

文章编号:1004-4213(2011)08-1177-4

Cr : LiSAF 飞秒激光器中 Gires-Tournois 镜的设计

廖春艳¹, 范正修², 邵建达²

(1 西北大学 物理学系 国家级光电技术与功能材料及应用国际科技合作基地, 西安 710069)

(2 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要:飞秒激光脉冲的产生主要依赖于激光腔内净的负群延迟色散. 但是在固体激光器中, 增益介质和其它光学元件却引入了正色散, 因此需引入相应的色散补偿机制. 布儒斯特角棱镜对曾是激光腔中色散补偿的主要办法, 但是它在进行群延迟色散补偿的同时还会引入高阶色散, 使激光器操作困难并影响激光器的尺寸和重复频率. Gires-Tournois 镜是一种新型的色散补偿元件, 可以克服这些缺点. 本文介绍了 Gires-Tournois 镜的基本结构, 分析了影响 Gires-Tournois 镜的群延迟时间、群延迟色散和三阶色散的量, 给出了 Gires-Tournois 镜的设计原则并根据 Cr : LiSAF 飞秒激光器中的色散补偿要求设计了性能优良的 Gires-Tournois 镜. 该 Gires-Tournois 镜在 750 ~ 900 nm 的波长范围内具有高于 99.9% 的反射率和 $-35 \pm 8\text{fs}^2$ 的群延迟色散. 用这样的 Gires-Tournois 镜经过 4 次反射后可以补偿 3mm 的 Cr : LiSAF 晶体的绝大部分群延迟色散.

关键词:光学薄膜; Gires-Tournois 镜; 群延迟色散; 色散补偿; Cr : LiSAF 激光器

中图分类号: O484

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114008.1177

0 引言

掺铬氟化铝铯 ($\text{Cr}^{3+} : \text{LiSrAlF}_6, \text{Cr} : \text{LiSAF}$) 激光器是一种新型的固体激光器. 由于具有运转效率高、可调谐范围宽、自发荧光寿命长、吸收带宽、透镜效应小以及高浓度掺杂没有浓度猝灭现象等优点, 已成为飞秒固体激光器的发展方向之一^[1-3]. 由于超短脉冲固体激光器中类孤立子脉冲的主导作用, 飞秒脉冲振荡主要依赖于腔内负群延迟色散. 由于固体增益介质的正色散, 必须引入相应的色散补偿机制对其进行补偿. 色散补偿机制的优劣直接影响和制约着飞秒脉冲激光器中超短脉冲的形成和稳定运转, 是限制激光脉冲宽度的主要因素^[4-5].

棱镜对可以产生宽带负色散并且损耗较低, 是激光腔中色散补偿的主要方法^[6-7]. 但是它在进行群延迟色散 (Group Delay Dispersion, GDD) 补偿的同时将引入更高级次的色散^[8]. 并且棱镜对增加了激光器光路调节的复杂程度, 使得激光器的操作很困难. 此外, 棱镜之间的最小间距增加了对谐振腔的限制, 影响了飞秒脉冲激光器的尺寸和重复频率^[9].

因此, 为了制备脉宽窄、体积小、操作简单的超快激光器, 必须寻找新的色散补偿元件进行色散补偿. 作为一种光学薄膜器件, 负色散镜^[9-12] 不仅克服了棱镜对的上述缺点, 还可以在较宽范围内具有高

反射率和精确的群延迟控制. 负色散镜包括 Gires-Tournois 镜和啁啾镜两类, 负色散镜在超短脉冲激光系统中起着重要作用. 与啁啾镜相比, Gires-Tournois 镜的结构更简单, 更容易实现. 本文设计了一种可用于 Cr : LiSAF 激光器中的双腔 G-T 镜, 与以往设计的同类 Gires-Tournois 镜^[13-14] 相比, 其群延迟色散带宽更宽, 振荡更小.

