

基于白光干涉测量色散补偿薄膜的群延迟色散

李承帅 沈伟东 章岳光 范欢欢 刘旭

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 为精确测量超快激光色散补偿薄膜的群延迟色散,提出了一种基于窗口傅里叶变换和样条插值去噪算法的新型白光干涉测量方案。计算机模拟表明此方法测试精度可达 0.58 fs^2 。分析了高斯噪声和光强平均效应对测试精度的影响,并使用此方法对实验制备的 Gires-Tournois 干涉反射镜和啁啾镜进行了测试,在宽光谱范围内测试误差小于 10 fs^2 。该方法相比其他算法可以更快、更精确地实现薄膜相位信息的提取,具有更高的测试精度和实用性。

关键词 薄膜;群延迟色散;白光干涉;窗口傅里叶变换

中图分类号 O484.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1031003

Measurement of Group Delay Dispersion of Dispersive Mirror Based on White-Light Interference

Li Chengshuai Shen Weidong Zhang Yueguang Fan Huanhuan Liu Xu

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract A novel white-light interferometric method based on window Fourier transform and cubic spline interpolation algorithm is proposed for accurate measurement of group delay dispersion of dispersive mirror applied in ultrafast laser system. Numerical simulations indicate that the proposed method exhibits precision up to 0.58 fs^2 . After analyzing the effect of Gaussian noise and averaging effect of light intensity on the test accuracy of the above method, home-made Gires-Tournois interferometer mirrors and chirped mirrors are measured. The experimental results demonstrate that group delay dispersion errors are less than 10 fs^2 in a wide spectral range. It is concluded from numerical simulations and experimental results that the proposed method can obtain phase information of thin films correctly and quickly, and it is more precise and practical than other algorithms.

Key words thin films; group delay dispersion; white-light interference; window Fourier transform

OCIS codes 310.6845; 310.6188; 320.7090; 300.6300

1 引言

色散补偿薄膜(DM)在超短激光脉冲系统中可实现精确的色散补偿^[1,2],相比于光栅对、棱镜对等传统补偿方式有着明显的优势^[3,4]。随着商业化设计软件和离子辅助沉积技术的发展,目前色散补偿薄膜的设计和制备已非难事,然而其群延迟色散(GDD)特性的精确测试仍然是限制色散补偿薄膜进一步发展的瓶颈。

Knox等^[5]在1988年首先提出采用基于白光干涉的二维时域方法来测试光学元件的群延迟,该方

法采用一系列不同波长的窄带滤光片来依次提取各个波长对应的群延迟量,可以实现可见光范围内的群延迟测试。然而,该方法的波长分辨率不高,因此难以获得高的测试精度。随后,Naganuma等^[6]在系统中加入氦氖激光器来监控步进电机移动的距离,可以通过一次扫描直接获得群延迟,但是由于光路调节困难,不适合实时测量和需要采集大量数据的情况。针对上述缺点和问题,Kovács等^[7]在1995年提出光谱分辨白光干涉方法,该方法将被测样品倾斜一个微小角度,使不同高度的两束光发生干涉,

收稿日期: 2012-02-15; **收到修改稿日期**: 2012-04-28

作者简介: 李承帅(1990—),男,硕士研究生,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: lichengshuai@gmail.com

导师简介: 沈伟东(1977—),男,博士,副教授,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: adongszju@hotmail.com

(通信联系人)

并由 CCD 接收各个波长对应的干涉条纹,由不同波长间的条纹相对变化关系得到群延迟。这种方法依赖于 CCD 的像素分辨率,因此难以获得很高的测试精度。

本文提出一种基于频域白光干涉技术的群延迟色散测试方法。该方法采用微型光纤光谱仪探测干涉信号,再使用窗口傅里叶变换算法从单幅干涉图中提取相位信息,将相位对角频率求导两次得到群延迟色散,具有测试速度快和稳定性高的优点,因此非常适于群延迟色散的测量。基于此白光干涉系统,分别对 Gires-Tournois (G-T)干涉反射镜和啁啾镜(CM)进行了测试,测试结果表明该方法具有较高的测试精度和良好的重复性。

