

飞秒脉冲钛宝石激光器中的低振荡高色散镜对

刘加^{1,3**}, 王胭脂^{1*}, 赵睿睿^{2,3}, 郭可升^{1,3}, 陈瑞溢^{1,3}, 齐红基¹,
朱美萍¹, 王丁², 易葵¹, 冷雨欣², 邵建达¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于高反射膜层和 Gires-Tournois(G-T)腔, 优化设计了一对低振荡高色散镜。该色散镜对的中心波长为 800 nm, 能够在 680~920 nm 的带宽范围内提供 -200 fs^2 的平坦的群延迟色散。基于双离子束溅射工艺, 利用 Nb_2O_5 和 SiO_2 制备了低振荡高色散镜对, 并将其应用于 800 nm 钛宝石激光器系统。通过高色散镜对 2 次, 100.8 fs 激光脉冲被压缩至 19 fs。

关键词 薄膜; 多层膜设计; 干涉薄膜; 脉冲压缩; 钛宝石激光

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1003001

Low Vibration and High Dispersion Mirror Pair in Femtosecond Pulsed Ti:sapphire Laser

Liu Jia^{1,3**}, Wang Yanzhi^{1*}, Zhao Ruirui^{2,3}, Guo Kesheng^{1,3}, Chen Ruiyi^{1,3},
Qi Hongji¹, Zhu Meiping¹, Wang Ding², Yi Kui¹, Leng Yuxin², Shao Jianda¹

¹Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Based on high-reflection layers and the Gires-Tournois (G-T) cavity, a low oscillation and high dispersion mirror pair is optimized and designed, whose central wavelength is 800 nm and which can provide a constant group delay dispersion of -200 fs^2 over a bandwidth of 680–920 nm. The low oscillation and high dispersion mirror pair is prepared by using Nb_2O_5 and SiO_2 based on the dual ion beam sputtering process, which is used in the 800 nm Ti:sapphire laser system. The laser pulse can be compressed from 100.8 fs to 19 fs when the pulse travels through the high dispersion mirror pair for twice.

Key words thin films; multilayer film design; interference film; pulse compression; Ti:sapphire laser

OCIS codes 310.4165; 310.1620; 320.5520; 140.3590

1 引言

随着自锁模技术的不断发展, 通过钛宝石激光器可以获得稳定的飞秒脉冲^[1-2]。飞秒激光脉冲具有极短的脉冲持续时间和超强的瞬时功率, 在超快

光谱学^[3-4]、材料处理^[5]、工业应用和医学诊断^[6-7]等研究领域发挥着重要作用。脉宽更窄、功率更高的激光器一直是飞秒脉冲钛宝石激光器研制的发展方向^[8], 其离不开精确的色散补偿^[9]。

色散镜可以在很宽的带宽范围内提供不同量级

收稿日期: 2018-02-11; 修回日期: 2018-03-28; 录用日期: 2018-05-03

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金(U1630140)、中国科学院青年创新促进会基金(2017289)、中国科学院创新基金(1708381X1)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB1603)

* E-mail: yanzhiwang@siom.ac.cn; ** E-mail: liujia2016@siom.ac.cn

的一阶色散、二阶色散及高阶色散的补偿^[10],在飞秒脉冲钛宝石激光器系统中具有非常广泛的应用。美国国立科罗拉多大学研究小组设计并制备出能够应用于可调谐锁模钛宝石激光器的负色散镜^[11],其在 800~900 nm 工作带宽内可提供 -40 fs^2 的群延迟色散(GDD)。意大利国家超快超强光学实验室设计并制备出的背面涂层啁啾镜^[12]能够在 600~900 nm 带宽范围内提供约 -36 fs^2 的群延迟色散,并应用于钛宝石激光器放大系统中。Pervak 等^[13]设计制备出的双角度啁啾镜能够在 550~1050 nm 带宽范围内提供约 -60 fs^2 的群延迟色散。Habel 等^[14]设计的宽带薄膜偏振器能够在 680~900 nm 带宽范围内提供 -150 fs^2 的色散补偿。近年来关于色散镜设计领域的研究基本上侧重于可见光及近红外波段^[10,15-16],研究者们希望能在工作波段内实现色散补偿量上的突破。但是,色散镜在提供高反射率和特定的色散补偿的同时存在着严重的非线性色散振荡^[17],色散振荡的存在将会破坏输出脉冲的形状^[18],为了减小和抑制这种破坏性,需要设计出群延迟色散曲线平坦的膜系。目前,运用于补偿中心波长为 800 nm 的钛宝石激光器的色散镜^[13-14,19]在小于 200 nm 工作带宽内的色散补偿量最大约为 -150 fs^2 ,色散补偿量更大的色散镜未见报道。

