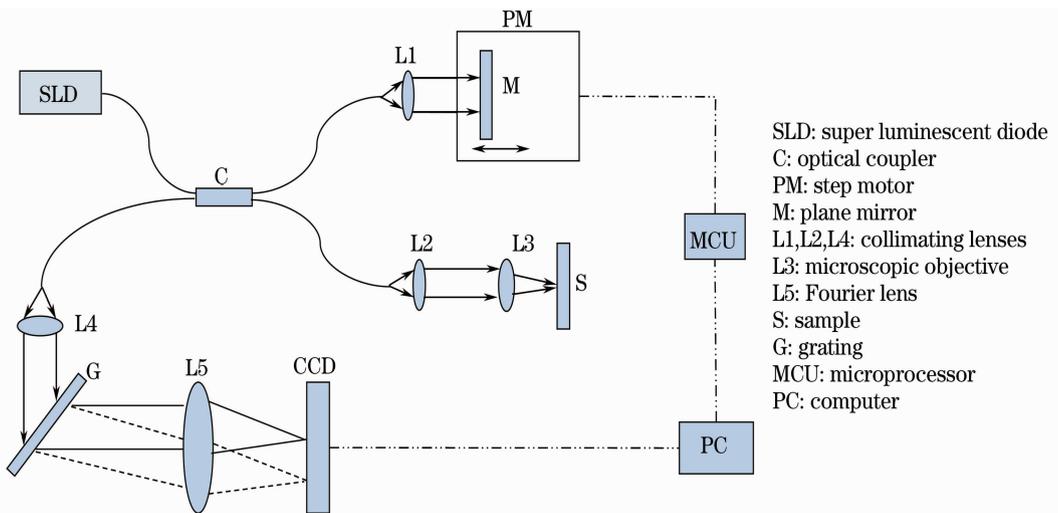


图1 光谱探测式光纤低相干系统结构图

Fig.1 Schematic of a fiber optics-based spectral low coherence interferometer

根据干涉原理,光谱干涉信号可以表示为<sup>[17]</sup>

$$S(\omega) = S_0(\omega)[1 + \gamma(\omega) \cos(\omega\Delta/c)], \quad (1)$$

式中  $\omega$  表示光波角频率,  $S_0(\omega)$  表示光源的光谱信号,  $\gamma(\omega)$  定义为干涉条纹的对比度,  $\Delta$  表示光程差,  $c$

表示光波在真空中的速度。将(1)式去直流量后进行希尔伯特变换可求出光谱干涉信号的相位谱为

$$\phi(\omega) = \arg\{\mathcal{F}_{\text{HT}}[S'(\omega)]\}, \quad (2)$$

式中  $\arg(\cdot)$  表示求相位,  $\mathcal{F}_{\text{HT}}(\cdot)$  表示希尔伯特变换,  $S'(\omega)$  为去直流量后的光谱干涉信号。由色散原理可知, 色散的影响就是在光波相位中加入一个非线性相位因子。假定系统参考臂和样品臂之间的色散不匹配, 在样品臂中放入色散介质后, 由(1)式和(2)式可得与样品上表面光程差为  $\Delta$  时, 光谱干涉信号相位谱为<sup>[13]</sup>

$$\phi_1 = -\omega\Delta/c + \varphi(\omega), \quad (3)$$

式中  $\varphi(\omega)$  表示由系统色散不匹配而引起的相位倾斜因子。由色散的原理可知, 非单色光通过色散介质后, 不同光波长对应的等效光程不同, 此时各光波长的等光程点也有一定偏移, 这使得探测的干涉包络信号有一定程度的展宽, 这也是 OCT 系统中需要色散补偿的原因。光束通过样品后的相位变化可以表示为

$$\phi(\omega) = -\omega n(\omega)z/c, \quad (4)$$

式中  $n(\omega)$  表示样品的折射率,  $z$  表示样品厚度。对光源中心波长而言, 当与样品下表面的光程差为  $\Delta$  时, 由(1)式得此时频谱干涉信号表达式

$$S(\omega) = S_0(\omega)\gamma(\omega)\cos\{\omega[\delta(\omega) + \Delta]/c + \varphi(\omega)\}, \quad (5)$$

式中  $\delta(\omega)$  表示由样品色散引起的角频率为  $\omega$  的光波与中心角频率  $\omega_0$  之间的光程差, 可以表示为

$$\delta(\omega) = [n(\omega) - n(\omega_0)]z. \quad (6)$$

由(2)式和(3)式可得此时光谱干涉信号的相位谱为

$$\phi_2 = -\omega \cdot \{\Delta + [n(\omega) - n(\omega_0)] \cdot z\}/c + \varphi(\omega), \quad (7)$$