2 测试系统及原理

测试系统装置如图 1 所示,这是一个典型的迈克尔孙白光干涉系统。光源采用 Ocean Optics 公司的 LS-1-LL 型光纤光源,其光谱范围为 360~2500 nm;接收端采用 Ocean Optics 公司的 USB4000 微型光纤光谱仪,该系列光谱仪采用东芝 TCD1304AP 线性 CCD 阵列实时采集数据,有效波段可覆盖 600~1050 nm,波长分辨率可达 1.4 nm^[8]。系统中参考镜镀膜,其反射相位可以忽略不计。

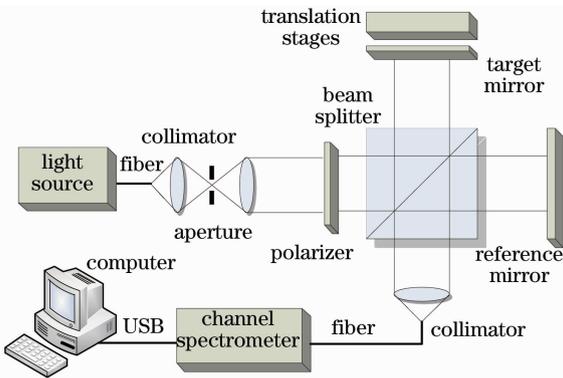


图 1 白光干涉测试系统示意图

Fig. 1 Schematic of white-light spectral interferometer

图 1 所示的白光干涉系统中,光纤光谱仪接收到的干涉强度 $I(\lambda)$ 包含了由测试系统中样品臂和参考臂的光程差 $\Delta(\lambda)$ 引入的薄膜相位信息 $\varphi(\lambda)$ 。两臂光程差 $\Delta(\lambda)$ 可以表示为

$$\Delta(\lambda) = \frac{\lambda}{2\pi}[\varphi(\lambda) + 2m\pi] = 2L + 2n_{bs}(\lambda)T_{ef} + \frac{\lambda}{2\pi}\delta(\lambda). \quad (1)$$

干涉系统两臂光程差包括三个部分: $2L$ 为空气中的

光程差, $2n_{bs}(\lambda)T_{ef}$ 为两臂在折射率为 $n_{bs}(\lambda)$ 的分光棱镜中的光程差,分光棱镜在使用时两侧存在的几何厚度差用等效厚度 T_{ef} 表示;而 $\frac{\lambda}{2\pi}\delta(\lambda)$ 为待测薄膜反射的相位变化量 $\delta(\lambda)$ 所引起的光程差。

采用窗口傅里叶变换解相位算法来提取相位信息,可将光纤光谱仪测得的干涉信号改写成^[9]

$$I(\lambda) = \alpha(\lambda) + \beta(\lambda)\cos\varphi(\lambda) = \alpha(\lambda)\beta(\lambda)\exp[i\varphi(\lambda)] + \beta(\lambda)\exp[-i\varphi(\lambda)], \quad (2)$$

式中 $\alpha(\lambda)$ 为干涉信号的背景光谱强度项, $\beta(\lambda)$ 为干涉信号的干涉包络项, $\varphi(\lambda)$ 为干涉系统两臂的相位差,包含了待测薄膜的相位信息。由于相对于 $\varphi(\lambda)$, $\alpha(\lambda)$ 和 $\beta(\lambda)$ 随波长的变化要缓慢得多,因此对(2)式进行傅里叶变换,利用傅里叶变换时移特性,通过加窗傅里叶函数滤波的方法提取单侧峰值进而滤除其他成分,再对提取的信号进行逆傅里叶变换,可以得到

$$\epsilon(\lambda) = \beta(\lambda)\exp[i\varphi(\lambda)], \quad (3)$$

$\epsilon(\lambda)$ 的辐角即为解包裹前的总相位 $\varphi_w(\lambda)$ ^[9]:

$$\varphi_w(\lambda) = \arg \epsilon(\lambda) = \arctan \frac{\text{Im} \epsilon(\lambda)}{\text{Re} \epsilon(\lambda)}, \quad (4)$$

