

文章编号: 0253-2239(2001)11-1384-04

用于飞秒脉冲锁模激光器中的优化 Gires-Tournois 反射镜*

孙虹¹⁾ 张志刚²⁾ 柴路²⁾ 赵江山²⁾ 戴建明²⁾ 邢歧荣²⁾ 王清月²⁾

1), 天津大学理学院应用物理系, 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072

2), 天津大学精仪学院超快激光研究室, 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072

摘要: 根据飞秒脉冲锁模钛宝石激光器腔内色散补偿的要求, 设定负色散镜的色散目标值, 用最优化方法, 设计出了负色散 Gires-Tournois(G-T) 反射镜。计算了光场在优化负色散 G-T 反射镜不同膜层内的分布。不同波长的光场分量, 在优化负色散 G-T 反射镜内部, 穿透深度不同。在 720 nm~900 nm 波长范围内, 长波分量有较大的穿透深度, 因而对长波分量提供较大的时间延迟。将其用于飞秒锁模钛宝石激光器中, 取代传统的腔内色散补偿棱镜对, 结合半导体可饱和吸收镜(SESAM)自启动锁模, 在钛宝石激光器中获得了 56 fs 脉冲。

关键词: 优化 Gires-Tournois 反射镜; 群速度延迟色散; 飞秒激光器

中图分类号: TN24 文献标识码: A

1 引言

飞秒激光技术是激光技术领域发展最快的分支之一, 短短几年时间自锁模飞秒激光器输出脉冲宽度从几十飞秒压缩到 4.5 fs^[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控制。

对于固体激光器, 由于激光腔内固体激光增益介质总是有一定量的随频率变化的正色散, 它必须要靠负色散来补偿。棱镜对是目前引入的最典型的低损耗宽带负群速度延迟色散源。但是棱镜对色散补偿的激光器, 在满足腔内二阶色散补偿的情况下, 又是高阶色散的主要来源。

腔和棱镜调节对输出脉冲宽度的影响非常灵敏, 腔内准直会引起腔内光轴的变化, 因此会引起光线穿过棱镜的路径变化, 腔内任何非常小的重新准直, 必须靠一系列棱镜位置和方向的重新调节来恢复原来的脉宽和光谱。这就形成一种非常临界的运转状态。将这样的激光器与其他器件组成一个复杂系统(如啁啾脉冲放大系统, 光电数据系统)并使其稳定运行就显得相当困难。而且不可随意变动的棱

镜间距, 会限制激光器的尺寸和输出脉冲的重复频率, 这就促使人们想用其它方法替代棱镜对来补偿腔内色散。

2 优化 Gires-Tournois 反射镜

普通飞秒脉冲激光器腔镜, 一般是镀标准的 $M/4$ 膜系以保证宽带高反射, 没有考虑反射光场的相位变化。其实膜系本身就是个相位灵敏系统。那么能不能设计一种反射镜, 在保证宽带高反射的同时, 相位上能够满足腔内色散补偿的要求呢? 这一直是人们探索的目标。

1994 年 Szpocs^[2,3] 设计了负色散啁啾镜, 替代传统的色散补偿棱镜对, 获得 11 fs 脉冲。他设计的啁啾镜厚度变化是由基底开始随层数的增加而减少, 使得长波长的光场在介质膜中有较深的穿透深度, 以得到负的群速度延迟色散, 同时保证介质膜的宽带高反射率。整个膜系每一层的厚度都要经优化确定, 介质膜系的色散量对每层介质膜厚度变化都是非常敏感的, 这对镀膜工艺要求很高。

另外一种色散镜是薄膜 G-T 干涉仪, 单 G-T 薄膜干涉仪能够提供一定的色散量, 但是它的色散带宽很窄。2000 年 Szpocs^[4] 提出并制作了多 G-T 的啁啾镜, 除了 G-T 腔, 介质镜每层厚度也要经优化确定。2000 年 Golubovic 等人^[5] 报道了双 G-T 介质镜^[5], 即在多层介质层中安置两个谐振腔, 并且仅