本文主要针对中心波长为 800 nm 的钛宝石激光器系统,研究设计了能够提供更大负色散补偿量的低振荡高色散镜对。基于高反射膜层和 Gires-Tournois(G-T)腔的组合,设计的低振荡高色散镜对的工作带宽能够达到 240 nm,并能够提供较平坦的 -200 fs^2 的负色散补偿量。这是目前所知能够应用于中心波长为 800 nm 的钛宝石激光器系统中,相同带宽范围内群延迟色散量最大且色散振荡较小的设计结果。高色散补偿量的色散镜对用于超短脉冲激光器系统中,可以在反射次数较少的条件下,获得有效的补偿量,减少系统的损耗,简化系统并增加高色散镜对使用的灵活性。此外,将制备出的低振荡高色散镜对应用于钛宝石激光器系统中。通过高色散镜对 2 次,100.8 fs 激光脉冲被压缩至 19 fs。

2 低振荡高色散镜对的设计

为了给中心波长为 800 nm 的钛宝石激光器系统提供约 -800 fs^2 的群延迟色散,故设定高色散镜对设计目标为:针对 p 偏振光, 5° 入射角,在 680~920 nm 波长范围内,群延迟色散能达到 -200 fs^2 ,

反射率 $R > 99.5\%$ 。选择 Nb_2O_5 和 SiO_2 分别作为高色散镜对的高、低折射率材料,基底为石英玻璃。 Nb_2O_5 和 SiO_2 材料的折射率由柯西公式给出:

$$n(\lambda) = A_0 + A_1/\lambda^2 + A_2/\lambda^4, \quad (1)$$

式中 n 为材料的折射率; λ 为波长,单位为 μm ; A_0 、 A_1 和 A_2 为柯西色散系数, A_0 为无量纲参数, A_1 、 A_2 的单位分别为 μm^2 和 μm^4 。两种材料的柯西公式参数如表 1 所示。

表 1 两种材料的柯西公式参数

Table 1 Cauchy parameters of two kinds of materials

Material	A_0	$A_1 / \mu\text{m}^2$	$A_2 / \mu\text{m}^4$
Nb_2O_5	2.157	0.036	0.002
SiO_2	1.442	1.162×10^{-2}	3.705×10^{-4}

高反射膜层和 G-T 腔可构成简单的色散镜结构,其中高反射膜层提供极高的反射率,G-T 腔能够储存能量并引入负色散补偿。如 $(\text{HL})^m (\text{HL})^n (\text{H}_x\text{LH})^m (\text{L}_x\text{HL})^m$ 所示的色散镜结构中^[20],H 和 L 分别为高、低折射率材料 Nb_2O_5 和 SiO_2 , x 为 G-T 腔的厚度, m 和 n 分别为周期数。根据优化目标,选择了合适的参数,并基于 $(\text{HL})^{10} (\text{HL})^8 (\text{H}1.5\text{LH})^{10} (\text{L}1.5\text{HL})^{10}$ 这一初始结构,进行后续的色散镜优化,采用这一初始结构可以保证在工作波长范围内具有非常高的反射率,并提供一定的负色散补偿。为了进一步解决带宽相对较窄和所提供的负色散补偿有限的问题,着重优化 G-T 腔部分和靠近空气的膜层,借助 OptiLayer 软件^[21]优化膜系结构,使得各项参数满足目标要求,最终得到了图 1(a)所示的高色散镜 1(HDM1),其对应的群延迟色散曲线和反射率曲线如图 2 中的黑色曲线所示。由图 2 可知,HDM1 的群延迟色散曲线在目标值 -200 fs^2 附近有规律地振荡,但是整体色散振荡波纹偏大,为了进一步减小色散振荡,在 HDM1 的基础上,优化设计了高色散镜 2(HDM2),其膜系结构如图 1(b)所示。

