

文章编号: 0258-7025(2009)06-1563-06

Gires-Tournois 负色散镜误差分析

王胭脂^{1,2} 邵建达¹ 晋云霞¹ 黄建兵¹ 张伟丽¹ 董洪成^{1,2} 贺洪波¹ 范正修¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 负色散镜的色散补偿性能对设计和制备的精度要求都非常高, 折射率和薄膜物理厚度是其性能准确实现的必要参数。实验设计并镀制了 Gires-Tournois(G-T)镜, 结合电场强度分布及薄膜的群延迟色散(GDD)、扫描电镜的测量结果, 从材料折射率、膜层厚度、敏感膜层的变化及界面粗糙度等主要因素对 Gires-Tournois 镜群延迟色散性能的影响进行了分析。研究表明: 设计时采用的材料折射率要根据实际实验计算得到; 群延迟色散量随着总的膜层厚度和腔的厚度增加而增加; 电场强度的分布决定色散补偿能力及敏感膜层的位置, 最薄的膜层不一定是最敏感的膜层, 敏感膜层对沉积厚度控制精度要求非常高; 薄膜的界面粗糙度和不均匀性也是误差产生的重要原因。

关键词 薄膜; 负色散镜; Gires-Tournois; 误差分析; 群延迟色散; 折射率; 膜厚

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093606.1563

Error Analysis of Gires-Tournois Negative Dispersion Mirrors

Wang Yanzhi^{1,2} Shao Jianda¹ Jin Yunxia¹ Huang Jianbin¹ Zhang Weili¹

Dong Hongcheng^{1,2} He Hongbo¹ Fan Zhengxiu¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
(² Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The compensation of negative-dispersion mirrors has very high request on design and preparation. The refractive index and physical thickness are the necessary parameters for the realization of the capability. Negative-dispersion mirrors are designed and prepared, which are analyzed from the main factors such as material refractive index, thickness, the sensitive layers and interface roughness considering the electric field distribution and the measurement result of group delay dispersion (GDD) and the scanning electron microscope. The research indicates: the refractive index in the design should be calculated from the experiment; increasing the thickness of total film and the cavity introduces the higher GDD; the electric field distribution decides the position of the sensitive layers; the thinnest layer may not be the most sensitive layer; the sensitive layers request high deposition accuracy; interface roughness and inhomogeneity are both the important factors.

Key words thin films; negative dispersion mirrors; Gires-Tournois; error analysis; group delay dispersion; refractive index; thickness of films

1 引言

具有很高的峰值功率和超短的脉冲时间特性的飞秒激光在物理、化学和生物等领域有着广泛的应用前景^[1], 在飞秒脉冲产生过程中激光器输出脉冲宽度的关键技术是腔内群速度延迟色散的控制, 固体激光器增益介质在腔内产生的色散必须被补

偿^[2,3]。介质镜产生的负色散可以补偿增益介质产生的正色散, 成为一种有效的结构紧凑的色散控制元件被用于飞秒激光系统中^[4]。

目前主要有两种设计多层膜色散镜的方法^[4,5]。一种是啁啾镜^[3, 6~8], 通过调节不同波长的穿透深度, 使长波长在较深膜层反射而短波长在较

收稿日期: 2008-11-02; 收到修改稿日期: 2008-12-23

作者简介: 王胭脂(1981—), 女, 博士研究生, 主要从事超快激光系统中色散补偿薄膜方面的研究。

E-mail: yanzhiwang@siom.ac.cn

导师简介: 邵建达(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率激光薄膜、软 X 射线激光薄膜、激光对光学薄膜破坏机理、超薄膜生长特性、半导体材料特性等方面的研究。E-mail: jdshao@mail.shenc.ac.cn

浅膜层反射,来产生对不同波长的色散延迟。另一种是 Gires-Tournois (G-T) 镜^[2,8~10],在由顶层反射和底层高反射空间膜层形成的共振腔来获得群延迟色散(GDD),与啁啾镜相比,G-T 镜反射损耗小,色散量大,设计简单,对膜层沉积误差的敏感度小,经过优化的多腔 G-T 镜可以在较宽的脉冲范围内提供平坦的群延迟色散,并且可以通过减少或增加总的膜层数降低反射率来满足新的增益介质的使用^[3]或得到更高的反射率。