* 天津市自然科学基金(020-413188)、教育部高等学校骨干教师资助计划、国家“九五”攀登计划、国家重点基础研究、教育部重点科学基金资助课题。

收稿日期: 2000-10-04; 收到修改稿日期: 2000-12-18

优化上面 7 层, 其余皆是标准 $\lambda/4$ 膜。实验证明此双 G-T 介质镜不但具有 G-T 镜高反射率的特点, 而且能在一定带域内得到平坦的 -40 fs^2 的群速度延迟色散。这个设计的成功表明, 在脉冲宽度要求不太高的情况下, 优化的 G-T 镜可能提供较为平坦的群速度延迟色散, 并能提供比啁啾镜更高的反射率。鉴于我们的目标是产生数十飞秒的脉冲, 对于反射带宽的要求与一般 $\lambda/4$ 膜系相同, 所以用优化 G-T 镜取代棱镜对我们研究的课题。由于膜层介质的折射率因镀膜方法和条件而异, 简单照搬别人的设计不会得到所需要的结果。我们必须根据自己的镀膜条件重新设计膜系。

参照以上设计, 考虑到加工工艺上要尽量简单, 而且膜系要有宽带高反、高色散, 我们设计了一种新的介质膜系。这种膜系分两部分: 一部分提供宽带高反射率; 另一部分提供在增益介质荧光带宽内, 具有平缓的随频率变化的群速度延迟。我们设计的 40 层膜系, 高折射率材料为 TiO_2 , 折射率经测量为 2.09, 其低折射率材料为 SiO_2 , 其折射率为 1.46。其中基底以上 30 层为标准 $\lambda/4$ 膜系, 保证宽带高反。第 34 层处设计了一个 G-T 腔, 而从 31 到 40 层的膜厚则由计算机优化确定。目标函数是以波长 800 nm 为中心, 在 750 nm~850 nm 范围内膜系能提供 -60 fs^2 的群速度延迟色散, 并有一定的斜率, 即同时提供 -40 fs^3 的三阶色散。

按照这个目标函数, 对上 10 层膜作了优化。优化后得到的膜系结构如图 1 所示。

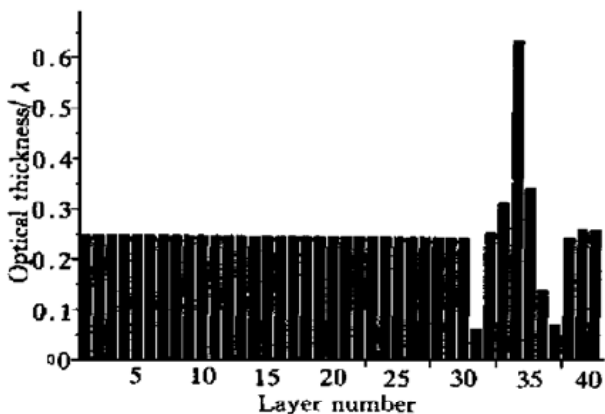


Fig. 1 Optical layer thickness coefficients of optimized Gires-Tournois dielectric mirror

该膜系前 30 层为标准 $\lambda/4$ 膜系, 在第 34 层处形成一个光学厚度为 0.64λ 的 G-T 腔。其周围的上下 3 层膜均非 $\lambda/4$ 厚度。最上面 3 层接近 $\lambda/4$ 厚度。其反射率曲线及群速度延迟色散曲线如图 2 (a)、图(b) 所示。由图可见这一膜系结构一方面可

以保证 750 nm~850 nm 之间有大于 99.9% 的反射率, 另一方面提供了在波长 750 nm~850 nm 之间平缓变化的群速度延迟色散曲线, 且群速度延迟色散随波长增加而上升, 表明有负三阶色散。这一膜系的最大好处是每一层的膜厚变化对最后结果的误差影响小。计算表明, 膜层厚度的变化对相对于目标函数的灵敏度是 10^{-8} nm^{-1} 量级。

