

钛宝石飞秒激光器用色散补偿 Gires-Tournois 镜的研究*

马群¹⁾ 章岳光^{1)†} 沈伟东¹⁾ 罗震岳¹⁾ 张青²⁾
张淑娜¹⁾ 叶蓬²⁾ 袁文佳¹⁾ 刘旭¹⁾ 魏志义²⁾

1) (浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

2) (中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京 100190)

(2010年4月14日收到; 2010年5月4日收到修改稿)

根据钛宝石飞秒激光器的色散补偿要求设计了单次反射平均补偿量为 -60 fs^2 的 GT(Gires-Tournois) 镜, 采用离子束辅助沉积技术结合光学监控技术制作了器件. 用分光光度计对 650—950 nm 波段薄膜反射率进行测试, 结果表明反射率测试曲线与设计曲线十分符合, 同时利用白光干涉系统对群延迟色散进行了测试, 测试结果与设计符合得很好, 实际的色散曲线振荡基本控制在 $\pm 20 \text{ fs}^2$ 以内. 应用该 GT 镜进行钛宝石飞秒激光系统的色散补偿, 取得了很好的锁模效果, 得到了 29 fs 的超短脉冲.

关键词: 色散补偿, 钛宝石飞秒激光器, GT 镜, 离子束辅助沉积

PACS: 78.66.-w, 42.65.Re, 07.30.Kf

1. 引言

超短脉冲激光在时间光谱分辨术、精细材料加工以及超宽带通信等方面有着广泛的应用^[1]. 自 1991 年 Spence 实现钛宝石激光器飞秒脉冲输出以来, 国内外在钛宝石飞秒激光器的结构设计、器件改进和实际应用等方面取得了飞速发展^[2-4]. 在飞秒激光运行的过程中, 腔内的色散补偿是影响激光脉冲宽度的关键因素^[5]. 传统的色散补偿方式, 例如棱镜对和光栅对, 能够对材料色散进行大量的补偿, 但是它们本身的补偿特点决定了它们的补偿带宽仅有 100 nm 左右^[6,7]. 而色散补偿镜补偿带宽大, 对高阶色散可以精确补偿且容易放置, 因此从 1994 年提出色散补偿镜以来已经取得了很大的发展^[6,8-10], 成为亚 10 fs 激光器中的必备元件. 目前德国的 Pervak 等^[11] 已经设计出色散补偿带宽达到 1.5 个倍频程的啁啾镜对, 将飞秒激光的脉冲宽度压缩到 3 fs 内.

色散补偿镜通常分为两大类: 啁啾镜与 Gires-

Tournois(GT) 镜^[12]. 啁啾镜的优点是能够在较长的光谱范围内提供色散补偿, 国内已经开展了应用啁啾镜进行飞秒激光色散补偿的研究^[13], 但是由于啁啾镜有大量非规整膜层, 因此制备较难. 而 GT 镜的优点是色散补偿量大, 非线性振荡小, 并且大部分的膜层都是规整的 $\lambda/4$ 高反对, 相对啁啾镜而言, 制备难度较小, 容易加工出符合实际要求的膜系. 但是, GT 镜的缺点是补偿带宽较窄, 通常情况下只有 100 nm 左右, 因此限制了其在宽带激光系统上的应用.

本文对经典的 GT 腔结构进行了改进, 优化设计出 700—900 nm 范围内补偿量达 -60 fs^2 的色散补偿镜, 并且利用离子束辅助沉积方法制备了该色散补偿膜系, 应用白光干涉系统进行了群延迟色散曲线的测试, 实测结果与设计值相符合. 最后样品应用于实际的钛宝石飞秒激光系统, 进行了测试, 取得了很好的锁模效果.

2. GT 镜的优化设计与制备

GT 腔由分立在间隔层两侧的两个反射镜组成,

* 国家自然科学基金(批准号:60708013,60608014)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: zhangyueguang@zju.edu.cn

然而不同于 Fabry-Perot 腔,构成 GT 腔的两个反射镜并不对称,其中一个为高反镜($R = 100\%$),另一个为部分反射镜($R < 100\%$).光在传播过程中会产生腔内的谐振效应,在短波方向引入负色散,而在长波方向上引入正色散^[10].但是通常情况下,单 GT 腔的补偿带宽较窄,一般只有 100 nm 左右,因此如果想补偿更大的带宽,必须将多个 GT 腔结构进行串联,成为一个多腔 GT 镜.