进而采用解包裹函数 $\varphi_w(\lambda)$ 求出总相位 $\varphi(\lambda)$ ^[10]。

在干涉系统的样品镜位置插入与参考镜相同的镀膜反射镜,此时系统总光程差仅包含(1)式中的前两项,系统光程差 $\Delta_r(\lambda)$ 与分光棱镜折射率 $n_{bs}(\lambda)$ 成一阶线性关系,使用最小二乘法线性拟合可以得到 T_{ef} 和 L ^[11,12]。

将待测的色散补偿镜插入样品臂,采用相位解调法从光纤光谱仪得到的干涉光强信号提取出系统总相位 $\varphi(\lambda)$,根据(1)式和拟合得到的 T_{ef} 和 L 便可求解出待测薄膜反射相位 $\delta(\lambda)$ 。群延迟色散是相位 $\delta(\lambda)$ 对角频率 ω 的二阶导数,求导后便可得到待测薄膜的群延迟色散。然而两次求导会显著放大相位中存在的噪声,传统的相位去噪方法是对其进行多项式拟合^[13]或滑动平均,但前者无法应对复杂情况且最佳拟合多项式次数难以确定,后者简单易行但是对于变化很快的相位信息会丢失细节信息且造成求导得到的群延迟色散值偏小。为解决这一问题,提出将三次样条插值算法^[14]应用到对相位去噪的过程中来。对于有 n 个数据点的相位信息,可以用 $n-1$ 段三次多项式在数据点之间构建一个三次样条:

$$\delta_{cs}(\lambda) = a_i + b_i(\lambda - \lambda_i) + c_i(\lambda - \lambda_i)^2 + d_i(\lambda - \lambda_i)^3, \lambda \in [\lambda_i, \lambda_{i+1}), \quad (5)$$

然后使用优化方程对样条插值曲线 δ_{cs} 进行求解,可表示为

$$f(x) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \delta_{cs}'(\lambda)^2 d\lambda + p \left\{ \sum_{n=1}^n \left[\frac{\delta_{cs}(\lambda_i) - \delta(\lambda_i)}{\Delta\delta(\lambda_i)} \right]^2 - S \right\}, \quad (6)$$

式中 p 为拉格朗日系数,在求解过程中从 $p = 0$ 开始使用追赶法求解优化方程最小值,进而得到各区间内的三次样条插值曲线。这种去噪算法只需人为给定参数 S ,且可以根据得到的插值曲线的形貌控制 S 大小来决定插值曲线更接近于原始数据或更加平滑,是一种能在保存相位细节信息的情况下去噪的优良算法。

3 模拟仿真

为了验证上述系统的测试精度,对系统的测试过程和测试结果进行了模拟仿真。假定待测样品为群延迟色散曲线近似为波长二次多项式的色散补偿薄膜,其特性要求在 $720 \sim 880$ nm 波段范围内提供 $250 \sim -250$ fs² 的群延迟色散补偿,可用来补偿色散

元件产生的三阶和四阶色散,且反射率大于 99.5%,理论设计特性如图 2 所示。

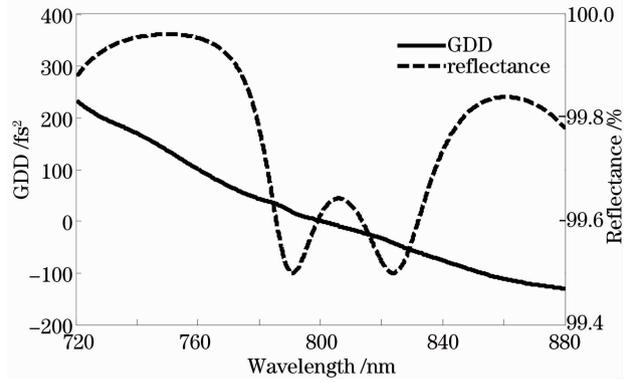


图 2 模拟仿真中采用的镜片群延迟色散和反射率
Fig. 2 Group delay dispersion and reflectance of the mirror used in simulation

