

文章编号: 0253-2239(2005)02-216-4

钛宝石激光器中用优化 Gires-Tournois 镜 产生 15 fs 脉冲*

吴祖斌¹ 王 专¹ 廖春艳² 韩英魁¹ 曹士英¹ 张志刚¹ 王清月¹ 邵建达²

(¹ 天津大学精仪学院超快激光器研究室, 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)
(² 中国科学院上海光学精密机械研究所光学薄膜技术研究与发展中心, 上海 201800)

摘要: 根据飞秒脉冲锁模钛宝石激光器脉冲压缩的要求, 介绍了负色散镜补偿色散的基本原理及其特点。详细阐述了优化 Gires-Tournois(OG-T)镜的设计过程, 并通过计算机优化得到理想设计膜系。采用离子束溅射的方法镀制了优化 Gires-Tournois 镜。测量了优化 Gires-Tournois 镜(编号为 OGT#1)的透射率和群延迟色散, 并与设计值进行了比较, 分析了实测值产生偏差的原因, 从而对镀膜参量进行了相应的调整, 制造了第二批优化 Gires-Tournois 镜(编号为 OGT#2)。将优化 Gires-Tournois 镜用于钛宝石激光器振荡级内, 单程 5 次通过三个优化 Gires-Tournois 镜, 补偿了激光器腔内色散, 实现了飞秒锁模脉冲运转。用 OGT#1 先进行了实验, 获得 32 fs 的脉冲和 46 nm 的光谱宽度。用调整参量后的 OGT#2 进行了实验, 获得了 15 fs 的超短脉冲和 91 nm 的光谱宽度。实验很好的验证了负色散镜补偿色散的优点, 为国内啁啾镜的研制创造了条件。

关键词: 激光器; 负色散镜; 优化 Gires-Tournois 镜; 飞秒激光器

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Generation of 15 fs Pulses from Ti:Sapphire Laser with Optimized Gires-Tournois Mirrors

Wu Zubin¹ Wang Zhuan¹ Liao Chunyan² Han Yingkui¹ Cao Shiyang¹
Zhang Zhigang¹ Wang Qingyue¹ Shao Jianda²

(¹ The Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, EMC, Ultrafast Laser Laboratory, School of Precision Instruments & Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)
(² R&D Center for Optical Thin Film Coatings, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract: According to the mode-locked femtosecond Ti:sapphire laser pulse compression, the characteristics and principles of dispersion compensation of negative dispersion mirrors were introduced. Optimized Gires-Tournois (OG-T) mirrors were designed and fabricated. OG-T mirrors were deposited by means of ion-beam sputtering onto superpolished substrates. The transmittance and group dispersion delay of first fabricated OG-T (OGT#1) mirrors were measured. Film coating parameters were adjusted according with design value. After that, second fabricated OG-T (OGT#2) mirrors were fabricated. Dispersion was compensated by 5 bounces during 3 OG-T mirrors from mode-locked femtosecond Ti:sapphire laser. 32 fs pulse (46 nm spectrum width) and 15 fs pulse (91 nm spectrum width) were obtained respectively by OGT#1 and OGT#2. The excellent features of negative dispersion mirrors were proved by the experiment and the fine chirped mirrors could be fabricated.

Key words: lasers; negative dispersion mirrors; optimized Gires-Tournois mirrors; femtosecond laser

* 国家自然科学基金(60378005)和国家重点基础研究专项经费(G1999075201)资助课题。

作者简介: 吴祖斌(1979~), 男, 浙江人, 天津大学超快激光研究室在读硕士, 主要从事超宽带啁啾镜的设计和制作研究。

E-mail: wuzubin2004@163.com.

收稿日期: 2004-03-18; 收到修改稿日期: 2004-06-04

1 引言

钛宝石飞秒激光器以其稳定的性能和广泛的用途备受人们的关注。补偿钛宝石激光器腔内色散、压缩脉冲宽度、产生稳定的超短脉冲成为人们关注的焦点。传统的棱镜对在补偿钛宝石晶体二阶色散的同时,又产生了高阶色散,而且棱镜对的间距比较大,这对激光器的尺寸和输出脉冲的重复频率有一定的限制。