800 nm 中心波长的激光在 1 mm 的掺钛蓝宝石晶体中传输所产生的二阶群速度色散约为 58 fs^2 .为了补偿晶体的正色散,设计的膜系在 700—900 nm 波长范围内单次反射需要提供 -60 fs^2 的群延迟色散补偿量,同时还要保证 700—900 nm 波长范围内具有较高的反射率.为此,采用中心波长为 800 nm 的三个 GT 腔串联的结构,同时对高反对进行了串联以扩展高反带宽.采用的薄膜材料为 Ta_2O_5 和 SiO_2 ,整个膜系共 40 层.设计的初始结构为

Sub/1.1(HL)⁵(HL)⁴0.95(HL)⁵H2.2LHLH2 LHLH2LHL/空气.

整个结构共 40 层,前面部分为三个高反射对的串联结构,以扩展反射带宽,而 30,34 和 38 层作为腔结构,以引入负色散,得到初始结构的反射率及群延迟曲线如图 1 所示.

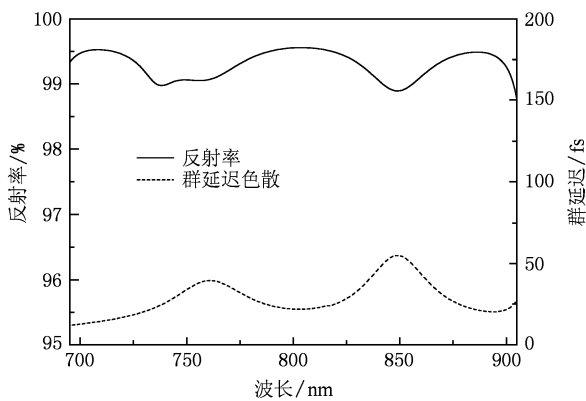


图 1 初始结构的反射率及群延迟设计曲线

从图 1 可以看出,由于引入了三个 GT 腔的串联,因此各个腔的群延迟在 700—900 nm 波长范围内叠加,同时引入了负色散.并且,群延迟曲线较平缓,这预示着群延迟色散曲线经过优化后也会比较平缓,非线性振荡较小.同时,由于对高反对也采用了串联结构,由此扩展了反射带宽,因此初始结构在 700—900 nm 也具有较高的反射率.

我们使用 TFCalc 软件对初始结构进行了优化,

采用 needle 和 gradual 算法^[14,15].最后得到优化的膜系结构如图 2 所示.

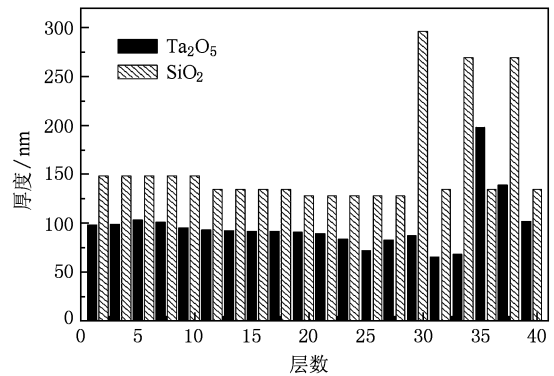


图 2 优化后的膜系结构

从图 2 可以看出,经过优化的膜系,靠近基板的膜层基本上仍然是标准的 $\lambda/4$ 膜系结构,而整个膜系总厚度为 5129.97 nm,最薄层为 66.2 nm,没有极薄层,因此制备较容易.

优化后的反射率及群延迟色散曲线如图 3 所示.