根据实测结果,测试系统中卤钨灯光源的辐射光谱可以表示为

$$I_0(\lambda) = \frac{1}{2} \cos \left[\frac{\pi}{200} (\lambda - 800) \right], \quad (7)$$

由此得到干涉信号强度^[15]

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \{1 + VR(\lambda) \cos[\varphi(\lambda)]\} = I_0(\lambda) \left\{ 1 + VR(\lambda) \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} \left[2L + 2n_{bs}(\lambda) T_{ef} - \frac{\lambda}{2\pi} \delta(\lambda) \right] \right\} \right\}, \quad (8)$$

式中 $R(\lambda)$ 表示镜片反射率, $\delta(\lambda)$ 表示镜片的反射相移, V 为干涉条纹对比度。

图 3(a) 中实线即是根据 (7) 式得到的信号光

强,相关参数为 $L = 100$ μm , $T_{ef} = 10$ μm , $V = 0.9$; 虚线表示背景光强度。

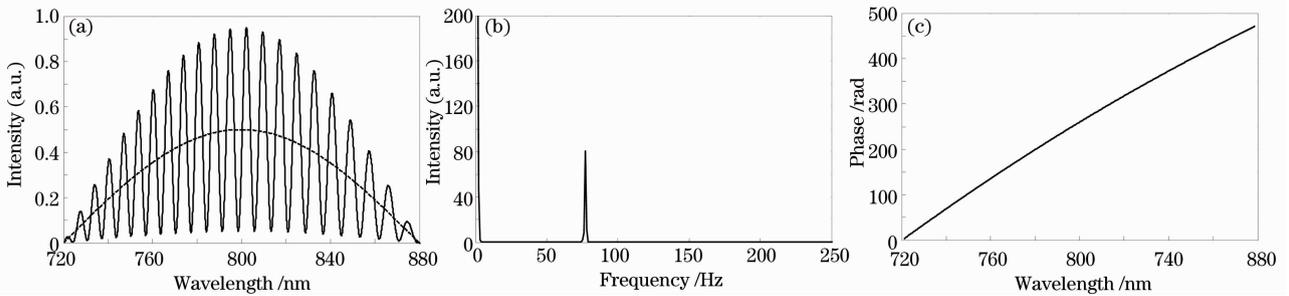


图 3 窗口傅里叶变换算法过程。(a)模拟光强信号;(b)傅里叶变换功率谱;(c)逆傅里叶变换得到的相位信息

Fig. 3 Process of window Fourier transform. (a) Simulation light intensity; (b) power spectrum of Fourier transform; (c) phase information acquired from inverse Fourier transform

采用窗口傅里叶算法对此模拟干涉强度信号进行傅里叶变换,就能得到傅里叶频谱,如图 3(b)所示。采用矩形窗函数提取出高频载波部分,对这部分数据进行逆傅里叶变换可得到模拟系统的总相位,如图 3(c)所示。对总相位使用三次样条插值方

法进行去噪处理后对频率连续两次求导,减去由两臂分光棱镜厚度差引入的群延迟色散,即可求得镜片的群延迟色散。

图 4 给出了模拟测试得到的群延迟色散曲线,与理论设计值相比吻合较好,在 $750 \sim 850$ nm 范围

内的均方根偏差小于 0.58 fs^2 。在测试区域的边缘 $720\sim 750 \text{ nm}$ 和 $850\sim 880 \text{ nm}$ 波长范围,误差略大,这是由傅里叶变换的窗口边缘效应^[16,17]引起的。

由于实际测试系统中空气扰动、平台抖动以及进入光谱仪的杂散光都会向测试得到的干涉强度信号引入噪声^[18,19],因此在模拟中加入不同强度的高斯噪声来验证噪声对群延迟色散测量精度的影响。结果如表 1 所示,可以看出测试误差随着噪声的增加而逐渐增大,没有噪声时误差为 0.58 fs^2 ,当噪声为 1%时误差为 4.98 fs^2 ,而当噪声增加至 5%时,误差则增大到 10.64 fs^2 。