将优化得到的 HDM1 的群延迟色散曲线值 T_{HDM1} 关于群延迟色散平均值 $T_{\text{average}} = -200 \text{ fs}^2$ 作轴对称变换,将得到的新群延迟色散曲线值 $T_{\text{HDM2}} = 2T_{\text{average}} - T_{\text{HDM1}}$ 作为 HDM2 的优化目标。使用 OptiLayer 软件,利用 needle optimization 和 gradual evolution 算法^[22]进行优化,经过多次优化,选择制备容差最大的结果,得到最优化的 HDM2 结果,群延迟色散曲线及反射率曲线如图 2 红线所示。

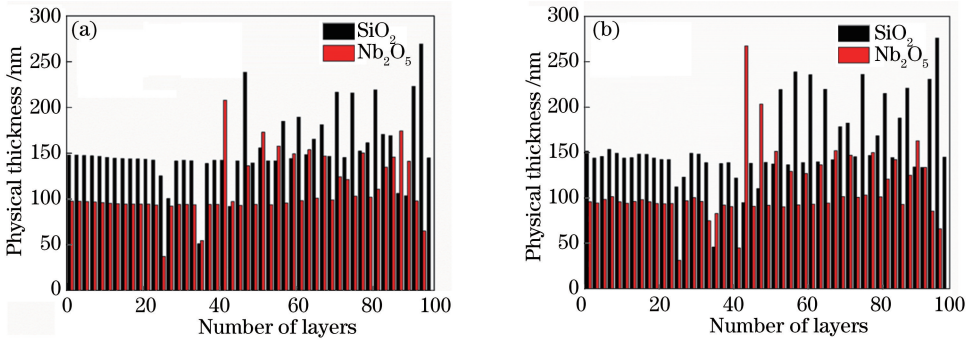


图 1 优化后的膜系结构图。(a) HDM1;(b) HDM2

Fig. 1 Structural diagrams of optimized films. (a) HDM1; (b) HDM2

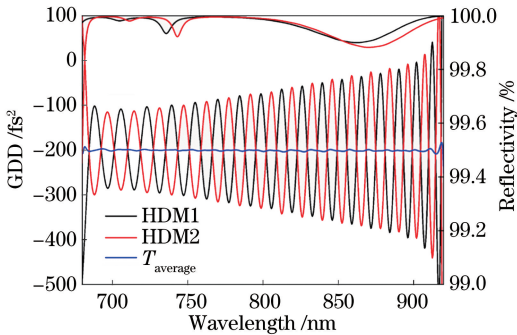
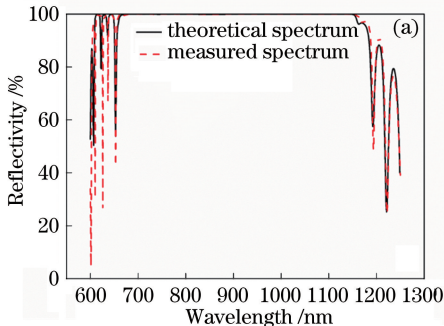


图 2 优化 HDMs 的群延迟色散曲线和反射率曲线

Fig. 2 Group delay dispersion and reflectivity curves of optimized HDMs

由图 1 可知:HDM1 由 95 层高、低折射率材料组成,总厚度为 12547 nm,最薄层厚 37.1 nm; HDM2 由 97 层高、低折射率材料组成,总厚度为 12914 nm,最薄层厚 31.2 nm。由图 2 可知, HDM1 的群延迟色散曲线振荡波峰与 HDM2 的群延迟色散曲线振荡波谷能够相互抵消,最终配对之后的群延迟色散振荡在 680~920 nm 范围内非常平坦,明显小于单个高色散镜的群延迟色散振荡波纹。低振荡高色散镜对的设计使得整个工作波长范围内的群延迟色散振荡非常小,能够更好地抑制高阶色散,有利于超短脉冲的输出。此