1 Gires-Tournois 镜的设计基础

最初用于产生色散的最简单结构是 Gires-Tournois 干涉仪. 如图 1, Gires-Tournois 干涉仪由全反射板、部分反射板及间隔层 (也称为 Gires-Tournois 腔) 构成.

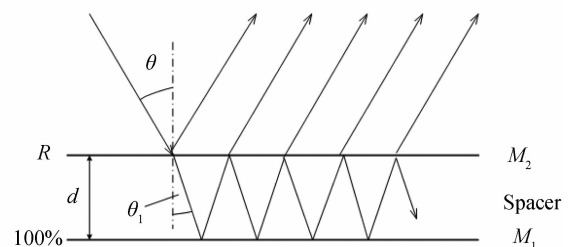


图 1 Gires-Tournois 干涉仪的结构

Fig. 1 Scheme of Gires-Tournois interferometer

当光入射到这样的结构时, 其反射光的相位变化是^[15]

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60378005) 资助

第一作者: 廖春艳 (1979-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为光学薄膜、光谱学和光电工程. Email: cylliao@nwu.edu.cn

收稿日期: 2011-02-21; 修回日期: 2011-04-28

$$\varphi(\omega) = -\arctan \frac{(1-R)\sin \omega t_0}{2\sqrt{R} - (1+R)\cos \omega t_0} \quad (1)$$

式中 R 是部分反射板的反射率, ω 是反射光的角频率, t_0 是干涉仪的往返时间, $t_0 = 2nd\cos \theta_1/c$, n 是间隔层介质的折射率, d 是间隔层的厚度, θ_1 是折射角, c 是光在真空中传播的速度.

忽略 t_0 和折射角 θ 对于 ω 的依赖关系, 分别对式(1)求 ω 的一阶、二阶和三阶导数可得到群延迟时间(Group Delay, GD)、群延迟色散和三阶色散(Third Order Dispersion, TOD)

$$GD = \frac{d\varphi}{d\omega} = -\frac{t_0(1-R)}{1+R-2\sqrt{R}\cos \omega t_0} \quad (2)$$

$$GDD = \frac{d^2\varphi}{d\omega^2} = \frac{2t_0^2\sqrt{R}(1-R)\sin \omega t_0}{(1+R-2\sqrt{R}\cos \omega t_0)^2} \quad (3)$$

$$TOD = \frac{d^3\varphi}{d\omega^3} = [2t_0^3\sqrt{R}(1-R)[2\sqrt{R}\cos^2 \omega t_0 + (1+R)\cos \omega t_0 - 4\sqrt{R}]/(1+R-2\sqrt{R}\cos \omega t_0)^3] \quad (4)$$

从式(2)~(4)可以看出, 群延迟时间、群延迟色散和三阶色散随入射角 θ 、间隔层厚度 d 及部分反射板的反射率 R 的变化可以发生从正到负的变化.

当入射脉冲为 100 fs 左右时, 为避免干涉仪对入射脉冲产生严重的干涉, 要求干涉仪之间的往返时间为 10~20 fs 甚至更短. 因此, 干涉仪的厚度就必须非常薄(约几微米), 这样的干涉仪只能通过薄膜技术来制造. 首先在基片上沉积高、低折射率膜层交替组成的高反膜堆, 然后沉积作为间隔层的低折射率膜层, 最上面是一层高折射率膜层或者较少的几层高、低折射率膜层交替组成的部分反射膜堆. 通常将这样的 Gires-Tournois 干涉仪称为 Gires-Tournois 镜. 可见, Gires-Tournois 镜的设计首先要保证高反射膜堆的反射率足够高, 然后通过选择间隔层的厚度及部分反射膜堆的部分反射率获得所需的群延迟时间、群延迟色散和三阶色散.