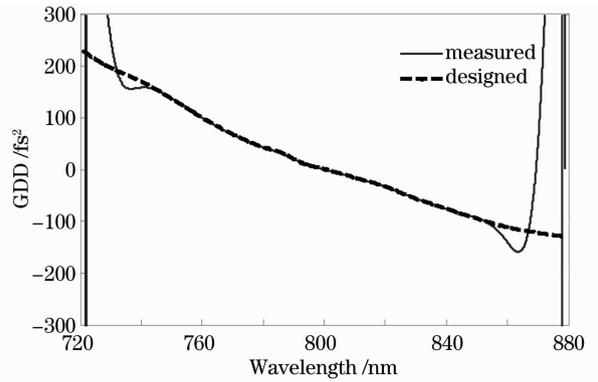


图 4 由干涉强度信号求得的群延迟色散值与设计值比较

Fig. 4 Measured GDD acquired from interference intensity signals and designed GDD

表 1 群延迟色散计算误差平均值

Table 1 Average errors of group delay dispersion calculation

Intensity of Gaussian noise /%	Error from Gaussian noise added into simulative light intensity / fs^2	Error from Gaussian noise and averaging effect added into simulative light intensity / fs^2
0	0.5782	0.5555
0.05	0.7894	0.8313
0.1	1.2574	1.2485
0.2	1.9951	1.8898
0.5	2.3859	2.3967
1	4.9849	5.3331
2	6.6956	7.8162
5	10.6357	13.8089

光谱仪的光谱分辨率不足也会造成群延迟色散的测试误差。实际测试系统中采用的光纤光谱仪使用 600 lp 光栅,其理论光谱分辨率为 1.4 nm ^[8],而 CCD 像素数为 3648,各像素的波长间隔在 $0.15\sim$

0.22 nm 之间。因此,在计算得到每个波长值对应的干涉强度值后,为了分析光纤光谱仪光谱分辨率不足造成的光强平均效应,对模拟出的干涉光强值中的第 i 个点进行如下处理:

$$I_{\text{bd}}[\lambda(i)] = 0.3[\lambda(i)] + 0.2[\lambda(i-1)] + 0.2[\lambda(i+1)] + 0.1[\lambda(i-2)] + 0.1[\lambda(i+2)] + 0.05[\lambda(i-3)] + 0.05[\lambda(i+3)]. \quad (9)$$

为了便于比较高斯噪声和光强平均效应对群延迟色散的误差影响,表 1 还给出了在干涉强度信号中加入高斯噪声和光强平均效应前后计算得到的群延迟色散与理论值的标准差值($750\sim 850 \text{ nm}$)。可以看出,在高斯噪声较小时,光强平均效应对误差的影响较小;随着高斯噪声的增大(大于 1%),光强平均效应造成的误差也逐渐增大。高斯噪声强度越大,算法消除噪声的难度增加,计算得到的群延迟色散的误差就越大;实际系统中的噪声约为 0.5%,因此群延迟色散的测试误差约为 2.39 fs^2 。

4 测试结果及分析

G-T 干涉反射镜和啁啾镜作为两种常见的色散器件具有不同的结构和适用波段,分别对自行制备的两组色散补偿镜的群延迟色散进行测试,来验证上述方案的可靠性。

相对于啁啾镜来说,G-T 干涉反射镜可在较窄的波段内实现高的色散补偿量,其群延迟色散曲线较平滑,因此先对实验制备的 G-T 干涉反射镜进行测试,该 G-T 干涉反射镜理论设计在 $740\sim 860 \text{ nm}$ 的波长范围内提供近似二次抛物线的群延迟色散补偿量。