于是人们开始寻找一种替代棱镜对的新型色散补偿元件。通过研究发现^[1,2],改变布拉格介质镜的膜层厚度,不仅能够改变介质镜所能提供的高反射带宽,也能够改变入射脉冲的位相信息,这种介质镜就是负色散镜(NDM)^[3]。研究^[4,5]表明负色散镜能够提供飞秒激光器需要补偿的色散。人们提出了两种类型的负色散镜:Gires-Tournois 干涉镜(G-T)^[6]和啁啾镜(CM)^[7]。啁啾镜单调改变介质镜的膜层厚度,使光脉冲的长波长部分在较深膜层反射,短波长部分在较浅膜层反射,从而产生所需的时间延迟。由于啁啾镜的表面膜层对长波长部分也有一定的反射,使色散曲线的长波长部分发生了振荡,影响了色散补偿的质量。为了消除振荡,可以进行优化;双啁啾镜(DCM)^[8]也可以减小振荡,但是双啁啾镜设计方法增加了膜层数量,膜层结构也变得复杂,不利于实际加工镀膜。传统的 Gires-Tournois 反射镜的膜层含有一个厚膜作为谐振腔,让谐振频率获得一定的延迟。但是色散带宽非常窄。如果把谐振腔增加为几个厚膜层为主的变化膜系,而靠近基片的部分仍然是标准的 $\lambda_0/4$ 膜系,依靠计算机优化上面几层就能够提供平滑的宽带连续负色散。这样的膜系结构简单,对于膜厚精度不十分敏感,易于加工制作。我们称这种膜系为优化的 Gires-Tournois(OG-T)干涉反射镜。

2 优化 Gires-Tournois 镜

天津大学超快激光研究室在国内率先设计制作了优化 Gires-Tournois 镜,并将其应用于钛宝石飞秒锁模激光器中获得了 56 fs 脉冲输出^[9,10]。测量表明,由于膜厚控制不够精确,该优化 Gires-Tournois 反射镜的色散没有达到设计要求。为了获得更短的脉冲输出,必须改进设计方法和加工工艺,使理论设计的色散曲线更平滑,色散带宽更宽,实际镀膜更精确。于是我们重新设计了 Gires-Tournois 反射镜,并通过计算机优化,得到了初始

膜系结构,如图 1 所示。

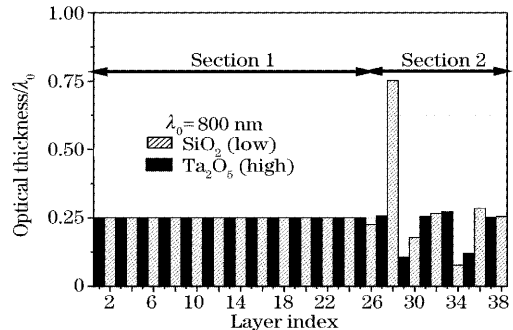


图 1 提供 -40 fs^2 色散的 Gires-Tournois 镜的光学厚度(中心波长为 800 nm)与层系数关系。膜系结构由高、低折射率材料层交替镀制而成。部分一:标准的四分之一波长高反射结构,部分二:优化 Gires-Tournois 干涉仪色散控制层

Fig. 1 Optical thickness at 800 nm as a function of layer index for a -40 fs^2 Gires-Tournois mirror. There are alternating layers of high-low refractive index; Section 1, standard quarter-wavelength optical thickness high-reflector structure; Section 2, OG-T interferometer dispersion-control layers

我们设计了 38 层的 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 介质膜系,其中 $n_{\text{Ta}_2\text{O}_5} = 2.098$, $n_{\text{SiO}_2} = 1.48$ 。设计以 800 nm 为中心,在 750~850 nm 范围内能提供有 -40 fs^2 平滑而又连续的群延迟色散(GDD),并有一定的斜率从而提供 -28 fs^3 的三阶色散(TOD)。我们使群延迟色散和三阶色散的目标量都要略大于钛宝石晶体产生的色散量,以补偿一部分腔内自相位调制(SPM)带来的啁啾。前面 25 层是标准的 $\lambda_0/4$ 布拉格波长膜系,保证对 750~850 nm 波长具有高反射率。后面 13 层是具有腔结构的 Gires-Tournois 干涉仪膜系,腔厚度 $>0.5\lambda_0$ 。我们采用离子束溅射的方法,分别镀制了 OGT # 1, OGT # 2 两批优化 Gires-Tournois 镜。

我们测试了 OGT # 1 镜的反射曲线和色散曲线,并与设计值做了比较,如图 2 所示。可以看出中心波长向短波方向发生了偏移,说明整个膜系偏薄。于是我们调整了镀膜参量,制作了 OGT # 2,并在激光器中进行测试。

3 飞秒激光器中用优化 Gires-Tournois 镜补偿色散

用优化 Gires-Tournois 镜作为色散补偿元件,构成锁模钛宝石激光器,图 3 是实验结构图。该激

光器采用 X 型五镜折叠腔。钛宝石晶体采用布儒斯特角切割,通光长度为 2 mm;钛宝石两端放置双色镜 M1 和 M2,对抽运光具有很高的透过率,对钛宝石晶体产生的激光具有高反射率。OC 为输出 2% 的耦合镜。OGT1,OGT2,OGT3 为优化 Gires-