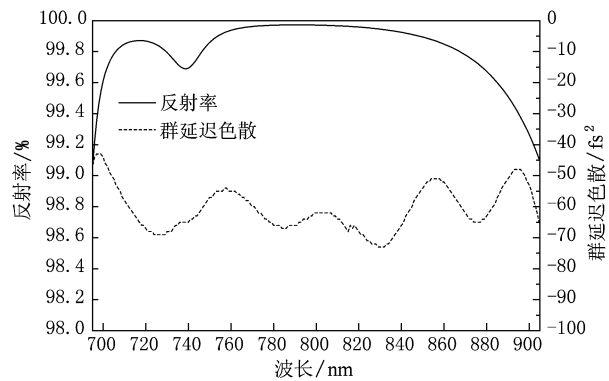


图 3 优化后的群延迟色散和反射率曲线

从图 3 可以看出,优化后的 GT 镜在 700—900 nm 范围内的反射率大于 99.5%,这样有效地保证了激光通过 GT 镜的反射后能量损失非常小,且群延迟色散(GDD)曲线的振荡在 $\pm 10 \text{ fs}^2$ 以内,较为平缓,可以避免因不同波段补偿量差距过大导致无法实现锁模,因此该膜系能够满足飞秒激光系统色散补偿的要求.

因为色散补偿镜的 GDD 曲线对制造误差十分敏感,我们对设计的膜系结构进行了容差分析.采用 Optilayer 软件,取膜系每层厚度 1% 偏差的均方根作正态分布,作为每层厚度的改变量,随机循环 100 次,取置信区间为 68%,所得的误差曲线如图 4

所示.

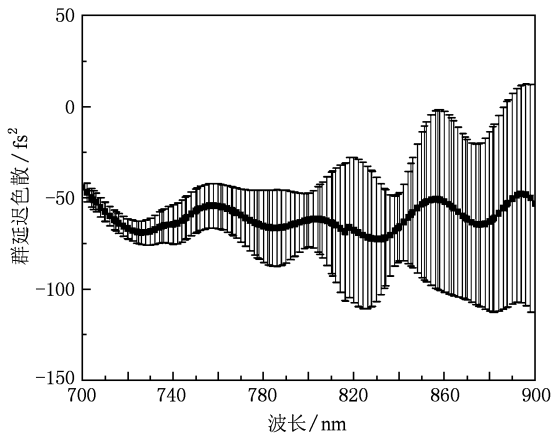


图4 容差分析曲线

从容差曲线上看,在考虑误差的情况下,GDD的补偿曲线会呈现一定的波动,而且长波段方向的偏差较大,因此在制备过程中,我们有必要选择精度高的监控方式.

制备色散补偿镜最常用的技术是离子束溅射和离子束辅助沉积^[16].双离子束溅射制备光学薄膜有着成本高、均匀性差、沉积速度低的缺点,而离子束辅助沉积技术成膜速率快、均匀性好,已经成为常规的蒸发技术.因此在实际制备过程中,我们选用了离子束辅助沉积技术.

膜系的制备在日本 Oporun 公司的 OTFC 镀膜机上进行,采用光学监控的方法控制膜层的厚度,同时用石英晶振法控制薄膜的沉积速率.光学监控对于膜厚误差有自动补偿机制,能反映反射率、透射率等光学信息,易于监控多层膜,尤其适用于监控较厚的膜层^[17].因为色散补偿镜较厚,总厚度超过了 5000 nm,因此采用光学监控的方法会有比较好的效果.基板选择直径为 30 mm,厚度为 3 mm 的石英基板.选择较厚的基板是为了减少薄膜应力对于基板面形的影响.

在实际制备中,基片的温度控制在 150 °C,本底真空为 5×10^{-4} Pa.对于 Ta₂O₅ 材料,镀制速率为 5 A/s,镀膜时真空度为 2×10^{-2} Pa;对于 SiO₂ 材料,镀制速率为 10 A/s,镀膜真空为 1.2×10^{-2} Pa.离子束的电压为 800 V,束流为 1000 mA.相关的工艺参数经过多年生产实践优化而来,因此保证了膜系的加工质量.

3. 测试结果

用日立 U4100 分光光度计(采用 V-W 法测试)对所镀薄膜的反射率进行了测试,测试结果如图 5 所示.