外, HDM1 和 HDM2 的反射率在 680~920 nm 范围内高于 99.8%,满足设计要求,能够最大程度地减小激光脉冲在色散镜膜层间反射时造成的能量损失。

3 低振荡高色散镜对的制备与测试

低振荡高色散镜对的色散特性对膜层厚度的制备误差较敏感,对薄膜制备过程的厚度控制精度要求高。采用双离子束溅射工艺^[23]对低振荡高色散镜对进行制备,制备过程稳定,具有精确的膜层厚度监控。测量了制备出的低振荡高色散镜对的光谱参数和色散值。

高色散镜对的光谱参数由美国 Perkin-Elmer 公司生产的 Lambda 1050 型紫外可见分光光度计测量得到,测量波长范围为 600~1250 nm。测得的 HDM1 和 HDM2 的反射率光谱曲线分别如图 3(a) 和 3(b)所示。从图 3 中可以看到,两个高色散镜的反射率曲线的测试值和理论值吻合较好,每个波峰都基本匹配,说明制备得到的高色散镜对的光谱性能良好,同时也证明了所得结果的准确性。

低振荡高色散镜对的色散性能采用自行搭建的白光干涉仪^[24-25]进行测量,图 4 所示为 820~864 nm 波长范围内的高色散镜对的群延迟色散振

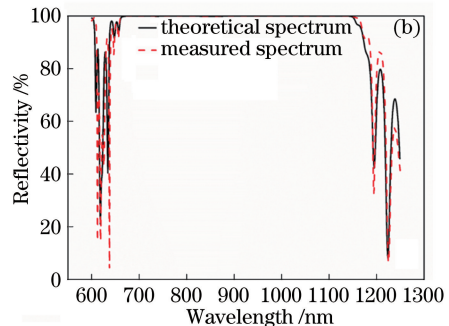


图 3 反射率曲线。(a) HDM1;(b) HDM2

Fig. 3 Reflectivity curves. (a) HDM1; (b) HDM2

荡曲线。从图 4 中可以看到, HDM1 和 HDM2 两个高色散镜的群延迟色散振荡曲线的振荡波峰和波谷互相匹配, 能够得到较为平坦的群延迟色散曲线, 这有利于进一步的应用实验。

4 低振荡高色散镜对的应用

将上述制备出的高色散镜对应用于钛宝石激光器中, 并采用自制的频率分辨光学开关方法(FROG)对输出的激光脉冲进行检测。低振荡高色散镜对应用的实验装置如图 5 所示。

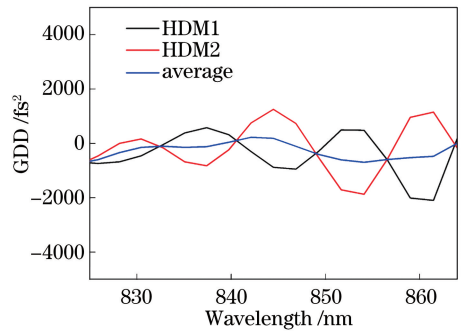


图 4 低振荡高色散镜对的群延迟色散测试结果

Fig. 4 Measurement results of group delay dispersion of low oscillation and high dispersion mirror pair

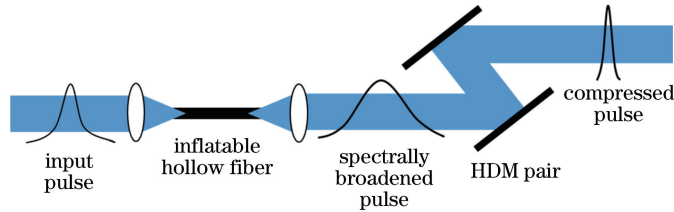


图 5 低振荡高色散镜对的应用实验装置图

Fig. 5 Experimental setup for application of low oscillation and high dispersion mirror pair