负色散镜相对其他光学薄膜而言对设计和制备的精度要求都高一些,设计过程中经常会出现一些很薄的膜层,制备过程中光控就不能很好地实现设计性能,因此镀膜过程中经常采用时间控制,对于时间控制来说,薄膜厚度和折射率是非常必要的参数^[11]。本文设计制备了 -100 fs^2 的 G-T 镜,研究了折射率、薄膜厚度、敏感膜层和界面粗糙度对薄膜负色散性能的影响。

2 设计

G-T 镜实际上是一个反射式干涉计,由高反射膜层、G-T 腔和部分反射膜层组成,G-T 镜的 GDD^[5,12] 为

$$f_{\text{GDD}} = \frac{d^2 \phi}{d\omega^2} = \frac{2t_0^2 \sqrt{R}(1-R)\sin \omega t_0}{(1+R-2\sqrt{R}\cos \omega t_0)^2} \quad (1)$$

式中 R 为部分反射膜堆的反射率, ω 为角频率, $t_0 = 2nd\cos \theta/c$, d 为 G-T 腔的厚度, θ 为介质折射角, c 为光在真空中的传播速度, n 为介质材料的折射率。

图 1 所示是设计的中心波长为 1035 nm 的 G-T 镜的多层膜结构,膜层厚度 20~900 nm,在 1015~1055 nm 波长范围内反射率大于 99.5%,提供 -100 fs^2 的 GDD(如图 2 所示),前 24 层是标准的 $\lambda/4$ 膜系,后面 6 层进行优化,第 26 层设置一个 G-T 腔。

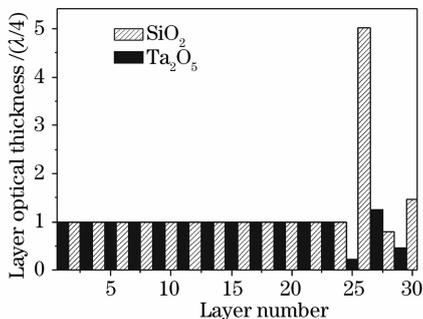


图 1 优化 G-T 镜的膜层厚度

Fig. 1 Optical thickness of the layers of the optimized Gires-Tournois mirror

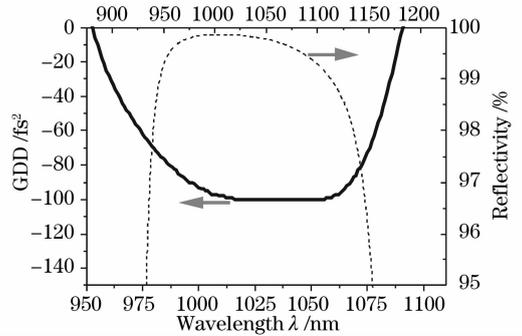


图 2 设计的群延迟色散和反射率值

Fig. 2 Designed group delay dispersion and reflectivity

3 误差分析

G-T 镜只有优化的膜层对沉积误差比较敏感^[10],我们从材料的折射率和 G-T 镜靠近入射介质的顶部 6 层的敏感度来进行分析,在设计过程中人为地引入随机误差,分析膜层制备时的折射率误差控制、膜厚误差控制和特殊敏感膜层的控制对色散性能的影响。

3.1 折射率误差对群延迟色散性能的影响

图 3(a)是 Ta_2O_5 和 SiO_2 折射率分别单独变化 $+1\%$, 0 , -1% 时对 G-T 镜群延迟色散性能的影响。 SiO_2 折射率变化与 Ta_2O_5 折射率变化对 GDD 的影响相反, SiO_2 折射率增加或 Ta_2O_5 折射率减小时,色散补偿能力降低, SiO_2 折射率减小或 Ta_2O_5