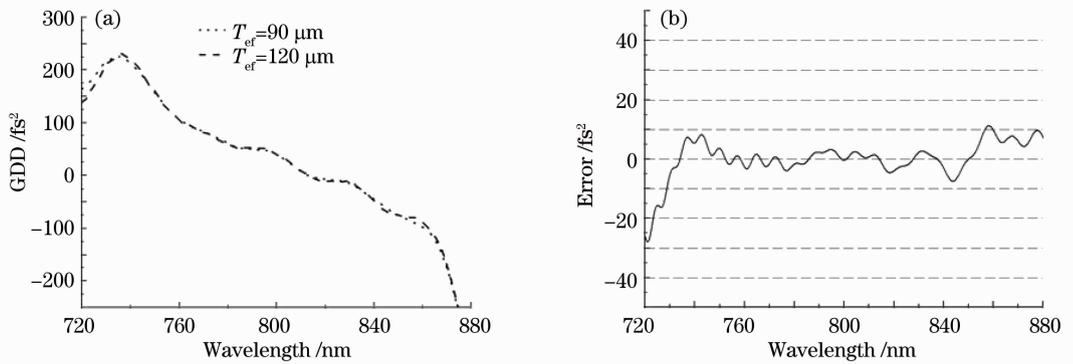


图5 在不同的白光干涉系统下 G-T 干涉反射镜的(a)测试结果和(b)测试误差

Fig. 5 (a) Experiment results and (b) testing errors of Gires-Tournois interferometer mirrors obtained from different white-light interferometry

为了验证测量结果的可靠性,实验中改变分光棱镜的位置从而在不同 T_{eff} ($90 \mu\text{m}$, $120 \mu\text{m}$) 的白光干涉系统中测试此 G-T 干涉反射镜的群延迟色散,测试结果和测试误差分别如图 5(a)和(b)所示。可以看到,两组测试结果吻合度比较高,测试误差在 $730 \sim 855 \text{ nm}$ 的波长范围内都小于 10 fs^2 ,测试误差的均方根值为 3.1448 fs^2 。但在 $720 \sim 730 \text{ nm}$ 和 $860 \sim 880 \text{ nm}$ 波段误差较大,这源自上文提到的傅里叶变换带来的窗口边缘效应。

与 G-T 干涉反射镜不同,啁啾镜可以提供宽波段的色散补偿,但是其补偿量相对较小。OM2 和 OM5 是设计工作在 $750 \sim 1100 \text{ nm}$ 的啁啾镜对,啁啾镜对的群延迟色散曲线峰谷值对应,相叠加能得到约 -100 fs^2 的群延迟色散补偿。

对此啁啾镜对的测试结果如图 6 所示,可以看到啁啾镜对的群延迟色散测试曲线峰谷对应,较好地体现了设计的初衷。但两条群延迟色散曲线的振幅和峰谷位置并不能完全匹配,这一偏差是由测试误差和薄膜制备过程中不可避免的工程误差^[20]共

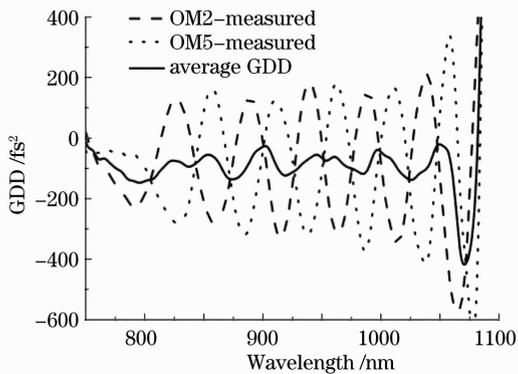


图6 啁啾镜对的群延迟色散测试结果

Fig. 6 Experiment result of group delay dispersion calculation of chirped mirrors

同造成的。同时,从测试结果中可以看出,在 $1050 \sim 1100 \text{ nm}$ 的波长范围内测试曲线带有不规则的震荡,可信度不高。经验证得,测试中使用的白光干涉系统只能在 $600 \sim 1050 \text{ nm}$ 的波长范围内提供较为精确的群延迟色散结果,这一范围是由实验装置决定的,主要是由于光纤光谱仪在大于 1050 nm 的波段响应较弱,难以提供足够的有效信息。