在低振荡高色散镜对应用实验中, 将中心波长为 800 nm、重复频率为 1 kHz 的钛宝石激光器输出的激光脉冲作为输入脉冲, 并耦合进充有 25 kPa 氩气的空芯光纤中, 利用光纤中的非线性效应对激光脉冲进行光谱展宽。展宽之后的激光脉冲通过低振荡高色散镜对, 低振荡高色散镜对提供负色散以补偿之前产生的正色散, 并对激光脉冲进行压缩。激光脉冲通过低振荡高色散镜对 2 次, 即在每个镜片上各反射 2 次, 高色散镜对提供 -800 fs^2 的负色散补偿, 最终得到带宽很窄的飞秒激光脉冲输出。图 6 所示黑色曲线是钛宝石激光器输出的激光脉冲, 为整个应用实验的输入脉冲, 它的半峰全宽(FWHM)为 100.8 fs; 红色曲线是经过低振荡高色

散镜对色散补偿后的压缩脉冲, 它的 FWHM 为 19 fs。实验结果表明, 所设计制备的低振荡高色散镜对能起到较好的色散补偿作用, 实现了飞秒激光脉冲的压缩。

5 结 论

设计和制备了一种能够应用于钛宝石激光器系统中的低振荡高色散镜对。采用 $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 高低折射率材料设计低振荡高色散镜对, 研究了色散镜结构设计对色散镜性能的影响。基于高反射膜层和 G-T 腔组合的这一初始结构, 设计了两个群延迟色散值相同但色散振荡曲线互补的色散镜对, 配对使用该色散镜对从而达到减小色散振荡波纹的效果。对比其他具有相同 240 nm 左右带宽的色散镜, 本设计具有更大的群延迟色散量和更低的群延迟色散振荡, 能够实现精确的色散补偿, 有利于超短脉冲的形成。高色散镜对的顺利制备使得 -200 fs^2 的大色散量的色散补偿元件成功应用于中心波长为 800 nm 的钛宝石激光器系统中。通过高色散镜对 2 次, 100.8 fs 脉冲被压缩至 19 fs。

合适的色散镜初始结构设计和恰当的参数设定使得后续的优化工作能够顺利并快速地进行。低振荡高色散镜对的成功设计、制备及应用, 为飞秒脉冲钛宝石激光器系统色散补偿元件性能的提升提供了有效帮

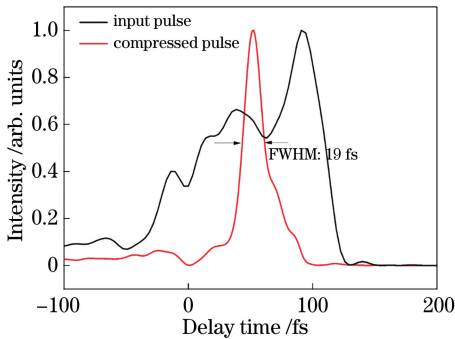


图 6 经过 2 次低振荡高色散镜对的压缩脉冲

Fig. 6 Compressed pulse after travelling through low oscillation and high dispersion mirror pair for twice

