

宽带啁啾镜对的设计和制备

王胭脂^{1)†} 邵建达¹⁾ 易葵¹⁾ 齐红基¹⁾ 王玓²⁾ 冷雨欣²⁾

1) (中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院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)

(2013年5月20日收到; 2013年7月10日收到修改稿)

设计了中心波长 800 nm 带宽约 500 nm 的啁啾镜对, 在 550—1050 nm 波长范围内提供约 -60 fs^2 群延迟色散 (group delay dispersion, GDD), 通过啁啾镜对的形式使 GDD 振荡波纹由单个啁啾镜的 $\pm 100 \text{ fs}^2$ 减小到 $\pm 20 \text{ fs}^2$. 采用双射频离子束溅射方法进行制备, 用白光干涉仪进行色散性能测试, 从测试结果可以看出, 制备的啁啾镜的反射率、GDD 性能和设计值符合得比较好. 制备出的 550—1050 nm 超宽带啁啾镜对在钛宝石激光器腔外进行色散补偿, 原输入脉冲由 24—27 fs 压缩到 12 fs, 这是国产超宽带啁啾镜对的首次应用.

关键词: 超快激光, 啁啾镜对, 群延迟色散, 色散补偿

PACS: 42.65.Re, 42.79.Wc, 78.66.-w

DOI: 10.7498/aps.62.204207

1 引言

随着激光脉冲压缩接近了单个光周期, 在超宽带工作带宽以及超宽带色散控制等激光薄膜科学与技术方面提出了全新的极端物理和技术的要求. 目前, 周期量级超快强场激光薄膜科学与技术已成为制约新一代周期量级超快强场激光发展的根本瓶颈之一, 成为当代重要的科学前沿问题与竞争热点.

啁啾镜^[1](chirped mirror, CM) 是一类新型介质膜, 作为一种强有力的色散补偿技术, 在超短脉冲激光器中发挥着极其重要的作用. 在超短激光技术的发展过程中, 啁啾镜的发明具有里程碑的作用, 超宽带低波纹的啁啾镜是 10 fs 以下超短脉冲激光器必不可少的色散补偿元件. 1994 年, 匈牙利固态物理研究所的 Szipöcs 等^[1] 首次提出了啁啾镜的概念, 并利用傅里叶分析方法设计出了用于更高级次群延迟色散 (group delay dispersion, GDD) 补偿的啁啾介质薄膜反射镜^[2]. 当带宽增加到 160—180 THz 时, 人们发现 GDD 振荡波纹也随之出现. 科学家通过不同的方法抑制色散的振荡: 双啁啾镜^[3-6]、背部镀膜啁啾镜^[7]、倾斜前表面啁啾镜^[8]、布鲁斯

特角入射啁啾镜^[9,10]、啁啾镜对^[11,12]等. 在众多的抑制宽带色散振荡的方法中, 啁啾镜对被证明是最有力和高重复性的方法. 啁啾镜对^[11,12]是使其中一个啁啾镜偏移半个振荡周期, 两个镜子的波纹正负值相抵消, 虽然每个镜子的振荡波纹很大, 但是两个镜子一起使用, 群延迟色散曲线就相对比较平滑. 因为不受基底和机械加工的影响, 这种方法越来越多地被用到超短脉冲的实验中, 成为近几年抑制色散振荡波纹的最主要的手段. 2007 年德国 Pervak 等^[13] 设计和制备出 1.5 个倍频程的啁啾镜对, 获得了 3 fs 的输出脉冲.

因为啁啾镜在提供高反射率的同时须提供一定量的色散补偿, 即连续地改变膜层的共振波长, 使整个反射镜在保持高反射率的同时, 给予不同波长以不同的延迟, 所以介质膜的设计为啁啾结构. 这种设计导致相位剧烈变化, 这种变化表现为色散剧烈变化, 而色散振荡是超快激光系统所不能容忍的, 必须通过啁啾镜成对补偿. 同时, 这种非规整膜系在制备上对膜层厚度误差非常敏感. 随着补偿带宽的增加, 使得获得平坦的群延迟色散的超宽带啁啾镜对在设计 and 制备上都面临很大挑战.

本文在原来 200 nm 带宽^[14]的基础上, 又设计、制备得到了波长范围 550—1050 nm 的啁啾镜

† 通讯作者. E-mail: yanzhiwang@siom.ac.cn

对, 测试结果表明制备得到的啁啾镜对和设计曲线相接近, 并且通过啁啾镜对的形式, 使振荡波纹由单个啁啾镜的 $\pm 100 \text{ fs}^2$ 减小到 $\pm 20 \text{ fs}^2$. 获得的啁啾镜对在腔外进行色散补偿实验, 获得了 12 fs 的脉冲压缩输出, 这是国产超宽带啁啾镜对的首次应用.