5 结 论

本文采用一种基于窗口傅里叶变换和样条插值去噪算法的新型白光干涉测试方法测量色散补偿薄膜的群延迟色散。该方法快速精确,对待测薄膜样品的初始结构和参数无特别要求,可用于 G-T 干涉反射镜和啁啾镜等色散补偿薄膜的测量。采用此方法,分别对实验制备的 G-T 干涉反射镜和啁啾镜进行了测试,结果表明,此方法在 $600 \sim 1050 \text{ nm}$ 的光谱范围内测得的群延迟色散精确度较高、重复性良好。

参 考 文 献

- 1 I. Walmsley, L. Waxer, C. Dorrer. The role of dispersion in ultrafast optics[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, **72**(1): 1~29
- 2 V. Pervak. Recent development and new ideas in the field of dispersive multilayer optics[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(9): C55~C61
- 3 Luo Zhenyue, Liu Xu, Shen Weidong *et al.*. Novel design method for initial structure of dispersion compensation filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2619~2623
罗震岳, 刘旭, 沈伟东等. 新型色散补偿薄膜的初始结构设计方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2619~2623
- 4 V. Pervak, C. Teisset, A. Sugita *et al.*. High-dispersive mirrors for femtosecond lasers[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(14): 10220~10233
- 5 W. H. Knox, N. M. Pearson, K. D. Li *et al.*. Interferometric measurements of femtosecond group delay in optical components[J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(7): 574~576
- 6 K. Naganuma, K. Mogi, H. Yamada. Group-delay

- measurement using the Fourier transform of an interferometric cross correlation generated by white light[J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(7): 393~395
- 7 A. P. Kovács, K. Osvay, Zs. Bor *et al.*. Group-delay measurement on laser mirrors by spectrally resolved white-light interferometry[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7): 788~790
- 8 Ocean Optics. TCD1304AP [OL]. <http://www.oceanoptics.com/technical/detectortoshibated1304ap.pdf>
- 9 Zhang Shuna, Luo Zhenyue, Shen Weidong *et al.*. Measurement of the group refractive index of bulk material using white-light spectral interferometry[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **60**(1): 368~374
张淑娜, 罗震岳, 沈伟东 等. 利用白光干涉技术测量块状材料的群折射率[J]. *物理学报*, 2010, **60**(1): 368~374
- 10 I. Gurov, M. Volkov. Fringe evaluation and phase unwrapping of complicated fringe patterns by the data-dependent fringe processing method[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2006, **55**(5): 1634~1640
- 11 P. Hlubina, J. Luňáček, D. Ciprian *et al.*. Windowed Fourier transform applied in the wavelength domain to process the spectral interference signals[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(9): 2349~2354
- 12 Hui Xue, Weidong Shen, Peifu Gu *et al.*. Measurement of absolute phase shift on reflection of thin films using white-light spectral interferometry[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(5): 446~448
- 13 P. Hlubina. White-light spectral interferometry to measure intermodal dispersion in two-mode elliptical-core optical fibres [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **218**(4-6): 283~289
- 14 C. H. Reinsch. Smoothing by spline function [J]. *Numer. Math.*, 1967, **10**(3): 177~183
- 15 Xue Hui, Shen Weidong, Gu Peifu *et al.*. Thickness measurement of thin film based on white-light spectral interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1877~1880
薛 晖, 沈伟东, 顾培夫 等. 基于白光干涉的光学薄膜物理厚度测量方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1877~1880
- 16 D. J. Bone, H. -A. Bachor, R. J. Sandeman. Fringe-pattern analysis using a 2-D Fourier transform [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(10): 1653~1660
- 17 C. Roddier, F. Roddier. Interferogram analysis using Fourier transform techniques [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **26**(9): 1668~1673
- 18 V. Laude. Noise analysis of the measurement of group delay in Fourier white-light interferometric cross correlation[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(5): 1001~1008
- 19 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
- 20 V. Pervak, M. Trubetskov, A. Tikhonravov. Robust synthesis of dispersive mirrors [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(3): 2371~2380

栏目编辑: 韩 峰