Tournois 镜,这样激光在谐振腔内单程 5 次通过负色散镜,以补偿腔内产生的正色散。抽运源为 532 nm 的钕酸钇激光器。当抽运功率为 3.56 W 时,激光器的输出功率是 156 mW。

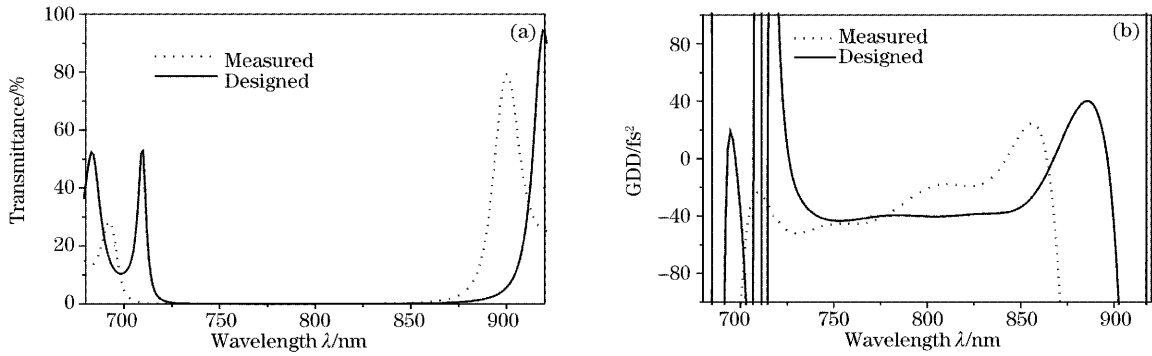


图 2 计算和测量的 OGT #1 镜的透过率(a)和群延迟色散曲线(b)

Fig. 2 Calculated and measured transmittance (a) and group delay dispersion (b) of the OGT #1 mirrors

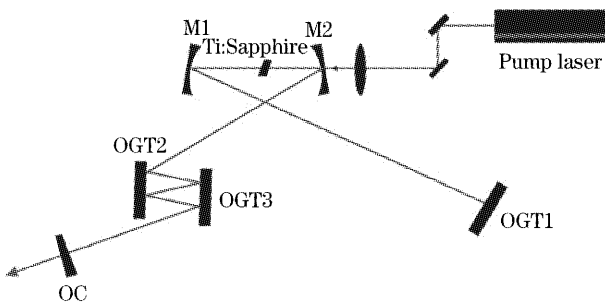


图 3 具有三个优化 Gires-Tournois 镜的钛宝石激光器

Fig. 3 Ti:sapphire laser with 3 OG-T mirrors

运用 OGT #1 进行飞秒脉冲锁模实验,我们得到的脉冲宽度约为 32 fs,光谱半峰全宽(FWHM)

为 46 nm,如图 4 所示。

当色散补偿镜全部换为 OGT #2 时,脉冲宽度缩短为 15 fs,光谱宽度展宽为 91 nm,如图 5 所示。通过对比实验,可以看到 OGT #2 的色散补偿能力要好于 OGT #1。与参考文献[9,10]的 Gires-Tournois 镜相比,无论理论还是实际测得的色散曲线都更平滑,将其用作色散补偿,所得的脉冲宽度也只有参考文献[9,10]中得到的 1/3。由于腔内非线性效应的不确定性,加上优化 Gires-Tournois 镜色散量不可微调,两次实验情况下的时间带宽积 $\Delta\nu \cdot \Delta\tau$ 分别为 0.69 和 0.64,都要稍大于傅里叶变换极限脉冲的时间带宽积。

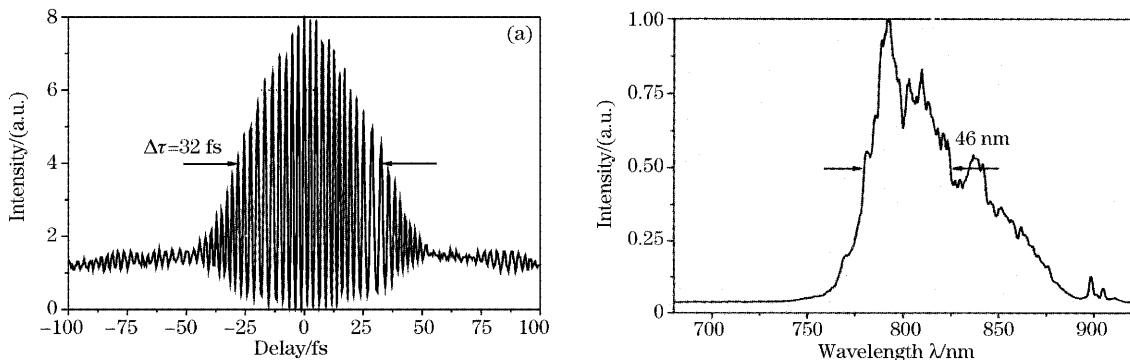


图 4 在钛宝石激光器中用 OGT #1 镜输出的干涉自相关曲线(a)和光谱曲线(b)