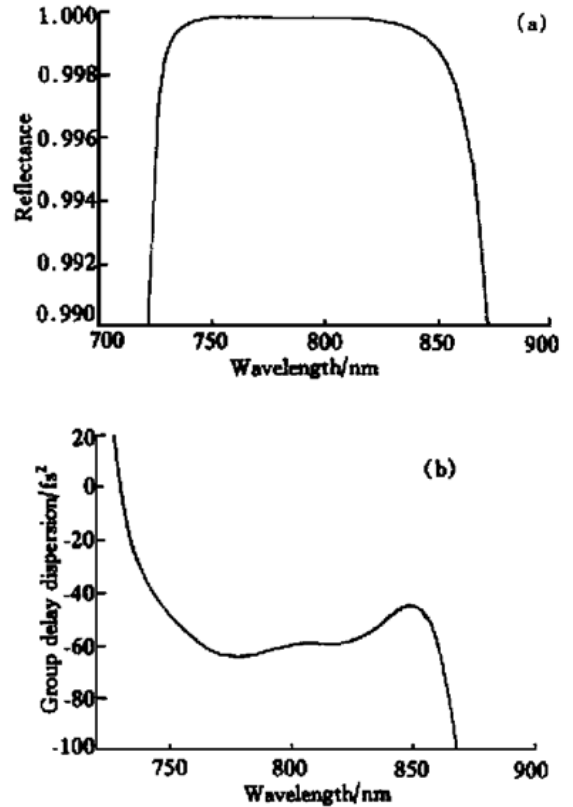


Fig. 2 Calculated (a) reflectivity and (b) group velocity delay dispersion versus wavelength of the optimized Gires-Tournois dielectric mirror

为了证实此设计, 我们计算了光场在 G-T 反射镜中的分布, 得到光场分布随波长变化的图形。图 3(a) 反映了在反射镜膜层的不同深度, 光场分布随波长的变化, 纵坐标零点由反射镜表面开始。由图 3(a) 可见, 在 720 nm~900 nm 之间随着波长的增加光场分布的深度逐渐增加, 在 750 nm~850 nm 内光场分布是如我们所设计的那样, 光场的长波长分量有较大的穿透深度, 因而具有较大的时间延迟。小于 720 nm 和大于 900 nm 的波长在表面层内光场也有一定的分布, 这些区域内反射率和色散曲线都有振荡。但是, 不是我们所考虑的波长范围。作为对照, 还计算了标准 $\lambda/4$ 膜系的光场分布, 如图 3(b) 所示, 标准膜系的光场在 720 nm~880 nm 区间, 主要集中在介质镜表面层, 任何波长分量在膜系内部没有穿透, 所以不能提供群速度延迟色散。

根据我们的设计, 用电子束蒸发方法镀制了优

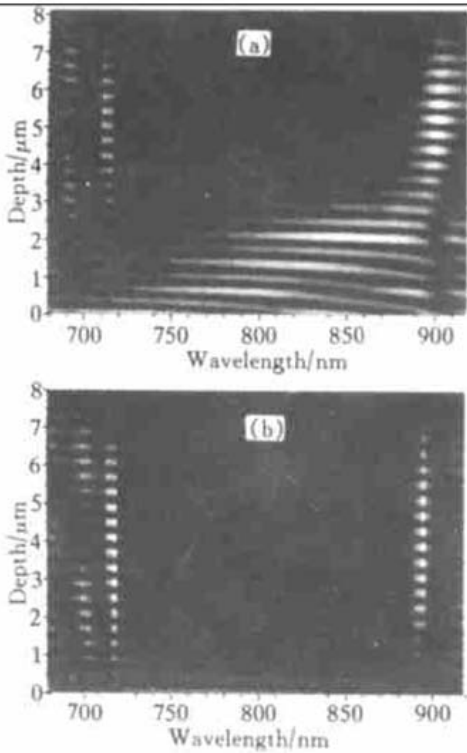


Fig. 3 Calculated electric field distribution as a function of wavelength in optimized Gires-Tournois dielectric mirror. (a) and in $\lambda/4$ dielectric mirror (b)

