

doi:10.3788/gzxb20134208.0967

飞秒脉冲激光系统中 Gires-Tournois 镜的设计

廖春艳¹, 秦君军², 邵建达³, 程光华², 范正修³, 忽满利¹

(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 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(3 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要:介绍了 Gires-Tournois 镜的基本结构, 运用薄膜光学理论计算了 Gires-Tournois 镜的色散, 分析了各个组成部分对 Gires-Tournois 镜性能的影响. 结果表明: 高反射膜堆的选择影响 Gires-Tournois 镜的反射率性能, 高反射膜堆的周期数取值在 20~30 之间能得到较理想的 Gires-Tournois 镜设计性能; Gires-Tournois 腔的厚度影响 Gires-Tournois 镜的色散性能, Gires-Tournois 腔的光学厚度通常选择为四分之一中心波长的 2 或 4 倍, 部分反射膜堆的结构影响 Gires-Tournois 镜的色散性能, 部分反射膜堆的周期数应小于 5.

关键词: Gires-Tournois 镜; 光学薄膜; 色散补偿; 超短脉冲系统

中图分类号: O484

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)08-0967-6

Design of Gires-Tournois Mirrors Used for the Dispersion Compensation in Femtosecond Lasers

LIAO Chun-yan¹, QIN Jun-jun², SHAO Jian-da³,
CHENG Guang-hua², FAN Zheng-xiu³, HU Man-li¹

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

(2 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

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

Abstract: Basic structure of Gires-Tournois mirror is described and the dispersion performance is calculated. The factors affecting the performance of the Gires-Tournois mirrors are discussed. The results show that the layer number of high reflector affects the reflectance of the Gires-Tournois mirrors but the thickness of the Gires-Tournois cavity and the layer number of the top reflector affect the dispersion performance of the Gires-Tournois mirrors; to achieve good design performance, the layer number of high reflector, the thickness of the Gires-Tournois cavity and the layer number of the top reflector are selected to be 40~60, $\lambda/2$ or λ and less than 5.

Key words: Gires-Tournois mirror; Optical film; Dispersion compensation; Ultrashort laser

0 引言

自 20 世纪 90 年代开始, 随着多种高效优质的固体激光增益介质的出现以及各种锁模方式的产生, 超短脉冲激光技术进入了一个崭新的时代^[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. 在飞秒脉冲固体激光器中, 必须引入相应的色散补偿机制对增益介质的正色散进行补偿. 自相位调制效应和色散补偿效应的相互作用是制约脉冲形成机

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60378005)和瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金(No. SKLST201110)资助

第一作者: 廖春艳(1979-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为薄膜纳米材料的设计、制备、表征及开发应用等. Email: cylliao@nwu.edu.cn

收稿日期: 2012-12-24; 录用日期: 2013-04-26

制,决定飞秒固体激光器稳态运转的根本原因.其中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].

Fork 等人最早将棱镜对作为色散补偿元件插入激光腔中成功进行了色散补偿^[6].棱镜对可以产生宽带负色散并且损耗较低,曾是激光腔中色散补偿的主要方法^[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^[10-14].负色散镜包括 Gires-Tournois 镜和啁啾镜两类. Gires-Tournois 镜^[15]是通过在期望得到长的延迟波长附近设计一光学腔(Gires-Tournois 腔)来获得色散的.啁啾镜^[10]则是通过连续地改变膜层的中心波长,使整个反射镜在保持高反射率的同时,不同波长具有不同的时间延迟从而获得色散的.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.因此,设计制备性能优良的 Gires-Tournois 镜对超短脉冲激光系统的进一步发展具有重要的意义.本文阐述了 Gires-Tournois 镜的结构及性能,通过分析影响 Gires-Tournois 镜性能的各种结构因素,为 Gires-Tournois 镜的设计及制备奠定坚实的理论基础.

1 Gires-Tournois 镜的色散计算

1.1 Gires-Tournois 镜的结构

Gires-Tournois 镜通常是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.这样制备的单腔 Gires-Tournois 镜膜层的膜系结构是:G/(HL)^mH(xL)(HL)ⁿ/A.其中,A、H、L 和 G 分别代表空气层、λ/4(膜层有效光学厚度为中心波长的四分之一)折射率膜层、λ/4 低折射率膜层和基底;m、n 和 x 均为正整数.xL 就是 Gires-Tournois 腔,(HL)^mH 是高反射膜堆,(HL)ⁿ是部分反射膜堆.