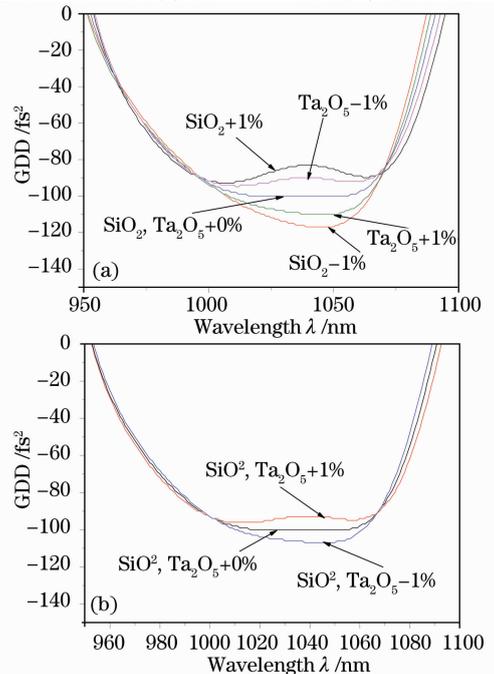


图 3 折射率变化对色散性能的影响

Fig. 3 Effect of refractive index on the group delay dispersion

折射率增加时,色散补偿能力增强,同时也可以看出低折射率材料对群延迟色散性能的影响要大于高折射率材料。图 3(b)曲线分别表示 Ta_2O_5 和 SiO_2 折射率同时均匀变化 $+1\%$, 0 , -1% 时对 G-T 镜群延迟色散性能的影响,可以看出折射率 1% 的变化就能使 GDD 曲线发生较大变形,折射率均匀变化 $+1\%$ 时色散补偿量减小,变化 -1% 时色散补偿量增加, GDD 偏离设计值 $\pm 5 \text{ fs}^2$ 。对于负色散镜,为了避免引入额外的色散误差,设计时折射率的取值必须尽可能准确,此次制备折射率的精度要控制在 1% 以内。

3.2 总膜厚误差对群延迟色散性能的影响

图 4 为薄膜所有膜层物理厚度均匀变化时 G-T 镜 GDD 的变化情况,图中曲线分别代表所有膜层厚度变化 $+2\%$, $+1\%$, 0 , -1% , -2% 。可以看出,膜层厚度均匀变化 $\pm 1\%$ 时, GDD 偏离设计目标值约 2% 即 $\pm 2 \text{ fs}^2$,膜层厚度均匀变化 $\pm 2\%$ 时, GDD 偏离设计目标值约 4% 即 $\pm 4 \text{ fs}^2$,每一层引入 $+1\%$, $+2\%$ 的随机误差,色散量增加并且向长波偏移,每层膜厚变化 -1% , -2% 时色散量减小并向短波偏移,色散变化量和偏移量与设计值成对称分布,这与 G-T 腔厚度变化储存电场强度的能力相关。从图 5 的电场强度分布可以看出,电场能量主要储存在 G-T 腔内,通过对(1)式分析可以得出,膜厚变化对反射率 R , $\sin \omega t_0$, $\cos \omega t_0$ 的影响非常小时,这些量近似为常数, GDD 与 t_0^2 成正比例变化,当折射角为 0° 时,即近似与 $(nd)^2$ 成正比例, G-T 腔厚度增加电场储存能力增强,色散补偿量增大。制备时每层膜厚变化应控制在 2% 以内,但对于这种情况,因