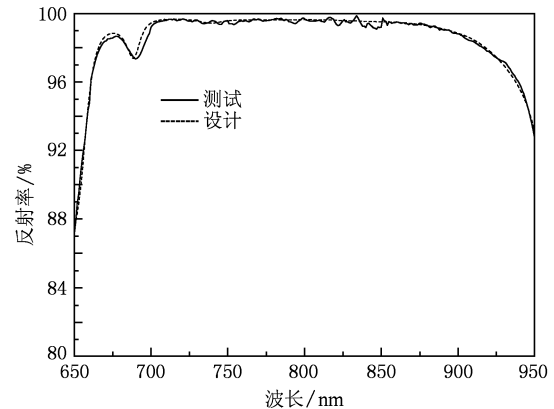


图5 膜系的反射率测试曲线

从图 5 可以看出,反射率测试曲线与设计曲线基本符合,说明了离子束辅助沉积技术的加工精确度是很高的.

样品的群延迟色散曲线是在实验室自行搭建的白光干涉测试系统上测试的^[18].该系统为一个频域的迈克耳逊干涉仪,它记录能量的干涉条纹,采用傅里叶变换求解相位信息后,二次求导获得薄膜的群延迟色散,测试结果如图 6 所示.

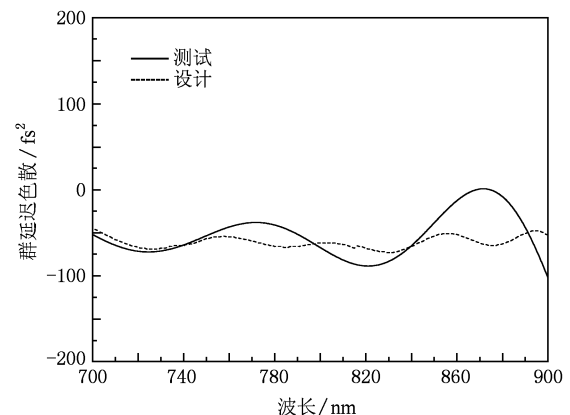


图6 群延迟色散测试结果

从图 6 看出,实际测试的群延迟色散曲线比设计曲线的振荡要大,这主要是由于色散补偿镜的容差较小,镀膜过程中不可避免的会引入厚度误差,导致实际的测试曲线与设计曲线并不能够完全

符合.

实际制备的 GT 镜在中国科学院物理研究所 80

MHz 钛宝石激光振荡器上进行了锁模试验,实际的钛宝石飞秒激光系统如图 7 所示.

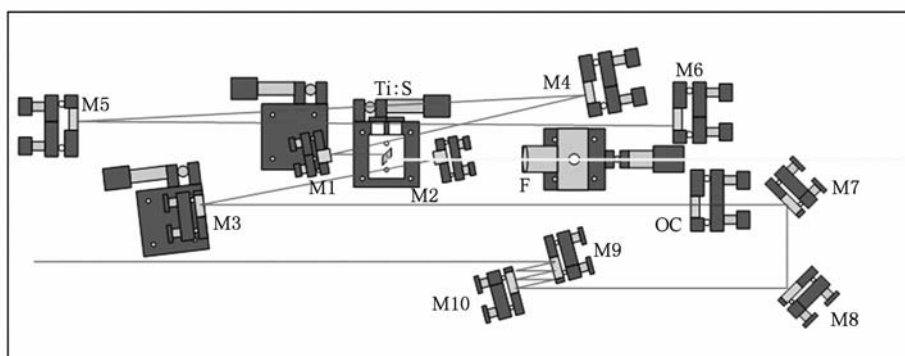


图 7 钛宝石激光振荡器示意图

系统由 532 nm 连续激光抽运、M1—M6 及 OC 作为整体构成了 Z 形腔, M1, M2 为凹面宽带高反射镜, M3—M5 为平面啾啾镜, 各镜单次反射平均色散补偿量为 -40 fs^2 . M6 采用我们加工的 GT 镜, 单次反射补偿 -60 fs^2 色散量. 800 nm 中心波长的激光在空气中传输 1 m 所产生的二阶群速度色散约为 21.3 fs^2 , 在 1 mm 的掺钛蓝宝石晶体中传输所产生的二阶群速度色散约为 58 fs^2 . 激光在腔内一次运行要两次通过 2 mm 钛宝石, 引起的正色散为 232 fs^2 , 加上在空气中传输引起的色散, 大约在 295 fs^2 左右. 激光传输中被 M3, M4, M5 反射两次, 被 M6 反射一次, 总的色散补偿量约为 -300 fs^2 , 这样可以维持腔内一定的负色散, 有利于稳定锁模.