2 啁啾镜对的设计和制备

选择 SiO_2 作为低折射率材料, Nb_2O_5 作为高折射率材料. 首先根据膜层厚度调制法设计出满足一定反射率要求和位相要求的初始膜系. 因为啁啾镜必须在指定宽度的光谱范围内提供持续的高反射率和光滑的色散曲线, 同时满足这两个要求. 色散镜的评价函数通常定义为

$$F = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[v_i (R_{\lambda_i} - R_{\text{target}})^k + w_i (\text{GDD}_{\lambda_i} - \text{GDD}_{\text{target}})^k \right] \right\}^{1/k},$$

式中 $\lambda_i, i = 1, \dots, n$ 是目标值个数; $R_{\text{target}}, \text{GDD}_{\text{target}}$ 是波长点处反射率和群延迟色散的目标值; R_{λ_i} 和 GDD_{λ_i} 是反射率和 GDD 优化过程中波长点处的实际值; v_i 和 w_i 是对应反射率和 GDD 的权重; k 为 power 值. 用 Optilayer 软件进行优化, 最终获得图 1 所示的波长为 550—1050 nm 的啁啾镜设计结果. 啁啾镜在近 500 nm 的波长范围内 (中心波长 800 nm) 提供 -60 fs^2 的 GDD 和大于 99.5% 的反射率, 但是 GDD 振荡较大, 振荡幅度约 $\pm 100 \text{ fs}^2$. 啁啾镜的膜层结构和光学厚度如图 2 所示. 我们在原来 CM1 啁啾镜的基础上产生配对的啁啾镜 CM2, 形成的啁啾镜对的结果如图 3 所示, 振荡幅度得到有效的抑制, 可以达到 $\pm 20 \text{ fs}^2$.

超宽带啁啾镜对在沉积过程中对膜层厚度误差非常敏感, 0.5% 的误差都会使设计结果与制备结果发生偏离 [13]. 实验采用高稳定性和高精度的双射频离子束溅射镀膜机制备啁啾镜. 靶材 Nb 和 SiO_2 纯度达到 99.999%, Nb_2O_5 由溅射 Nb 靶材和 99.995% O_2 反应生成. 制备过程中真空度为 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$, 采用时间控制. 制备得到的啁啾镜通过分光光度计测量透射率, 如图 4 所示. 通过白光干涉仪测试 GDD (测试范围 700—1200 nm), 如图 5 所示. 可以看出, 制备的结果和设计值符合得比较好. 最终获得的啁啾镜对的结果如图 6 所示.

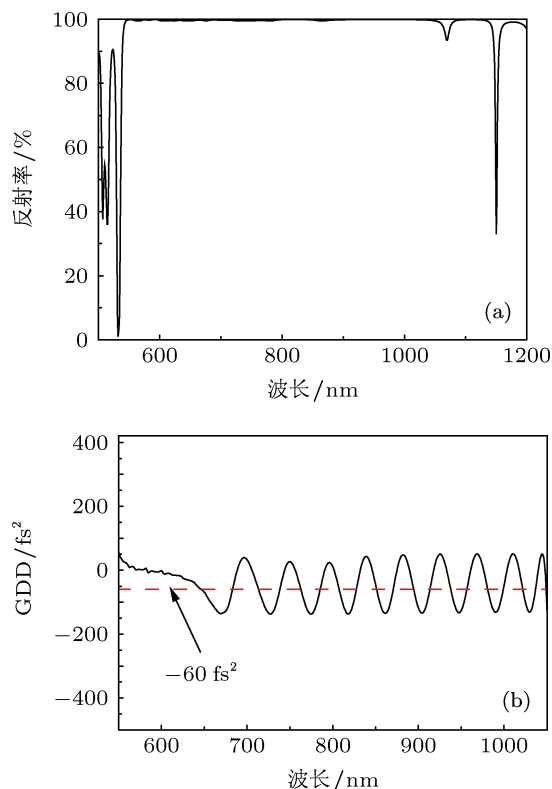


图 1 550—150 nm 啁啾镜的反射率 (a) 和 GDD (b)