Fig. 4 Measured interferometric autocorrelation trace (a) and spectrum (b) of a Ti:sapphire laser

using OGT #1 mirrors

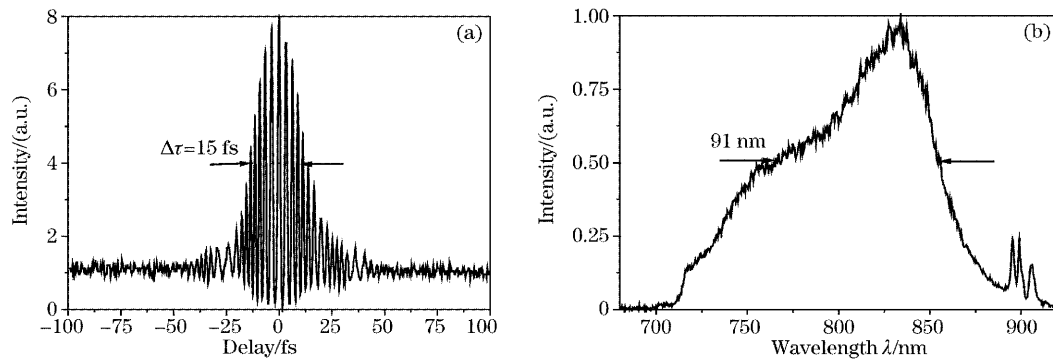


图 5 在钛宝石激光器中用 OGT #2 镜输出的干涉自相关曲线(a)和光谱曲线(b)

Fig. 5 Measured interferometric autocorrelation trace (a) and spectrum (b) of a Ti:sapphire laser using OGT #2 mirrors

4 结 论

总而言之,我们已经设计和制作了较为理想的优化 Gires-Tournois 反射镜,并在钛宝石激光器中获得了最短为 15 fs 的锁模脉冲。证明国内的设计和镀膜工艺已经可以制造高精度的负色散镜。今后的工作是制造结构更复杂,能提供更宽负色散带宽的啁啾反射镜。

致谢 感谢日本经济产业省产业技术综合研究所鸟塚健二、高田英行在色散测量方面给予的帮助。

参 考 文 献

- 1 Jürgen Kuhl, Joachim Heppner. Compression of femtosecond optical pulses with dielectric multilayer interferometers[J]. *IEEE Trans. Quant. Electron.*, 1986, **22**(1): 182~185
- 2 K. D. Li, W. H. Knox, N. M. Pearson. Broadband cubic-phase compensation with resonant Gires-Tournois interferometers[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(9): 450~452
- 3 R. Szipocs, A. Köházi-Kis, S. Lakó *et al.*. Negative dispersion mirrors for dispersion control in femtosecond laser: chirped dielectric mirrors and multi-cavity Gires-Tournois interferometers

[J]. *Appl. Phys. (B)*, 2000, **70**(Suppl.): 51~57

- 4 A. Stingl, C. Spielmann, F. Krausz. Generation of 11-fs pulses from a Ti:sapphire laser without the use of prisms[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3): 204~206
- 5 I. D. Jung, F. X. Kärtner, N. Matuschek *et al.*. Self-starting 6.5-fs pulses from a Ti:sapphire laser[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 1009~1011
- 6 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
- 7 R. Szipocs, A. Köházi-Kis. Theory and design of chirped dielectric laser mirrors[J]. *Appl. Phys. (B)*, 1997, **65**(2): 115~135
- 8 Nicolai Matuschek, Franz X. Kärtner, Ursula Keller. Theory of double-chirped mirrors[J]. *IEEE J. Selected Topic in Quant. Electron.*, 1998, **4**(2): 197~208
- 9 Zhang Zhigang, Chai Lu, Sun Hong *et al.*. A mirror-dispersion-controlled and self-started femtosecond Ti:sapphire laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(2): 253~254
张志刚, 柴路, 孙虹等. 腔内反射镜控制的、自启动的钛宝石飞秒激光器[J]. *光学学报*, 2001, **21**(2): 253~254
- 10 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