2 Cr : LiSAF 飞秒激光器中优化 Gires-Tournois 镜的设计

2.1 设计目标

设计中主要考虑 Cr : LiSAF 晶体的色散, Cr : LiSAF 晶体单位长度的 GD 是关于频率的三次多项式^[16]

$$GD = c_0 + 86.7495\nu - 632.87\nu^2 + 4785.1\nu^3 \quad (5)$$

式中 GD 和 ν 的单位分别是 fs/cm 和 PHz, c_0 是常量. 式(5)分别对角频率求二阶导数和三阶导数可以得到 Cr : LiSAF 晶体单位长度的 GDD 和 TOD

$$GDD = \frac{1}{2\pi} \left(86.7495 - \frac{379722}{\lambda} + \frac{1291977000}{\lambda^2} \right) \quad (6)$$

$$TOD = \frac{1}{4\pi^2} \left(-1265.74 + \frac{8613180}{\lambda} \right) \quad (7)$$

由式(6)和(7)可以分别计算出 1 cm Cr : LiSAF 晶体在 825 nm 处的二阶色散为 243 fs², 三阶色散为 232 fs³. 文中设计针对的是掺铬氟化铝铷锂(Cr : LiSAF)激光器, 其晶体通光长度为 3 mm, 为了考虑问题的方便, 仅考虑 Cr : LiSAF 晶体引入的正群延迟色散.

2.2 初始设计

如图 2, 初始结构为 G/(HL)23H4LH6L(HL)4/A, 其中, A、H、L 和 G 分别代表空气层、 $\lambda/4$ 高折射率膜层、 $\lambda/4$ 低折射率膜层和基底. 设计的中心波长(λ)是 825 nm, 基底是 K9 玻璃, 高、低折射率材料分别为 Ta₂O₅ 和 SiO₂. 为了在更宽的波长范围内获得更大的负群延迟色散, 在初始结构中引入了两个 Gires-Tournois 腔.

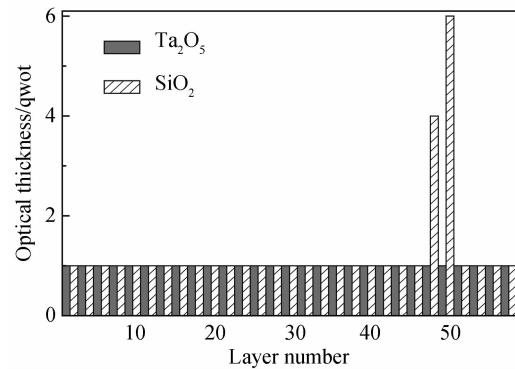


图 2 Gires-Tournois 镜的初始结构

Fig. 2 Layer thickness of pre-design

通过计算发现该初始结构能在两个波长处得到最大群延迟, 如图 3.

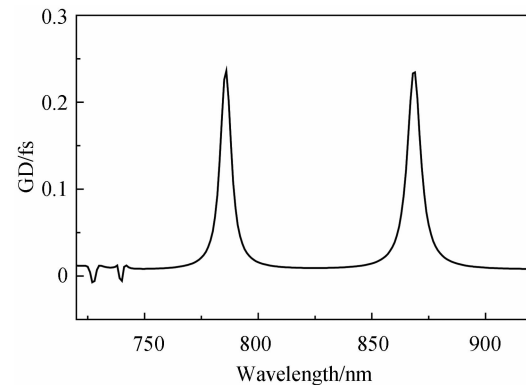


图 3 初始设计的群延迟

Fig. 3 Group delay of pre-design

2.3 优化设计结果及性能分析

飞秒脉冲固体激光器中的色散补偿一般要求在较宽的波长范围内具有高反射率和较平滑的负群延迟色散. 为了在宽带内得到平滑的群延迟, 通过计算

机优化得到了优化结构,如图 4. 该优化 Gires-Tournois 镜由 58 层高、低折射率膜层交替组成,它们的折射率根据镀膜机用实际靶材标定. 基底以上 45 层膜层没有进行优化,均为 $\lambda/4$ 标准膜层以提供宽带范围内的高反射率,靠近空气层的 13 层膜层经过优化以提供较宽范围内平滑群延迟.