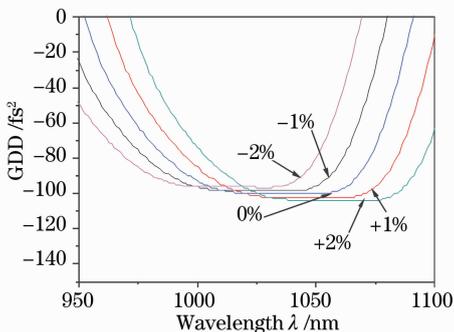


图 4 总的膜层厚度变化对色散性能的影响

Fig. 4 Effect of total layer thickness on the group delay dispersion

为每层膜厚产生同样的偏差即存在系统误差,可以通过调整中心波长来避免。

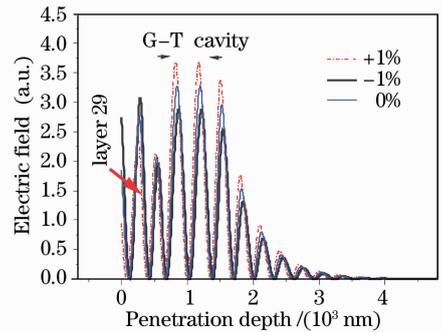


图 5 膜层厚度变化时的电场分布

Fig. 5 Electric field distribution as a function of layer thickness change

3.3 敏感膜层厚度变化对群延迟色散性能的影响

图 6 是膜层优化层中某一膜层厚度变化对 G-T 镜 GDD 的影响,从最外层 30 层到第 25 层引入 $+4 \text{ nm}$ 到 -4 nm 的随机误差,可以看出, GDD 曲线发生变形,产生高阶色散,特殊膜层厚度变化的影响要大于所有膜层厚度均匀变化对 GDD 的影响。对于这些膜层,第 29 层最敏感, 1 nm 的变化 GDD 曲线与设计值就偏离约 $\pm 6 \text{ fs}^2$,其次是第 30 层和第 28 层,第 26 层 G-T 腔厚度的变化对于 GDD 的影响相对较小,第 27 层的厚度变化影响最小,膜层最薄的 25 层不是最敏感的膜层。位于 G-T 腔前的 27 层是分水岭,30 层、29 层和 28 层厚度增加,长波处的色散补偿量减小短波处的色散补偿量增加,27 层、26 层、G-T 腔和 25 层正好相反,厚度增加长波处的色散补偿量增加短波处的色散补偿量减小,但所有这些膜层的色散偏移量都随着厚度变化量的增加而增加,且增加或减少量呈对称分布。通过电场的分析可以发现(如图 5、图 7 所示),除了 G-T 腔外,最敏感的 29 层分布电场能量最大,膜厚变化与电场强度变化成反比,膜厚减小时电场能量增加,膜厚不变时短波长的能量分布要大于长波长的能量分布,这与其他膜层的电场变化情况截然相反。误差分析表明,电场强度的分布决定了群延迟色散补偿性能和敏感层的分布,敏感膜层分布的电场强度较大,最敏感的膜层与其他膜层电场分布随厚度和波长的变化相反。制备过程中,对敏感膜层厚度控制的精度要求应该达到 1 nm 。