(7)式减(3)式得

$$\phi_2 - \phi_1 = -\omega n(\omega)z/c + \omega n(\omega_0)z/c. \quad (8)$$

用  $\Delta\phi(\omega)$  表示相位差, 由(4)式和(8)式可得

$$\Delta\phi(\omega) = \phi(\omega) + \frac{\omega}{\omega_0}\phi(\omega_0), \quad (9)$$

式中  $\phi(\omega_0)$  表示中心波长对应的相位变化。对  $\phi(\omega)$  进行泰勒展开得<sup>[15]</sup>

$$\begin{aligned} \phi(\Omega) &= \phi(\omega_0) + \phi'(\omega_0)\Omega + \\ &\frac{\phi''(\omega_0)}{2}\Omega^2 + \frac{\phi'''(\omega_0)}{6}\Omega^3 + \dots, \end{aligned} \quad (10)$$

式中  $\Omega = \omega - \omega_0$ ,  $\omega_0$  表示光束的中心角频率。在泰勒展开式中, 第一项表示一个固定的相位因子, 第二项表示群延迟, 第三项和第四项分别表示一阶的群延迟色散和二阶的群延迟色散。由(10)式可以看

出, 一阶群延迟色散表示为相位变化对角频率求二次导数所得, 而(9)式中第二部分是  $\omega$  的一次函数, 将其对  $\omega$  求二次导数为 0, 所以该项对色散结果没有影响。将(9)式代入(10)式进行多项式拟合就能求出群延迟色散。由(3)式、(7)式和(8)式可以看出, 两次相位相减时, 去掉了系统色散  $\varphi(\omega)$  对测量结果的影响。光束通过色散介质后, 中心波长对应的相位变化可以表示为

$$\phi(\omega_0) = \frac{4\pi}{\lambda_0}n(\omega_0)z, \quad (11)$$

式中  $\lambda_0$  表示中心波长, 这里做一个简化, 令中心角频率的折射率  $n(\omega_0)$  与群折射率  $n_g$  相等, 则(11)式可以表示为

$$\phi(\omega_0) = \frac{4\pi}{\lambda_0}n_g \cdot z. \quad (12)$$

由光学原理得, 当光波通过介质后折射率可以表示为

$$n(\omega) = \frac{\phi(\omega)}{k(\omega) \times z}, \quad (13)$$

式中  $k(\omega)$  表示波数。由(9)式、(12)式和(13)式可得

$$n(\omega) = \Delta\phi(\omega) - \frac{\omega}{\omega_0}k(\omega_0)L, \quad (14)$$

式中  $L = n_g z$  表示样品的群光程。色散介质的色散可以用 Sellmeier 色散方程<sup>[18]</sup>来表示:

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{A_1}{1 - A_4/\lambda^2} + \frac{A_2}{1 - A_5/\lambda^2} + \frac{A_3}{1 - A_6/\lambda^2}}, \quad (15)$$

式中  $\lambda$  表示光波长, 可以表示为  $\lambda = 2\pi c/\omega$ , 根据(14)式和(15)式利用最小二乘法拟合可以求出参数  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$  的值。

在样品臂中放入反射镜, 参考臂和样品臂的色散不匹配可以等效为在其中一臂中加入了色散介质, 利用上述方法测量出该色散值即表示系统色散不匹配值。由(1)式可得无色散时光程差为  $\Delta$  时的光谱干涉信号的相位谱为

$$\phi_0 = -\omega\Delta/c, \quad (16)$$

将由反射镜所得光谱干涉信号的相位谱减去  $\phi_0$  后代入(10)式拟合便可求出系统参考臂和样品臂的色散不匹配值。

## 3 实验与数据处理

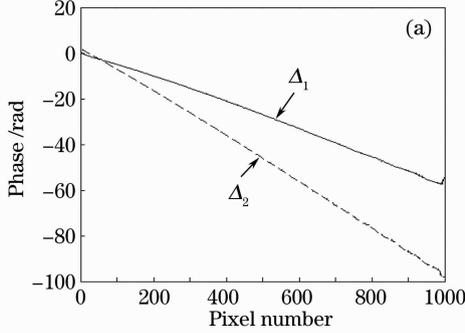
### 3.1 波长标定

为了计算 CCD 不同像元对应的光波的相位延迟, 必须知道该像元对应的光波长。这里使用干涉法来标定波长<sup>[19]</sup>, 该方法的步骤为: 在样品臂中放入平面反射镜, 分别保存光程差为  $\Delta_1$  和  $\Delta_2 = \Delta_1 +$