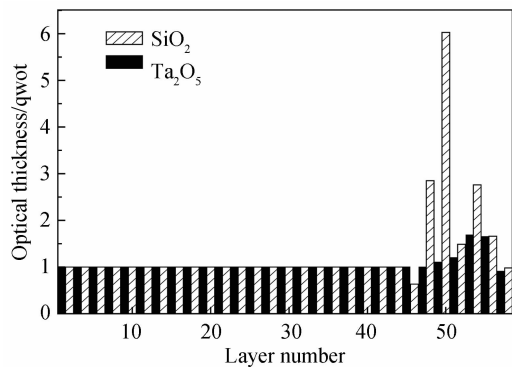


图 4 优化后 Gires-Tournois 的结构

Fig. 4 Layer thickness of optimized Gires-Tournois mirror

图 5 是该结构的反射率性能和群延迟色散性能,厚度变化不敏感. 在很宽的波长范围内(750~900 nm)具有大于 99.9% 的高反射率. 从图中看到,在 750~900 nm 的波长范围内,群延迟色散在 $-35 \pm 8 \text{ fs}^2$ 的范围内轻微振荡. 图 6 是计算的该结构中的电场强度,从图中可以看到,大部分电场集中在 Gires-Tournois 腔内.

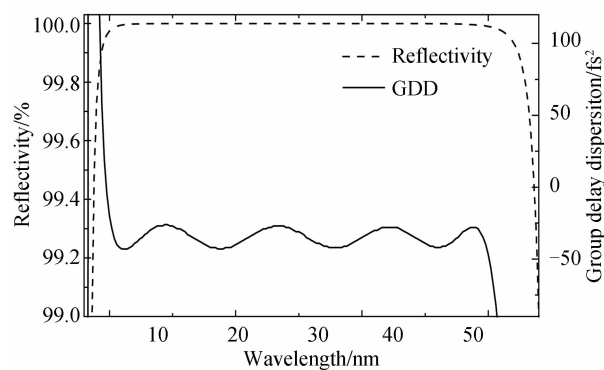


图 5 优化后 Gires-Tournois 镜的性能

Fig. 5 Performance of the optimized Gires-Tournois mirror

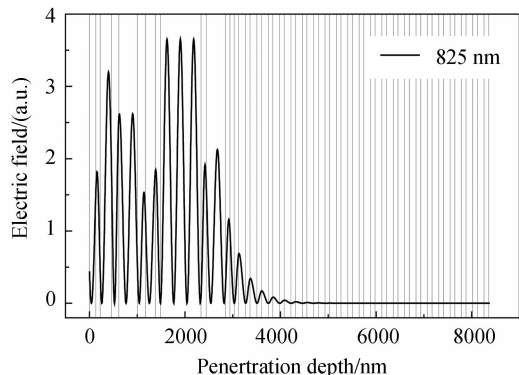


图 6 优化后 Gires-Tournois 镜中的电场分布

Fig. 6 Penetration depth of the optimized GTI mirror

图 7 是用所设计的 Gires-Tournois 镜对 3 mm Cr:LiSAF 晶体的正群延迟色散进行补偿,实线是所设计的 G-T 镜的群延迟色散,虚线是 3 mm Cr:LiSAF 晶体在一次往返过程中的群延迟色散,点线是所设计的 Gires-Tournois 镜四次反射后的群延迟色散,点划线是在一次往返过程中用 Gires-Tournois 镜经四次反射补偿 3 mm 的 Cr:LiSAF 晶体后的剩余群延迟色散. 从图中可见,剩余群延迟色散在 0 附近振荡,表明所设计的 Gires-Tournois 镜可以补偿 Cr:LiSAF 晶体的绝大部分群延迟色散.