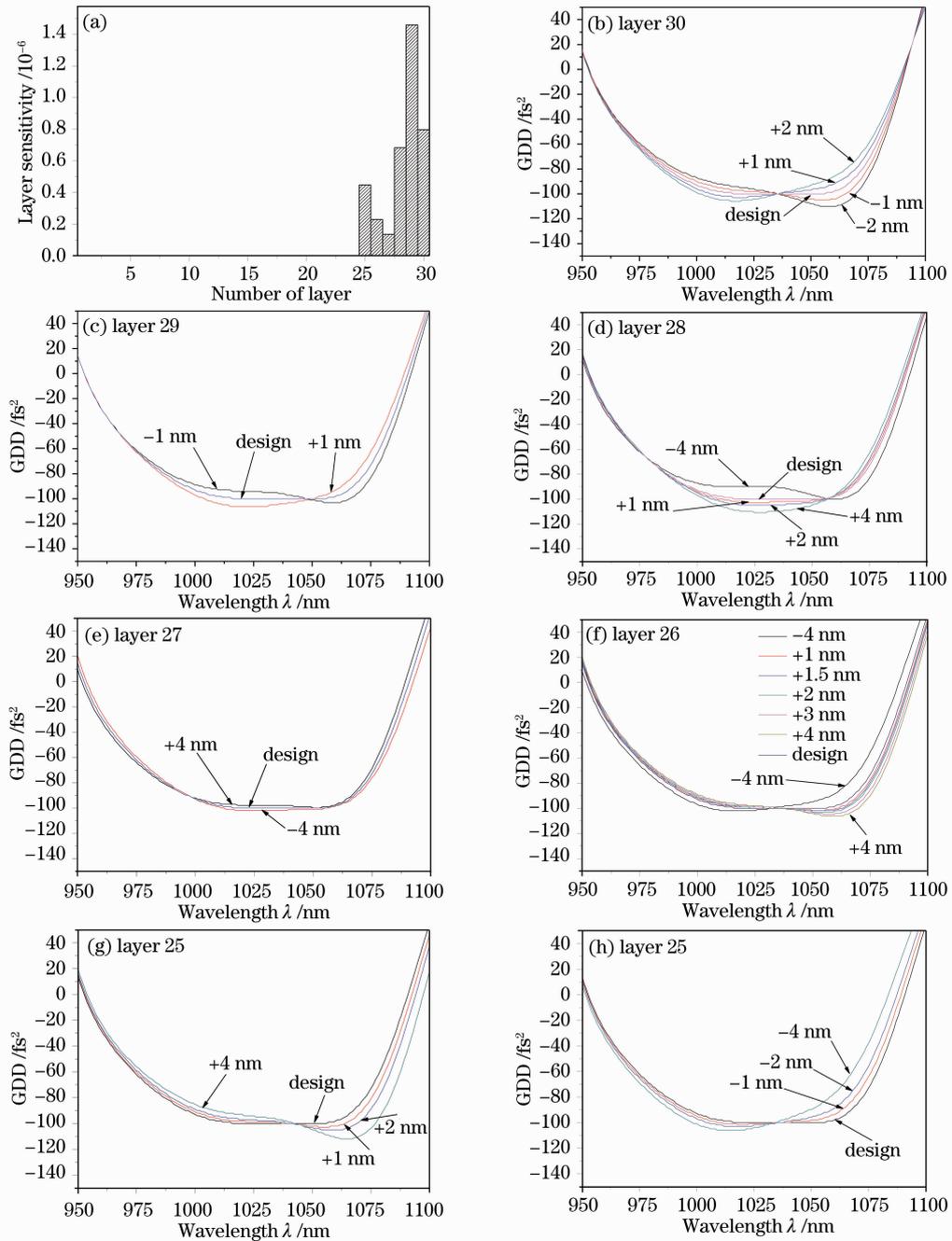


图6 敏感膜层厚度变化对色散性能的影响

Fig. 6 Effect of sensitive layer thickness change on the group delay dispersion

4 实验结果和讨论

采用双射频离子束溅射镀膜机制备 G-T 镜, 镀膜机有两个离子源, 其中溅射源产生氩离子束轰击靶材, 辅助离子源产生氩和 O_2 轰击靶材分子在基片上沉积。分别选择 Ta_2O_5 和 SiO_2 作为高 (2.45@1035 nm) 和低 (1.47@1035 nm) 折射率材料, 靶材 Ta 和 SiO_2 纯度达到 99.999%, Ta_2O_5 是溅射 Ta 靶材和 99.995% O_2 反应生成。制备过程中真空度

为 1×10^{-2} Pa, 烘烤温度 $80^\circ C$ 。

经过误差分析可知 G-T 镜的负色散性能对折射率的误差非常敏感, 为了保证设计时材料折射率的准确性, 所采用的折射率是制备前分别镀制 Ta_2O_5 和 SiO_2 的单层膜计算得出的, 折射率精度达到 10^{-2} 。通过膜厚误差分析可以看出, 设计的 G-T 镜对厚度误差的敏感度非常高, 敏感膜层 1 nm 的厚度误差就可能使色散曲线与设计值有很大偏离,

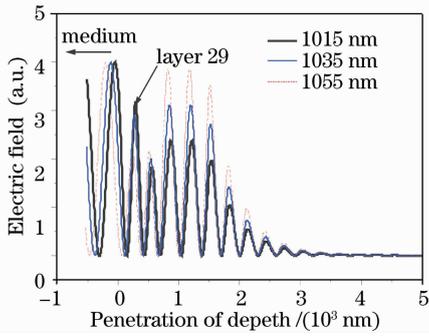


图 7 设计膜系在不同参考波长下的电场分布

Fig. 7 Electric field distribution in designed film at different reference wavelength

并且有二十几纳米的薄层出现,制备过程采用时间控制。

图 8 是制备的 G-T 镜的 GDD 和反射率的测量曲线,制备薄膜的负色散性能用白光干涉仪进行测试,反射率通过 Lambda900 光谱测试仪测量基片的透射率计算得到。可以看出反射率与设计值基本吻合,GDD 测量曲线和设计曲线之间有偏差,最大偏差 -25 fs²,长波方向色散补偿量偏小,短波方向色散补偿量偏大。测量结果说明,G-T 镜的群延迟色散补偿性能对实际镀制过程中误差更敏感,相对反射率来说能允许的误差范围更小,厚度误差是造成 GDD 结果偏差的主要原因。误差分析中特殊膜层要达到 1 nm 的控制精度,那制备出来的薄膜每层膜厚尤其是敏感层的实际厚度值的确定就非常重要。