1.2 Gires-Tournois 镜的色散

为了方便计算 Gires-Tournois 镜的色散,将高反射膜堆和低反射率膜堆分别等效为一个反射率为 1 和 R 的等效界面 b 和 a,根据光学薄膜的经典理论,当光入射时在 a、b 两个界面上多次反射,作为多次反射光干涉的结果的合成振幅反射系数为^[16]

$$r = \frac{r_a + r_b e^{-2i\delta}}{1 + r_a r_b e^{-2i\delta}}$$

式中,δ=2πndcos θ/λ 是膜层的有效位相厚度.相邻两束反射光之间的相位差 2δ=2πndcos θ/λ,令 t₀=2ndcos θ/c,则有 2δ=ωt₀,那么振幅反射系数为

$$r = \frac{2\sqrt{R} - (1+R)\cos \omega t_0 + i(1-R)\sin \omega t_0}{1+R-2\sqrt{R}\cos \omega t_0}$$

所以 Gires-Tournois 镜的反射率为

$$R_{G-T} = \left[\frac{1+R+2\sqrt{R}\cos \omega t_0}{1+R-2\sqrt{R}\cos \omega t_0} \right]^2 \quad (1)$$

反射光的相位变化为

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

忽略 t₀ 和折射角对于 ω 的依赖关系,对上式求一阶导数、二阶导数、三阶导数得到 Gires-Tournois 镜的群延迟时间、群延迟色散及三阶色散为

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

$$\frac{d^2\varphi}{d\omega^2} = \frac{2t_0^2\sqrt{R}(1-R)\sin \omega t_0}{(1+R-2\sqrt{R}\cos \omega t_0)^2} \quad (4)$$

$$d^3\varphi/d\omega^3 = \{2t_0^3\sqrt{R}(1-R)[2\sqrt{R}\cos^2 \omega t_0 + (1+R) \cdot \cos \omega t_0 - 4\sqrt{R}]\}/(1+R-2\sqrt{R}\cos \omega t_0)^3 \quad (5)$$

2 Gires-Tournois 镜的各组成部分对其性能的影响

2.1 高反射膜堆的影响

在前面的色散计算中,将高反射膜堆的反射率近似为 100%.由薄膜光学的相关理论可知,在空气中,正入射时高反射膜堆的反射率^[17]为

$$R = \left[\frac{1 - (n_H/n_L)^{2m} (n_H^2/n_s)}{1 + (n_H/n_L)^{2m} (n_H^2/n_s)} \right]^2 \quad (6)$$

从式(6)可以看到,高反射膜堆的膜层数越多,反射率越大.因此理论上只要增加膜系的层数,反射率可无限接近于 100%,而实际制备的膜系由于膜层中的吸收、散射损失,当膜系达到一定层数时,继续增加膜层数并不能提高反射率,有时甚至由于吸收、散射损失的增加而使反射率下降,这样不等于 100%的反射率必然会对 Gires-Tournois 镜的反射率性能和色散性能产生一定的影响.因而高反射膜

堆应选取合适的膜层数以达到最高的反射率。

图 1 是计算的具有不同的高反射膜堆结构的单腔 Gires-Tournois 镜的性能,膜系结构为 $G/(HL)^m H2LHLHL/A$,计算的中心波长是 800 nm,高、低折射率膜层材料在中心波长处的折射率分别为 2.06 和 1.45.从图 1(a)可以看到,随着高反射膜堆的膜层数的增加,Gires-Tournois 镜的反射率也随之增

加,反射带宽也随之变宽,但是当 $m \geq 20$ 时,随着膜层数的增加,反射率和反射带宽的增加已经很不明显了.由图 1(b)~(d)可见,随着高反射膜堆的膜层数的增加,在中心波长附近可获得的峰值群延迟时间和群延迟色散并无变化,在高反射带两端的变化也是当 $m \geq 20$ 时就变得很不明显.