化 G-T 镜。G-T 反射镜能够提供随波长变化的色散量,其本质是光波场入射到 G-T 镜后,不同波长的光场在 G-T 镜内振荡次数不同,反射后得到不同的时间延迟。图 4 是优化 G-T 反射镜的时间延迟曲线,其中实线是根据膜系结构计算的结果,带有小方框的曲线为测量结果。由测量结果可以看出,波长在 720 nm~800 nm 范围内,群速度延迟的测量值和理论值符合很好,即能够提供所需的色散量,而在波长大于 800 nm 时,群速度延迟的测量值小于理论值,而且随波长变化的斜率比设计值小,亦即群速度延迟色散小于设计值,这主要是由于镀膜过程中膜层厚度控制精度不够所致。

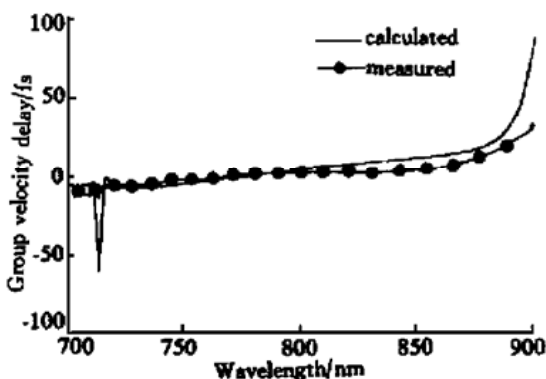


Fig. 4 Calculated and measured time delay of the optimized Gires-Tournois dielectric mirror

3 优化 G-T 反射镜补偿色散的飞秒激光器

用优化 G-T 反射镜作为色散补偿元件,构成自锁模钛宝石激光器。图 5 是腔内优化 G-T 镜补偿的、自启动的钛宝石飞秒激光器的结构图。

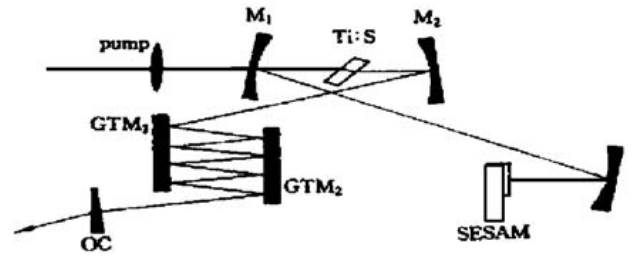


Fig. 5 Schematic of the Ti:sapphire laser with optimized G-T mirrors and a SESAM

该激光器采用 X 型四镜折迭腔。钛宝石晶体采用布儒斯特角切割,通光长度为 2.3 mm;抽运源是波长为 532 nm 的钕酸钇激光器 (Coherent Verdi 型),输出功率为 5 W。钛宝石两端放置曲率半径为 $R = 75 \text{ mm}$ 的双色镜 (M_1, M_2),对 750 nm~850 nm 波长具有高反射率,对 532 nm 抽运光的透过率大于 95%。OC 为 3.5% 的输出耦合镜;球面反射镜 M_3 与 SESAM 构成了锁模的自启动装置^[6];GTM₁、GTM₂ 为负色散补偿镜 (G-T mirrors),替代传统的棱镜对,用于对腔内正色散的补偿。实验证明:单程 8 次通过负色散补偿镜可以获得 56 fs 最窄的光脉冲^[6]。

图 6 是激光器输出的飞秒脉冲的光谱曲线和对应的自相关曲线。负色散镜在长波长一侧的低色散可以认为是该激光器不能够获得更窄光脉冲,且在 800 nm 处有连续波分量的原因^[7],因此,此激光器一般只能在 770 nm 左右实现锁模运转。