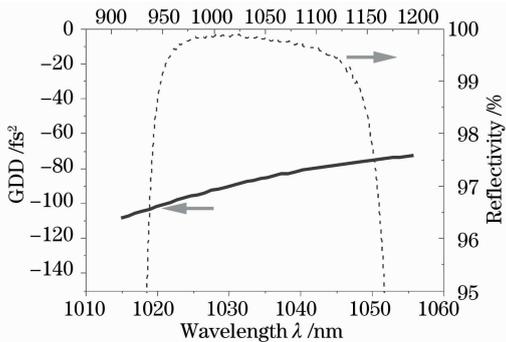


图 8 测量的 GDD 和反射率值(反射率=1-透射率)

Fig. 8 Measured GDD and reflectivity

(Reflectivity=1-transmission)

图 9 是通过扫描电镜从薄膜的横截面来估测敏感膜层厚度,反复估测 15 次取平均值,图 10 是膜层偏离设计值,图 11 是白光干涉测得 GDD 值 a 和横截面扫描电镜测量厚度反演 G-T 镜得到 GDD 值 b 的比较。虽然离子束溅射沉积比较致密,但是从图 9 可以看出,不同的材料在交界处仍有渗透,存在界面粗糙度和折射率不均匀性,扫描电镜虽然测量精

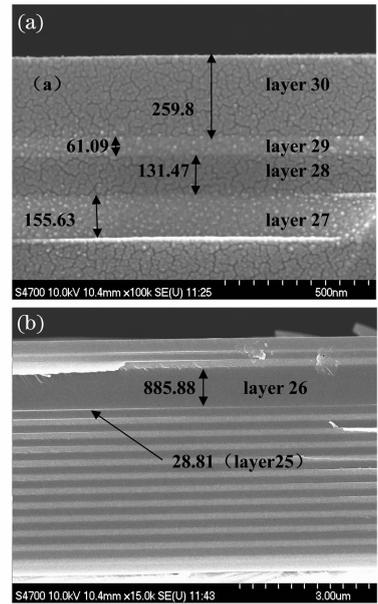


图 9 膜层截面(nm)

Fig. 9 Cross-section of the film (nm)

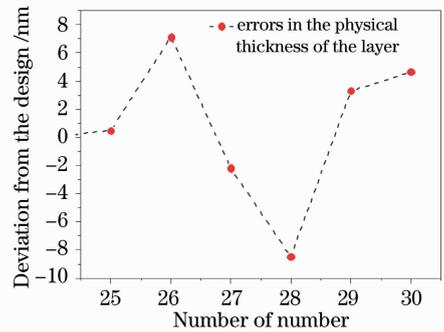


图 10 膜层偏离值

Fig. 10 Deviation from the designed layer thickness

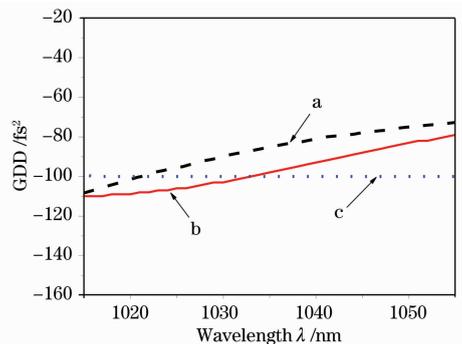


图 11 a: 白光干涉仪测量 GDD;b: 根据膜层测量厚度拟合 GDD;c: 设计 GDD

Fig. 11 a: Measured GDD using white-light interferometer; b: fitted GDD using the measured thickness of layer; c: GDD of the designed mirror

度和每层实际膜厚的值有偏差,但仍可以看出测量的膜厚进行反演的结果和实际的白光干涉仪测试结果相趋近,为分析薄膜镀制厚度误差提供了一些参

考。同时也可以看出,由于材料界面处的相互渗透和界面粗糙度的存在,实际镀制的薄膜厚度不可能与设计的理想的膜厚完全相吻合,这也是造成薄膜性能误差的原因之一。在实际的镀膜过程中,更换靶材时离子源关闭再重新启动,沉积速率有一个从零变化到设定值的过程,沉积过程中沉积速率也会在设定值附近有零点几纳米的波动,并且制备过程中所用夹具因为旋转和震动,也会影响到膜层厚度的均匀性。因此,设计这类复杂的膜系,制备前要对设计膜系进行误差分析,使膜系能有更大的误差允许范围,同时结合实际的镀膜设备和条件,提出制备精度要求,此外还要优化制备工艺提高制备控制精度,尽量减少膜厚监控误差和测量误差。