换上 M6 镜之后, 经过简单的调节, 就可以得到稳定的锁模效果. 得到的光谱图如图 8 所示.

从输出光谱曲线可以看出明显的锁模效果, 锁

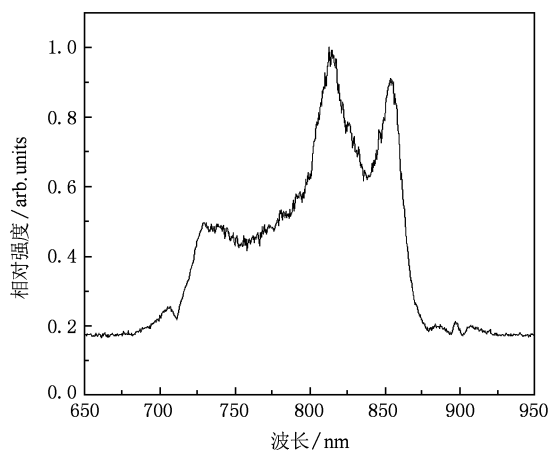


图 8 输出光谱曲线

模光谱宽度约为 85 nm. 激光输出脉冲宽度约为 29 fs, 自相关曲线如图 9 所示. 这说明设计的 GT 镜满足了设计要求, 与其他色散补偿镜配合, 能够取得良好的锁模效果和稳定的激光输出脉冲.

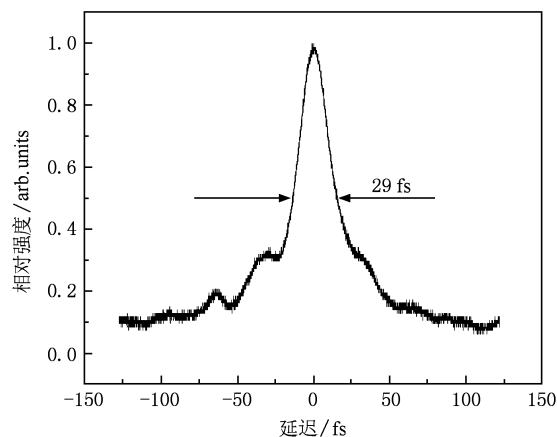


图 9 自相关曲线

4. 结 论

根据钛宝石飞秒激光系统的色散补偿要求设计了在 700—900 nm 波段单次反射补偿量为 -60 fs^2 的 GT 镜, 使用离子束辅助沉积方式和光学监控进行了实际制备. 对反射率和群延迟色散曲线进行测量, 测试结果与设计十分符合. 该 GT 镜应用于实际钛宝石飞秒激光器系统, 取得了很好的锁模效果. 结果表明, 利用 GT 镜进行较宽带的色散补偿是可行的, 并且在加工方面相对简单. 另一方面, 离子