100  $\mu\text{m}$  的干涉信号, 去掉干涉信号中的直流成分的方法为分别使用干涉信号减去未发生干涉时的光谱信号(遮挡一光路的信号)。然后分别对两次干涉后的信号进行希尔伯特变换构建复解析信号, 利用反正切函数求解相位信号并且通过相位解包络后结果如图 2(a)所示。初始相位  $\xi$  可以表示为

$$\xi = 2\pi \times \lfloor 2(\Delta_2 - \Delta_1) / \lambda_{\min} \rfloor, \quad (17)$$

式中  $\lfloor \cdot \rfloor$  表示取不超过该值的最大整数,  $\lambda_{\min}$  表示光谱最小波长。利用(2)式和(8)式可以求得相位差



$\Delta\phi(\lambda)$ , 通过公式  $\lambda = 4\pi(\Delta_2 - \Delta_1) / [\Delta\phi(\lambda) + \xi]$  求得不同像素对应的波长值。光波角频率在 CCD 上的分布满足<sup>[20]</sup>

$$\omega(x) = \omega_0 + \alpha_1 x + \frac{1}{2} \alpha_2 x^2 + \frac{1}{6} \alpha_3 x^3 + \dots, \quad (18)$$

式中  $x$  表示线阵 CCD 横向坐标。使用(18)式的二阶函数模型来对标定结果进行拟合, 波长标定的实验结果如图 2(b)所示。

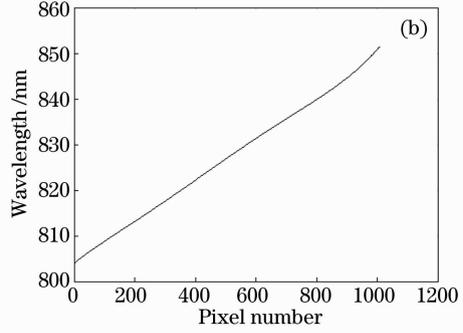


图 2 (a) 利用希尔伯特变换求解的光谱干涉信号相位谱; (b) 利用相位拟合得到的波长分布

Fig. 2 (a) Calculated phase spectra of spectral interference signal; (b) wavelength distribution obtained with phase fitting

### 3.2 利用时域干涉信号计算样品等效群光程

由于光源的功率谱是高斯函数分布, 根据维纳-辛钦定理, 则由样品前后表面反射的时域干涉信号(可以通过将 CCD 每个像素点对应的不同时刻的光强信号分别相加而获得)也是高斯函数, 只要分别对两次干涉信号进行高斯拟合就可以求出等效群光程。线阵 CCD 工作时的线扫描频率是 27 kHz, 根据奈奎斯特采样频率的条件, 参考臂中的调制信号最大只能是 13.5 kHz, 由多普勒频率公式  $f_D = 2V/\lambda_0$  可以计算出步进电机的最大移动速度为  $V_{\max} = 5.5 \text{ mm/s}$ , 步进电机实际工作时的扫描速度为 0.1 mm/s。由于步进电机的移动速度不稳定, 导致干涉信号的调制频率也不稳定, 所以这里没有使用相干解调或者希尔伯特变换解调的方法来获取包络信号。对于时域干涉信号, 在相干长度之外, 干涉信号的强度值为参考臂和样品臂的光强之和, 此时光强分布很稳定, 对应的标准差很小; 而在相干长度之内, 干涉信号由于调制信号的作用, 光强度值随着时间的变化呈现周期性分布, 如图 2(a)所示, 振动幅度与光程差成反比, 则光强分布的标准差与光程差成反比。利用干涉光强的这个分布特性可以根据下式来获取干涉图的包络信号:

$$E'(j) = \frac{\sum_{i=j}^{j+N} E(i)}{N} + a\sigma, j = 1, 2, \dots, \quad (19)$$