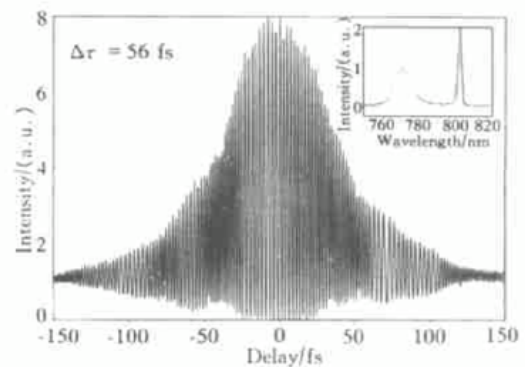


Fig. 6 Interferometric autocorrelation trace and spectrum from a Ti:sapphire laser using the optimized G-T mirrors

结论 采用最优化方法设计, 加工制成了优化 G-T 反射镜, 并将其用于自锁模钛宝石激光器中作为色散补偿元件, 获得了 56 fs 的脉冲输出。

感谢日本国通商产业省电子技术总合研究所高田英行和天津大学周定文在色散 G-T 介质镜测量方面给予的协助。本研究所用的钛宝石晶体是由中国科学院上海光学精密机械研究所邓佩珍、徐军教授提供的, 一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Morger U, Kartner F X, Cho S H *et al.*. Sub-two-cycle pulses from a Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(6): 411~ 413
- [2] Szipöcs R, Ferencz K, Spielmann C *et al.*. Chirped multi-layer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3): 201~ 203
- [3] Stingl A, Spielmann C, Krausz F *et al.*. Generation of 11-fs pulses from a Ti:sapphire laser without the use of prisms. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3): 204~ 206
- [4] Szipöcs R, Kohazi-Kis A, Lako S *et al.*. Negative dispersion mirrors for dispersion control in femtosecond lasers: Chirped dielectric mirrors multi-cavity Gires-Tournois Interferometers. *Appl. Phys. (B)*, 2000, **70** [Suppl.]: S51~ S57
- [5] 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. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(4): 275~ 277
- [6] 张志刚, 柴路, 孙虹等. 腔内反射镜色散控制的、自启动的钛宝石飞秒脉冲激光器. *光学学报*, 2001, **21**(2): 253~ 254
- [7] Sorokina I T, Sorokin E, Wintner E *et al.*. Sub-20 fs pulse generation from the mirror dispersion controlled Cr:LiSGaF and Cr:LiSAF lasers. *Appl. Phys. (B)*, 1997, **65**: 245~ 253

Optimized Gires-Tournois Mirrors Used in Mode-Locked Femtosecond Ti:Sapphire Lasers

Sun Hong¹⁾ Zhang Zhigang²⁾ Chai Lu²⁾ Zhao Jiangshan²⁾ Dai Jianming²⁾
Xing Qirong²⁾ Wang ChingYue²⁾

1), Department of Applied Physics, Tianjin University, Tianjin 300072

2), Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Optoelectronics Information Science and Technology Laboratory, Tianjin University, Tianjin 300072

(Received 4 October 2000; revised 18 December 2000)

Abstract: The optimized Gires-Tournois mirrors used for a femtosecond mode-locked Ti:sapphire laser is reported. The electric-field distribution as a function of wavelength inside the optimized Gires-Tournois mirrors is calculated. The penetration depths in these mirrors change with wavelength. The penetration depth increases within the wavelength range from 720 nm to 9000 nm. So they can give larger time delay at longer wavelength range. They can be used as intracavity dispersion compensation devices instead of traditional prism pairs. With these mirrors and a semiconductor saturable absorber mirror, self-starting 56 fs pulses was obtained in a mode-locked Ti:sapphire laser.

Key words: optimized Gires-Tournois mirrors; group velocity delay dispersion; femtosecond lasers