束辅助沉积技术结合光学监控能够制备出应用于飞秒激光系统的高质量膜系。

感谢杭州科汀光学技术有限公司在薄膜加工与反射率测试方面的帮助。

- [1] www.layertec. de [2007]
- [2] Cao S Y, Zhang Z G, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2971 (in Chinese) [曹士英、张志刚、柴路、王清月 2008 物理学报 **57** 2971]
- [3] Wang Y L, Zhou X G, Wu H, Ding L E 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4308
- [4] Zhao Y Y, Han H N, Teng H, Wei Z Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1709 (in Chinese) [赵研英、韩海年、滕浩、魏志义 2009 物理学报 **58** 1709]
- [5] Szipöcs R, Koházi-Kis A 1997 *Appl. Phys. B* **65** 115
- [6] Steinmeyer G 2006 *Appl. Opt.* **45** 1490
- [7] Tian J R, Han H N, Zhao Y Y, Wang P, Zhang W, Wei Z Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4725 (in Chinese) [田金荣、韩海年、赵研英、王鹏、张伟、魏志义 2006 物理学报 **55** 4725]
- [8] Szipöcs R, Ferencz K, Spielmann C, Krausz F 1994 *Opt. Lett.* **19** 203
- [9] Luo Z Y, Liu X, Shen W D, Xue H, Zhang Y G, Gu P F 2009 *Acta Opt. Sin.* **9** 2619 (in Chinese) [罗震岳、刘旭、沈伟东、薛晖、章岳光、顾培夫 2009 光学学报 **9** 2619]
- [10] Luo Z Y, Shen W D, Liu X, Gu P F, Xia C 2010 *Chin. Opt. Lett.* **3** 342 (in Chinese) [罗震岳、沈伟东、刘旭、顾培夫、夏椹 2010 中国光学快报 **3** 342]
- [11] Pervak V, Tikhonravov V, Trubetskov M K, Naumov S, Krausz F, Apolonski A 2007 *Appl. Phys. B* **87** 5
- [12] Szipöcs R, Koházi-Kis A, Lakó S, Apai P, Kovács A P, DeBell G, Mott L, Louderback A W, Tikhonravov A V, Trubetskov M K 2000 *Appl. Phys. B* **70** S51
- [13] Xie X D, Wang Q Y, Wang Z, Zhang W L, Chai L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3159 (in Chinese) [谢旭东、王清月、王专、张伟力、柴路 2005 物理学报 **54** 3159]
- [14] Tikhonov A N, Tikhonravov A V, Trubetskov M K 1993 *Comp. Maths. Math. Phys.* **33** 1339
- [15] Tikhonravov A V, Trubetskov M K, DeBell G W 1996 *Appl. Opt.* **35** 5493
- [16] Bischoff M, Stenzel O, Gäbler D, Kaiser N 2005 *Proc. SPIE* **5963** 59631N-1
- [17] Tang J F, Gu P F, Liu X, Li H F 2006 *Modern Optical Thin Film Technology* (Hangzhou: Zhejiang University Press) p262 (in Chinese) [唐晋发、顾培夫、刘旭、李海峰 2006 现代光学薄膜技术(杭州:浙江大学出版社)第262页]
- [18] Xue H, Shen W D, Gu P F, Luo Z Y, Zhang Y G, Liu X 2009 *Chin. Opt. Lett.* **7** 446 (in Chinese) [薛晖、沈伟东、顾培夫、罗震岳、章岳光、刘旭 2009 中国光学快报 **7** 446]

A Gires-Tournois mirror for dispersion compensation in the Ti-sapphire laser system*

Ma Qun¹⁾ Zhang Yue-Guang^{1)†} Shen Wei-Dong¹⁾ Luo Zhen-Yue¹⁾ Zhang Qing²⁾
Zhang Shu-Na¹⁾ Ye Peng²⁾ Yuan Wen-Jia¹⁾ Liu Xu¹⁾ Wei Zhi-Yi²⁾

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

2) (Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 14 April 2010; revised manuscript received 4 May 2010)

Abstract

A Gires-Tournois (GT) mirror with a group delay dispersion (GDD) of -60 fs^2 in one reflection was designed according to the requirement of dispersion compensation in the Ti-sapphire femtosecond laser system. It was manufactured by ion assisted deposition combined with the optical monitoring in transmission. The reflectance of the mirror was measured by a spectrophotometer working in the range from 650 nm to 950 nm with a resolution of 1 nm. The results were consistent with the design. Furthermore, a home-made white light interferometry system was employed to test the reflection GDD and the result also agreed well with the design. The experimental GDD oscillation was less than $\pm 20 \text{ fs}^2$. The GT mirror was applied in the Ti-sapphire femtosecond laser system and a good clamping result was obtained. Finally a 29 fs ultra-short pulse was acquired.

Keywords: dispersion compensation, Ti-sapphire femtosecond laser system, Gires-Tournois mirror, ion assisted deposition

PACS: 78.66.-w, 42.65.Re, 07.30.Kf

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60708013, 60608014).

† Corresponding author. E-mail: zhangyueguang@zju.edu.cn