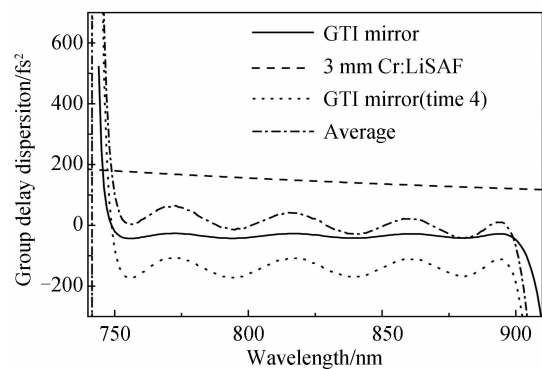


图 7 3 mm Cr:LiSAF 晶体的群延迟色散补偿

Fig. 7 GDD compensation of 3 mm Cr:LiSAF crystal

图 8 是所设计的 G-T 镜中优化膜层(46 层至 58 层)的敏感性. 从图中可以看到:这些膜层的一阶层敏感性都在 10^{-8} nm^{-1} 数量级,二阶层敏感性都在 10^{-6} nm^{-2} 数量级,表明这些膜层的厚度变化对设计结果的影响较小,说明所设计的 Gires-Tournois 镜对膜层.

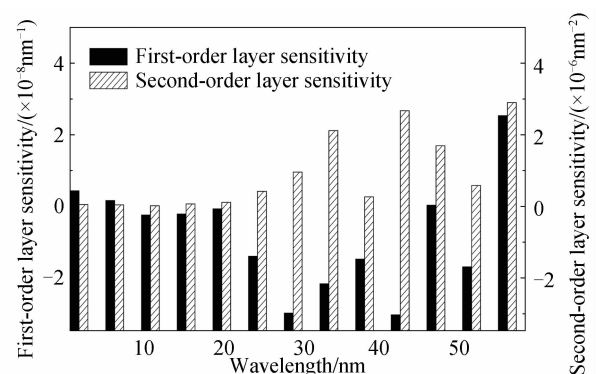


图 8 优化 G-T 镜的膜层敏感度

Fig. 8 Layer sensitivity of the optimized layers in the optimized Gires-Tournois mirror

3 结论

本文根据 Cr:LiSAF 激光器中的色散补偿要求设计了性能优良的 Gires-Tournois 镜. 该 Gires-Tournois 镜不仅在较宽的范围内具有高反射率,同时具有平滑的群延迟色散曲线. 用这样的 G-T 镜经过 4 次反射就可以补偿 3 mm Cr:LiSAF 晶体的绝

大部分群延迟色散,基本满足激光器中的色散补偿要求.