式中  $E(i)$  表示干涉信号的采样值,  $N$  表示选取的窗口大小,  $a$  是常数,  $\sigma$  表示该窗口内干涉光强分布的标准差。经过该算法处理后的包络结果如图 3(a)所示。在这里, 窗口大小  $N=100$  和常数  $a=1.4$  是根据经验设定的。由(1)式可知, 设定样品上下表面的光谱干涉信号的光程差都为  $\Delta$ (根据步进电机的移动步数确定), 用希尔伯特变换的方法可以分别计算两次光谱干涉信号的相位谱  $\phi_1$  和  $\phi_2$ 。这里光程差  $\Delta$  的确定应该满足两个条件: 1) 光程差尽量大, 因为由(1)式可以看出, 当光程差越大时, 干涉频谱图的频率越高, 这样通过希尔伯特变换求得的相位误差就越小; 2) 光程差对应的干涉频谱图的信噪比尽量大, 由高斯函数的特点可以知道, 随着光程差的增加, 信噪比逐渐减小。通过实验, 本系统中当光程差  $\Delta=105 \mu\text{m}$ (对应步进电机移动 84 步) 的时候结果最好。将  $\phi_1$  和  $\phi_2$  代入(8)式和(10)式就可以计算出样品的色散值。样品上下表面光谱干涉信号的相位谱之差  $\Delta\phi$  如图 3(c)所示。利用(14)式和(15)式计算的折射率结果如图 3(d)所示。

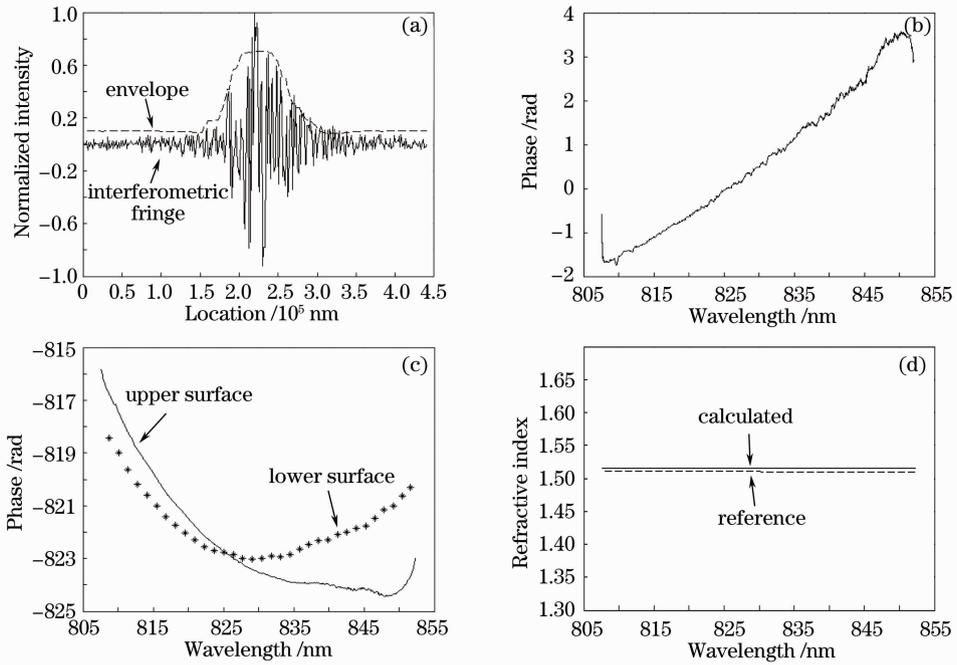


图3 (a) 时域干涉信号与包络; (b) 样品上下表面的相位差; (c) 样品上下表面干涉信号相位谱分别与无色散时相位谱之差; (d) 折射率随波长的变化图

Fig. 3 (a) Time-domain interferometric fringe and its envelope; (b) difference between phases at the upper and lower surfaces of sample; (c) difference between the spectra of the phase of spectral interference signal at the upper and low surfaces and zero dispersion; (d) refractive index versus wavelength

## 4 结果和讨论

由于系统色散不匹配值无法估计,本文测量系统色散值的方法是利用样品上下表面的干涉信号来分别计算系统的色散不匹配值,两次测量结果之差应该是样品的色散值。由于样品的色散值已知,所以可以根据测量得到的色散差值与样品色散值的标准差来评定测量误差,图 3(c)表示样品前后表面的相位谱分别与色散匹配时的相位谱之差。

本实验系统样品臂中显微物镜的数值孔径  $NA=0.13$ ,对应成像深度  $h<5$  mm,为了有效利用系统的成像深度,对厚度为 3.16 mm 的 K9 玻璃进行了 5 次测量。群延迟和折射率结果如表 1(理论值和多次测量值)所示,系统色散测量结果如表 2 所示。这里对相位进行 2 次多项式拟合(忽略 2 阶及以上的群色散)。本文使用标准误差来评定测量结果的准确度,群延迟色散、折射率和系统色散不匹配值的标准误差可以分别表示为

$$\sigma_G = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{l=1}^M (G_l - G_R)^2}, \quad (20)$$