5 结 论

通过对设计和制备的 -100 fs^2 G-T 负色散镜的误差分析可知,材料折射率的变化、敏感膜层厚度的变化对群延迟色散性能的影响要大于所有膜层厚度均匀变化的影响。设计时采用的折射率要根据制备时所用材料镀制的单层膜计算得到。所有膜层厚度均匀变化时,对于单腔 G-T 镜,GDD 近似与 t_0^2 成正比变化,膜层和 G-T 腔厚度增加色散补偿能力增强。群延迟色散对厚度沉积误差非常敏感,最敏感膜层电场能量分布大、电场变化与其他膜层电场强度随厚度和波长的变化相反。同时界面粗糙度和不均匀性也是误差产生不可忽略的因素。误差分析为实际制备过程提供了精度控制范围,也为镀制结果提供了解释依据,同时可以看出,为了得到高质量的负色散镜一是要所设计的膜系能允许更大的误差,二是不断完善制备工艺提高控制精度。

参 考 文 献

- 1 Li Guowei, Zhou Changhe, Dai Enwen. Splitting of femtosecond laser pulses by using a Dammann grating and compensation gratings[J]. *Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**(4): 767~772
- 2 Sun Hong, Zhang Zhigang, Chai Lu *et al.*. Optimized Gires-Tournois mirrors used in mode-locked femtosecond Ti:sapphire lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(11): 1384~1387
孙虹,张志刚,柴路等.用于飞秒脉冲锁模激光器中的优化 Gires-Tournois 反射镜[J]. *光学学报*, 2001, **21**(11): 1384~1387
- 3 R. Szpöcs, A. Köházi-Kis. Theory and design of chirped dielectric laser mirrors[J]. *Appl. Phys. B*, 1997, **65**: 115~135
- 4 P. A. Kholokhonova, G. V. Erg. Method for caluating a negative-dispersion resonator-type multilayer mirror [J]. *Quantum Electron.*, 2005, **35**(11): 1053~1056
- 5 Liao Chunyan, Wu Zubin, Fan Zhengxiu *et al.*. Negative dispersion mirrors in $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ for femtosecond Ti:sapphire lasers by using Gires-Tournois interferometers[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(6): 1443~1445
- 6 Chunyan Liao, Jianda Shao, Jianbing Huang *et al.*. Newly designed multilayer thin film mirror for dispersion compensation in Ti:sapphire femtosecond lasers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(2): 122~124
- 7 Günter Steinmeyer. Femtosecond dispersion compensation with multilayer coatings: toward the optical octave[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(7): 1484~1490
- 8 R. Szpöcs, A. Köházi-Kis, S. Lakó. Negative dispersion mirrors for dispersion control in femtosecond lasers: chirped dielectric mirrors and multi-cavity Gires-Tournois interferometers [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **70**(suppl.): S51~S57
- 9 Wu Zubin, Wang Zhuan, Liao Chunyan *et al.*. Generation of 15 fs pulses from Ti:sapphire laser with optimized Gires-Tournois mirrors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 216~219
吴祖斌,王专,廖春艳等.钛宝石激光器中用优化 Gires-Tournois 镜产生 15 fs 脉冲[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 216~219
- 10 B. Golubovic, R. R. Austin, M. K. Steiner-Shepard *et al.*. Double Gires-Tournois interferometer negative-dispersion mirrors for use in tunable mode-locked lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(4): 275~277
- 11 V. Pervak, A. V. Tikhonravov, M. K. Trubetskov *et al.*. 1.5-octave chirped mirror for pulse compression down to sub-3 fs[J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **87**: 5~12
- 12 Jurgen Kuhl, Joachim Heppner. Compression of femtosecond optical pulses with dielectric multilayer interferometers [J]. *IEEE. Trans. Quantum Electron.*, 1986, **22**(1): 182~185