参考文献

- [1] DEMIRBAS U, HONG K, FUJIMOTO J, *et al.* Low-cost cavity-dumped femtosecond Cr : LiSAF laser producing > 100 nJ pulses[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(4):607-609.
- [2] LI D, DEMIRBAS U, BIRGE J, *et al.* Diode-pumped passively mode-locked GHz femtosecond Cr : LiSAF laser with kW peak power[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(9):1446-1448.
- [3] STORMONT B, KEMP A, CORMACK I, *et al.* Broad tunability from a compact, low-threshold Cr : LiSAF laser incorporating an improved birefringent filter and multiple-cavity Gires-Tournois interferometer mirrors[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2005, **22**(6):1236-1243.
- [4] ZHANG Hai-xia, YANG Xing-yu. Impact of ultra-short pulse propagation with third-order nonlinear dispersion in negative refractive media [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12):3133-3137.
张海霞, 杨性愉. 负折射介质中三阶非线性色散项对超短脉冲传输的影响[J]. *光子学报*, 2009, **38**(12):3133-3137.
- [5] UEMURA S, TORIZUK K. Generation of 10fs pulses from a diode-pumped kerr-lens mode-locked Cr : LiSAF laser [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2000, **39**(6A):3472-3473.
- [6] LIN Wei-zhu, LIAO Rui, WEN Jin-hui, *et al.* Sub-10-fs pulse generation directly from a KLM Ti:sapphire laser[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(12):1050-1052.
- [7] FORK R, CRUZ C, BECKER P, *et al.* Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation [J]. *Optics Letters*, 1987, **12**(7):483-485.
- [8] CHRISTOV I, MURNANE M, KAPTEYN H, *et al.* Fourth-order dispersion-limited solitary pulses [J]. *Optics Letters*, 1994, **19**(18):1465-1467.
- [9] SZIPÖCS R, KÖHÁZI-KIS A. Theory and design of chirped dielectric laser mirrors[J]. *Applied Physics B*, 1997, **65**(2):115-135.
- [10] SZIPÖCS R, KÖHÁZI-KIS A, LAKÓS, *et al.* Negative dispersion mirrors for dispersion control in femtosecond lasers: chirped mirrors and multi-cavity Gires-Tournois interferometers [J]. *Applied Physics B*, 2000, **70**(Suppl):S51-S57.
- [11] STEINMEYER G. Brewster-angled chirped mirrors for high-fidelity dispersion compensation and bandwidths exceeding one optical octave[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(19):2385-2396.
- [12] GOLUBOVIC B, AUSTIN R, STEINER K. Double Gires-Tournois interferometer negative-dispersion mirrors for use in tunable mode-locked lasers[J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(4):275-277.
- [13] LIAO Chun-yan, SHAO Jian-da, FAN Zheng-xiu. Design of negative dispersion mirrors used for the femtosecond-pulse laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5):730-733.
廖春艳, 邵建达, 范正修. 飞秒脉冲激光器中色散补偿膜的设计[J]. *光子学报*, 2005, **34**(5):730-733.
- [14] LIAO Chun-yan, WU Zu-bin, FAN Zheng-xiu, *et al.* Negative dispersion mirror: design, fabrication and Use in Ti:Sapphire lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(2):238-241.
廖春艳, 吴祖斌, 范正修, 等. 负色散镜的设计、制备及在 Ti:Sapphire 激光谐振腔中的使用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):238-241.
- [15] MACLEODH A. Thin-film optical filters[M]. 3rd ed. Bristol: Institute of Physics, 2001.
- [16] UEMURA S. Dispersion compensation for a femtosecond Cr : LiSAF laser[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1998, **37**(1):133-134.

Design of Gires-Tournois Mirrors Used for Dispersion Compensation in Cr : LiSAF Laser

LIAO Chun-yan¹, FAN Zheng-xiu², SHAO Jian-da²

(1 National Photoelectric Technology and Functional Materials & Application of Science and Technology International Cooperation Base, Physics Department, Northwest University, Xi'an 710069, China)

(2 Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: Femtosecond-pulse generation relies on net negative intracavity group-delay dispersion. Solid-state gain media and other optical components always introduce a certain amount of frequency-dependant positive dispersion in the cavity, which must be balanced as well. Brewster-angled prism pairs were popular choices in the last years. However, in prism-pair-controlled lasers, higher-order dispersion of the prism pair will be introduced, which increases the sensitivity and affects the size and repetition rate of femtosecond-pulse solid-state laser oscillators of the pulse width to the cavity and prism alignment. Gires-Tournois mirrors may not introduce above defects and can exhibit high reflectivity and precise control of the frequency-dependent group delay over a large bandwidth. They have played and will continue to play an important role in ultrashort pulse laser systems. Basic structure, dispersion performance and principle of design of Gires-Tournois mirrors are discussed. The optimized multilayer mirror used in a Cr : LiSAF laser is reported. This mirror exhibit high reflectance (>99.9%) and smooth group delay dispersion ($-35 \pm 8 \text{ fs}^2$) from 750 nm to 900 nm. Most group delay dispersion of a 3 mm Cr : LiSAF crystal can be compensated by four bounces.

Key words: Optical film; Gires-Tournois mirror; Group delay dispersion; Dispersion compensation; Cr : LiSAF laser