助。以此为基础,探索优化色散补偿器件的新方法,以改善飞秒脉冲钛宝石激光系统的色散补偿问题。

参 考 文 献

- [1] Rimington N W, Cornea A, Van Tassel A J, *et al.* Femtosecond Ti:Sapphire oscillator electro-optically cavity dumped at 50 kHz[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(27): 4831-4835.
- [2] Asaki M T, Huang C P, Garvey D, *et al.* Generation of 11-fs pulses from a self-mode-locked Ti:Sapphire laser [J]. *Optics Letters*, 1993, 18(12): 977-979.
- [3] Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 831-838.
- [4] Song Z M, Yang S, Gao H, *et al.* Intense femtosecond filamentation by superposed Gaussian beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0132001.
宋振明, 杨森, 高慧, 等. 叠加高斯光束超强飞秒成丝的研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0132001.
- [5] Kerse C, Kalaycioglu H, Elahi P, *et al.* Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses[J]. *Nature*, 2016, 537(7618): 84-88.
- [6] Sudmeyer T, Marchese S V, Hashimoto S, *et al.* Femtosecond laser oscillators for high-field science [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(10): 599-604.
- [7] Zhang Z X, Qu J L. Feature issue of "new techniques and progress in biomedical photonics" [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(2): 0207000.
张镇西, 屈军乐. “生物医学光子学新技术及进展”专题前言[J]. *中国激光*, 2018, 45(2): 0207000.
- [8] Ell R, Morgner U, Kartner F X, *et al.* Generation of 5-fs pulses and octave-spanning spectra directly from a Ti:Sapphire laser[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(6): 373-375.
- [9] Pervak V, Tikhonravov A V, Trubetskov M K, *et al.* 1.5-octave chirped mirror for pulse compression down to sub-3 fs[J]. *Applied Physics B*, 2007, 87(1): 5-12.
- [10] Pervak V, Razskazovskaya O, Angelov I B, *et al.* Dispersive mirror technology for ultrafast lasers in the range 220-4500 nm [J]. *Advanced Optical Technologies*, 2014, 3(1):55-63.
- [11] Golubovic B, Austin R R, Steiner-Shepard M K, *et al.* Double Gires-Tournois interferometer negative-dispersion mirrors for use in tunable mode-locked lasers[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(4): 275-277.
- [12] Sansone G, Steinmeyer G, Vozzi C, *et al.* Mirror dispersion control of a hollow fiber supercontinuum [J]. *Applied Physics B*, 2004, 78(5): 551-555.
- [13] Pervak V, Ahmad I, Trubetskov M K, *et al.* Double-angle multilayer mirrors with smooth dispersion characteristics[J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 7943-7951.
- [14] Habel F, Schneider W, Pervak V. Broadband thin-film polarizer for 12 fs applications [J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 21624-21628.
- [15] Amotchkina T, Fattahi H, Pervak Y A, *et al.* Broadband beamsplitter for high intensity laser applications in the infra-red spectral range[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16752-16759.
- [16] Tikhonravov A V, Trubetskov M K. Modern design tools and a new paradigm in optical coating design [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(30): 7319-7332.
- [17] Kärtner F X, Matuschek N, Schibli T, *et al.* Design and fabrication of double-chirped mirrors[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(11): 831-833.
- [18] Bellum J C, Field E S, Winstone T B, *et al.* Low group delay dispersion optical coating for broad bandwidth high reflection at 45° incidence, P polarization of femtosecond pulses with 900 nm center wavelength[J]. *Coatings*, 2016, 6(1): 11.
- [19] Niu H L, Zhang Y G, Shen W D, *et al.* Design of ultrabroadband double-chirped mirror pairs for ultrafast lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(1): 014211.
牛海亮, 章岳光, 沈伟东, 等. 飞秒激光器中超宽带色散补偿啁啾镜对的设计[J]. *物理学报*, 2012, 61(1): 014211.
- [20] Chen Y, Wang Y Z, Yi K, *et al.* High dispersive mirror design based on the symmetric cavity and Gires-Tournois cavity [C]. 2015 Academic Annual Meeting of Shanghai Laser Society, 2015: 147-148.
陈宇, 王胭脂, 易葵, 等. 基于对称腔和 Gires-Tournois 腔的高色散镜设计 [C]. 上海市激光学会 2015 年学术年会, 2015: 147-148.
- [21] Tikhonravov A V, Trubetskov M K, DeBell G W. Optical coating design approaches based on the needle optimization technique[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(5): 704-710.
- [22] Trubetskov M, Tikhonravov A, Pervak V. Time-domain approach for designing dispersive mirrors based on the needle optimization technique. *Theory* [J]. *Optics Express*, 2008, 16(25): 20637-20647.
- [23] Chen Y, Wang Y Z, Wang L J, *et al.* High dispersive mirrors for erbium-doped fiber chirped pulse amplification system [J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19835-19840.
- [24] Yang W J, Li J, Zhang F, *et al.* Group delay dispersion measurement of Yb:Gd₂SiO₅, Yb:GdYSiO₅ and Yb:LuYSiO₅ crystal with white-light interferometry [J]. *Optics Express*, 2007, 15(13): 8486-8491.
- [25] Amotchkina T V, Tikhonravov A V, Trubetskov M K, *et al.* Measurement of group delay of dispersive mirrors with white-light interferometer [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(5): 949-956.