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{\omega} [n(\omega) - n_R(\omega)]^2}, \quad (21)$$

$$\sigma_{GS} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{l=1}^M (G_{Sl} - G_{SR})^2}, \quad (22)$$

式中  $G_l$  表示群延迟色散的第  $l$  次测量值,  $G_R$  表示群延迟色散的参考值,  $M$  表示实验次数,  $n_R(\omega)$  表示光波角频率为  $\omega$  的折射率参考值(由成都光明光电有限公司提供的 K9 玻璃参数),  $p$  表示 CCD 对光谱干涉信号的采样点数 ( $p = 1024$ ),  $G_{Sl}$  表示第  $l$  次测量插入样品前后的系统色散差值,  $G_{SR}$  表示系统引入的色散参考值。

由表 1 和表 2 可知该方法测量群延迟色散、折射率和系统色散的标准差分别为  $0.2747 \times 10^{-14}$  fs<sup>2</sup>/mm, 0.0046 和  $0.019 \times 10^{-12}$  fs<sup>2</sup>。其中群延迟色散的结果误差偏大主要有两个原因: 1) 由于色散是折射率随光波长变化引起的,所以增加光源的带宽,误差会减小,当光源带宽为 20 nm 时,色散误差为  $\pm 1.2128 \times 10^{-14}$  fs<sup>2</sup>/mm。2) 光波由样品前后表面反射发生干涉时的等效光程是通过步进电机移动来计算的,步进电机的精度直接影响了实验结果,由于实验室条件有限,本系统中使用的步进电机的步进间距是 625 nm,使用更高精度的步进电机可以减小误差。

表 1 对厚度为 3.16 mm 的 K9 玻璃的群延迟色散和折射率测量结果

Table 1 Measured group delay dispersion and refractive index of K9 glass with a thickness of 3.16 mm

Experiment number	Group delay dispersion /( $10^{-14}$ fs <sup>2</sup> /mm)	Reference value /( $10^{-14}$ fs <sup>2</sup> /mm)	Dispersion standard deviation /( $10^{-14}$ fs <sup>2</sup> /mm)	Refractive standard index deviation
1	4.4063			0.0051
2	4.4263			0.0050
3	4.4099	4.2078	0.2747	0.0050
4	4.5049			0.0036
5	4.6092			0.0045

表 2 系统色散计算方法的验证

Table 2 Verification of the values of the system dispersion measured

Experiment number	System dispersion /( $10^{-12}$ fs <sup>2</sup> )	System dispersion with sample /( $10^{-12}$ fs <sup>2</sup> )	Dispersion difference /( $10^{-12}$ fs <sup>2</sup> )	Reference value /( $10^{-12}$ fs <sup>2</sup> )	Standard deviation /( $10^{-12}$ fs <sup>2</sup> )
1	1.7234	2.0019	0.27848		
2	1.7476	2.0274	0.27974		
3	1.6799	1.9586	0.27871	0.26593	0.019
4	1.6522	1.9369	0.28471		
5	1.7857	2.0823	0.29655		

## 5 结 论

光纤式干涉系统具有系统紧凑、便携的优点,但是具有较强的色散。提出一种使用光纤式低相干系统测量光学介质群延迟色散、折射率和系统色散不匹配值的方法。其中色散测量误差为  $\pm 0.2747 \times 10^{-14}$  fs<sup>2</sup>/mm, 折射率的测量误差为  $\pm 0.0046$ , 系统色散不匹配值的精度为  $\pm 0.019 \times 10^{-12}$  fs<sup>2</sup>。影响测量误差的主要因素在于扫描电机的步进间距和光源的带宽大小。该方法可以应用在很多方面,比如在 OCT 系统中,利用该方法可以计算出系统色散不匹配值,然后进行定量补偿;甚至还可以利用该方法来测量层状结构的生物组织各层的色散值,根据测量结果来判断生物组织的生理状态。

该方法与其他方法的不同在于充分利用了光学介质前后表面的干涉信号来计算光波通过样品后的相位变化,这样做的优点是能够消除系统中参考臂与样品臂色散不匹配对测量结果的影响。本文通过搭建实验系统验证了该方法的可行性,并且分析了引入误差的原因,提出了对应的改进方法。该研究结果对评价和优化光纤式干涉系统的性能具有重要的意义。

## 参 考 文 献

1 Wu Tengfei, Liang Zhiguo, Yan Jiahua. Theoretical study on air dispersion compensation in the distance measurement of

femtosecond pulsed laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1208004.