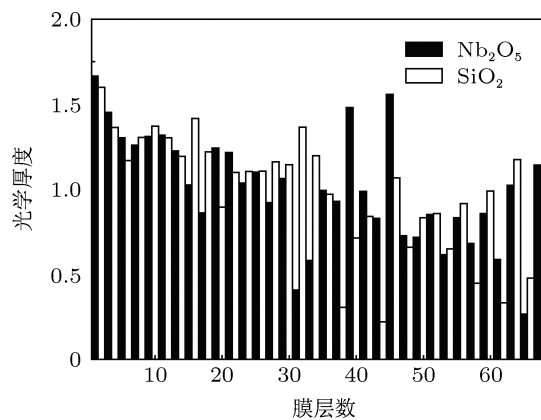


图 2 550—150 nm 啁啾镜 CM1 相应的膜层的光学厚度

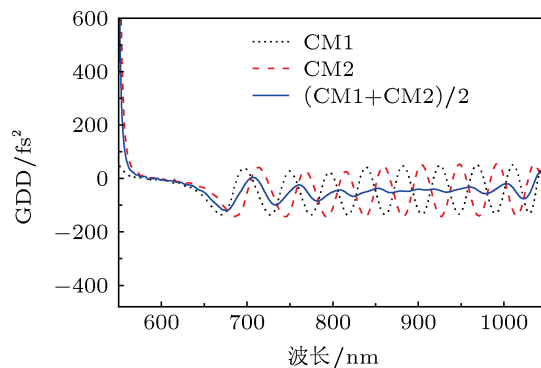


图 3 啁啾镜对

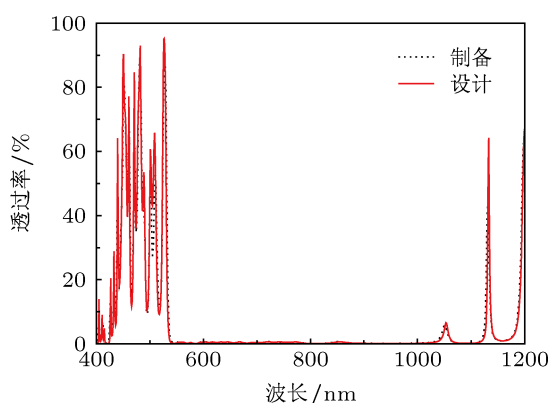


图4 啁啾镜的透射率

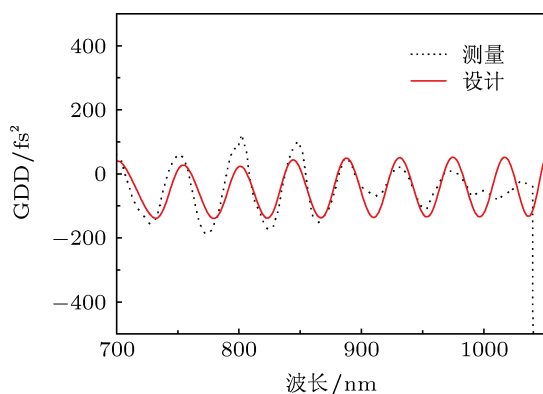


图5 啁啾镜 CM1 的 GDD

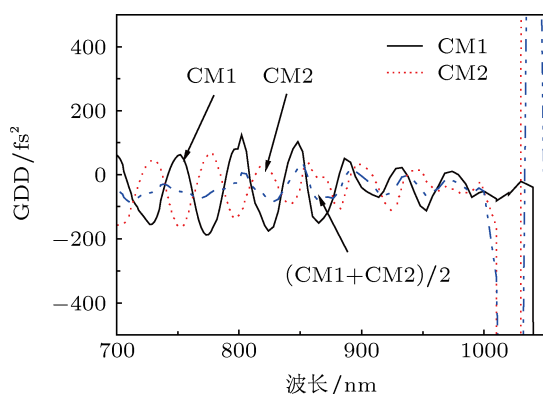


图6 啁啾镜对 (CM1+CM2)/2

3 钛宝石激光器腔外色散补偿

实验在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进行. 将制备得到的

啁啾镜对用于钛宝石激光器腔外脉冲压缩的色散补偿, 压缩前的脉冲宽度为 24—27 fs (如图 7 所示). 用设计和制备的 500 nm 超宽带啁啾镜对进行色散补偿, 在 550—1050 nm 的超宽带波长范围内提供约 -50 fs^2 的 GDD 和大于 99.5% 的反射率, 每个镜子反射一次, 两个镜子共进行两次色散补偿后, 原输入脉冲由 24—27 fs 压缩到 12 fs, 输出的脉冲如图 8 所示.