武腾飞, 梁志国, 严家骅. 飞秒激光测距中空气色散补偿理论研究[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1208004.

2 Zhang Hongxia, Ren Yaguang, Ye Wenting, *et al.*. Dynamic dispersion compensation for the polarization coupling measurement system of polarization maintaining fiber[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0105001.

张红霞, 任亚光, 叶雯婷, 等. 保偏光纤偏振耦合系统的动态色散补偿[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0105001.

3 Li Chengshuai, Shen Weidong, Zhang Yueguang, *et al.*. Measurement of group delay dispersion of dispersive mirror based on white-light interference[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1031003.

李承帅, 沈伟东, 章岳光, 等. 基于白光干涉测量色散补偿薄膜的群延迟色散[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1031003.

4 T V Amotchkina, A V Tikhonravov, M K Trubetskov, *et al.*. Measurement of group delay of dispersive mirrors with white-light interferometer[J]. Appl Opt, 2009, 48(5): 949-956.

5 H Maruyama, S Inoue, T Mitsuyama, *et al.*. Low-coherence interferometer system for the simultaneous measurement of refractive index and thickness[J]. Appl Opt, 2002, 41(7): 1315-1322.

6 Deng Yuqiang, Sun Qing, Yu Jing. Direct measurement of group delay of optical elements[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(2): 028102.

邓玉强, 孙青, 于靖. 光学元件群延迟的直接测量[J]. 物理学报, 2011, 60(2): 028102.

7 Wang Sijia, Zhang Yuying, Hu Minglie, *et al.*. Chromatic dispersion measurement of photonic crystal fibers using spectral interferometry[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 215-219.

王思佳, 张玉颖, 胡明列, 等. 频域干涉法测量光子晶体光纤的色散特性[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 215-219.

8 Jiangang Wang, Qing Xiao, Shaoqun Zeng. Dispersion measurements of water with spectral interferometry[J]. Chin Opt Lett, 2009, 7(6): 486-488.

9 A G Van Engen, S A Diddams, T S Clement. Dispersion measurements of water with white-light interferometry[J]. Appl

- Opt, 1998, 37(24): 5679–5686.
- 10 D X Hammer, A J Welch, G D Noojin, *et al.*. Spectrally resolved white-light interferometry for measurement of ocular dispersion[J]. J Opt Soc Am A, 1999, 16(9): 2092–2102.
- 11 P Hlubina. White-light spectral interferometry with the uncompensated Michelson interferometer and the group refractive index dispersion in fused silica[J]. Opt Commun, 2001, 193(1): 1–7.
- 12 W V Sorin, D F Gray. Simultaneous thickness and group index measurement using optical low-coherence reflectometry[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1992, 4(1): 105–107.
- 13 A Fercher, C Hitzenberger, M Sticker, *et al.*. Numerical dispersion compensation for partial coherence interferometry and optical coherence tomography[J]. Opt Express, 2001, 9(12): 610–615.
- 14 T Xie, Z Wang, Y Pan. Dispersion compensation in high-speed optical coherence tomography by acousto-optic modulation[J]. Appl Opt, 2005, 44(20): 4272–4280.
- 15 W Gao. Dispersion properties of grating-based rapid scanning optical delay lines[J]. Appl Opt, 2007, 46(6): 986–992.
- 16 A Meadway, S H H Darbrazi, G Dobre, *et al.*. A rapid method of measuring dispersion in low coherence interferometry and optical coherence tomography systems[J]. J Opt, 2010, 12(1): 015302.
- 17 H Delbarre, C Przygodzki, M Tassou, *et al.*. High-precision index measurement in anisotropic crystals using white-light spectral interferometry[J]. Appl Phys B, 2000, 70(1): 45–51.
- 18 I H Malitson. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica[J]. J Opt Soc Am, 1965, 55(10): 1205–1208.
- 19 Kai Wang, Zhihua Ding. Spectral calibration in spectral domain optical coherence tomography[J]. Chin Opt Lett, 2008, 6(12): 902–904.
- 20 C Dorrer, N Belabas, J P Likforman, *et al.*. Spectral resolution and sampling issues in Fourier-transform spectral interferometry [J]. J Opt Soc Am B, 2000, 17(10): 1795–1802.

栏目编辑: 王晓琰