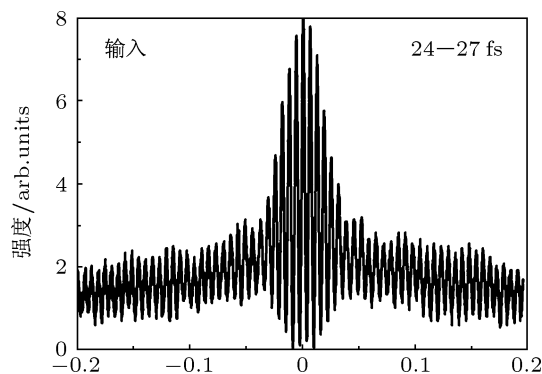


图7 入射脉冲形状, 脉宽约 24—27 fs

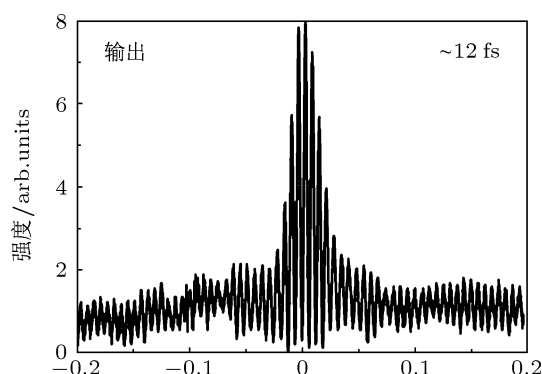


图8 经过啁啾镜对反射后的脉冲宽度

4 结论

通过啁啾镜对的形式抑制色散的振荡波纹, 啁啾镜对在 550—1050 nm 波长范围内 (中心波长 800 nm) 提供约 -60 fs^2 的 GDD 和大于 99.5% 的反射率. 利用离子束溅射制备出的近 500 nm 的超宽带啁啾镜对, 在钛宝石激光器中进行腔外色散补偿实验, 原输入脉冲由 24—27 fs 压缩到 12 fs. 这是国产超宽带啁啾镜对的首次应用.

- [1] Szipöcs R, Ferencz K, Spielmann C, Krausz F 1994 *Opt. Lett.* **19** 201
 [2] Szipöcs R, Köházi-Kis A 1997 *Appl. Phys. B* **65** 115
 [3] Kärtner F X, Matuschek N, Schibli T, Keller U, Haus H A, Heine C, Morf R, Scheuer V, Tilsch M, Tschudi T 1997 *Opt. Lett.* **22** 831
 [4] Matuschek N, Kärtner F X, Keller U 1997 *IEEE J. Quat. Electron.* **33** 295
 [5] Matuschek N, Kärtner F X, Keller U 1998 *IEEE J. Sel. Top. Quat. Electron.* **4** 197
 [6] Matuschek N, Kärtner F X, Keller U 1999 *IEEE J. Quat. Electron.* **35** 129
 [7] Matuschek N, Gallmann L, Sutter D H, Steinmeyer G, Keller U 2000 *Appl. Phys. B* **71** 509
 [8] Tempea G, Yakovlev V, Bacovic B, Krausz F, Ferencz K 2001 *J. Opt. Soc. Am. B* **18** 1747
 [9] Steinmeyer G 2003 *Opt. Express* **11** 2385
 [10] Baum P, Breuer M, Riedle E, Steinmeyer G 2006 *Opt. Lett.* **31** 2220
 [11] Sutter D H, Steinmeyer G, Gallmann L, Matuschek N, Morier-Genoud F, Keller U 1997 *Opt. Lett.* **24** 631
 [12] Kärtner F X, Morgner U, Ell R, Schibli T, Fujimoto J G, Ippen E P, Scheuer V, Angelow G, Tschudi T 2001 *J. Opt. Soc. Am. B* **18** 882
 [13] Pervak V, Tikhonravov A V, Trubetskov M K 2007 *Appl. Phys. B* **87** 5
 [14] Wang Y Z, Shao J D, Dong H C, Jin Y X, He H B, Yi K, Fan Z X, Song Y J, Hu M L, Chai L, Wang Q Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 018101 (in Chinese) [王胭脂, 邵建达, 董洪成, 晋云霞, 贺洪波, 易葵, 范正修, 宋有建, 胡明列, 柴路, 王清月 2011 物理学报 **60** 018101]

Design and fabrication of broadband chirped mirror pair

Wang Yan-Zhi^{1)†} Shao Jian-Da¹⁾ Yi Kui¹⁾ Qi Hong-Ji¹⁾
 Wang Ding²⁾ Leng Yu-Xin²⁾

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

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

(Received 20 May 2013; revised manuscript received 10 July 2013)

Abstract

The chirped mirror (CM) pair is designed to provide group delay dispersion (GDD) of around -60 fs^2 with bandwidth 500 nm at a central wavelength of 800 nm. The GDD oscillation decreases from $\pm 100 \text{ fs}^2$ to $\pm 20 \text{ fs}^2$. CM pair is fabricated using ion beam sputtering. The GDD is determined by using a white light interferometer. The measurement results show that the manufactured CM can meet our requirements. By balancing the extra-cavity dispersion with the fabricated chirped mirrors, the pulse 24–27 fs is compressed to 12 fs.

Keywords: ultrafast laser, chirped mirror pair, group delay dispersion, dispersion compression

PACS: 42.65.Re, 42.79.Wc, 78.66.–w

DOI: 10.7498/aps.62.204207

† Corresponding author. E-mail: yanzhiwang@siom.ac.cn