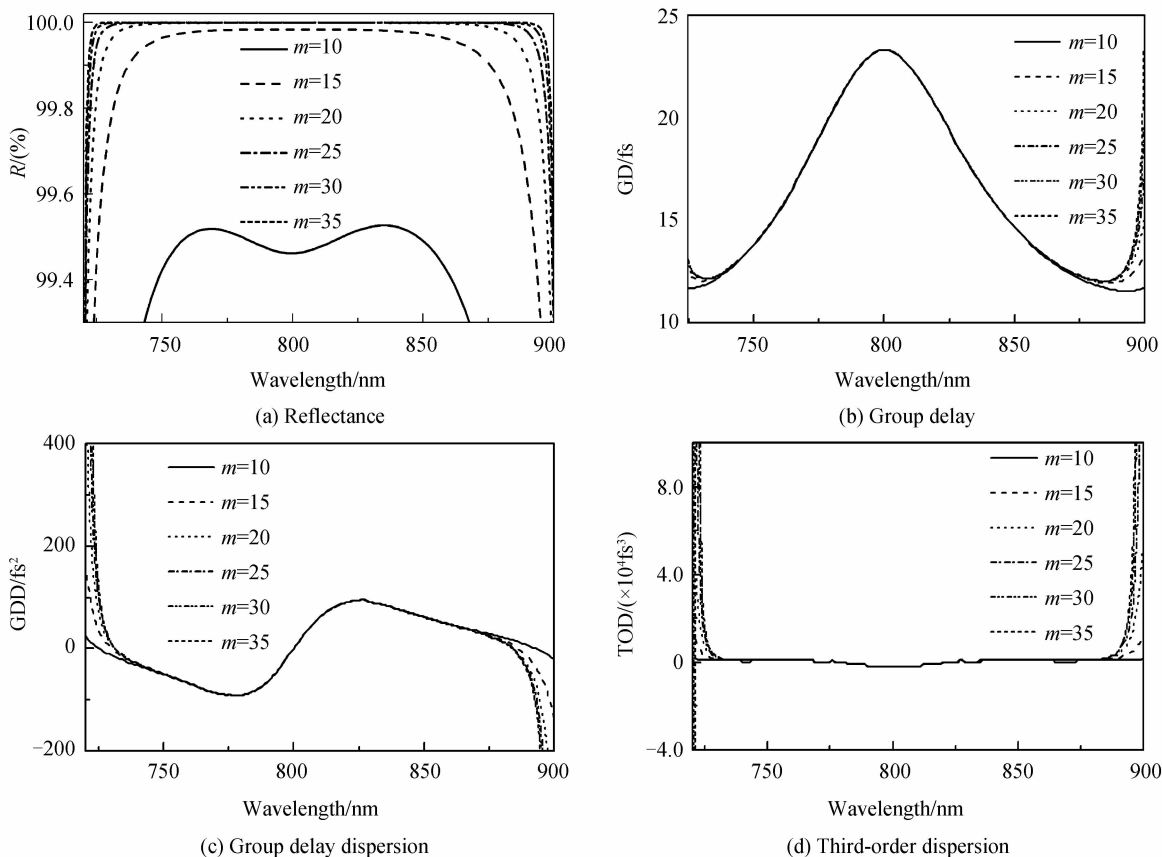


图 1 不同的高反膜堆结构的 Gires-Tournois 镜的性能

Fig. 1 Performance of Gires-Tournois mirrors with different highly reflective films

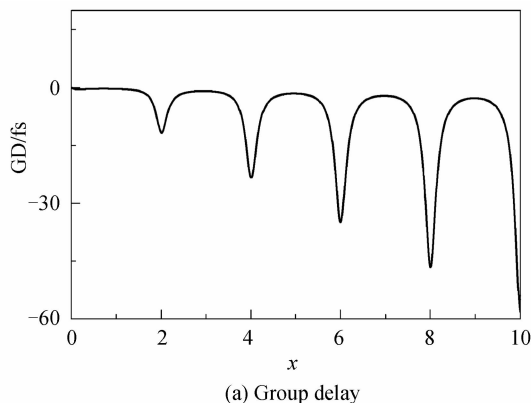
由此可见,高反射膜堆结构对 Gires-Tournois 镜反射率的性能影响较大,对色散性能的影响较小.为了同时得到较好的反射率性能和色散性能,高反射膜堆的结构参数 m 应大于等于 20,但不能无限增加以免实际制备的膜系吸收散射损耗增加.通常在 Gires-Tournois 镜的设计中, m 取值在 20~30.

2.2 Gires-Tournois 腔的影响

从式(3)~(5)可以看出,群延迟时间、群延迟色散和三阶色散随膜层位相厚度的变化可以发生从正到负的变化,因此可通过 Gires-Tournois 腔的光学厚度来调节色散.

图 2 是根据式(3)~(5)计算的在中心波长 800 nm 处 Gires-Tournois 镜的色散性能随腔厚度的变化曲线.在计算时,入射光是正入射,部分反射膜堆的反射率选择为 0.393.从图中可以看到,当 $x(x$ 为 $\lambda/4$ 光学厚度的倍数)为偶数时,Gires-

Tournois 镜的群延迟时间和三阶色散出现极值,群延迟色散出现零值;并且在此附近群延迟时间和三阶色散迅速减小趋于零值,群延迟色散迅速增加至极值.因此 Gires-Tournois 腔的光学厚度应取为 $\lambda/4$ 的偶数倍.



(a) Group delay

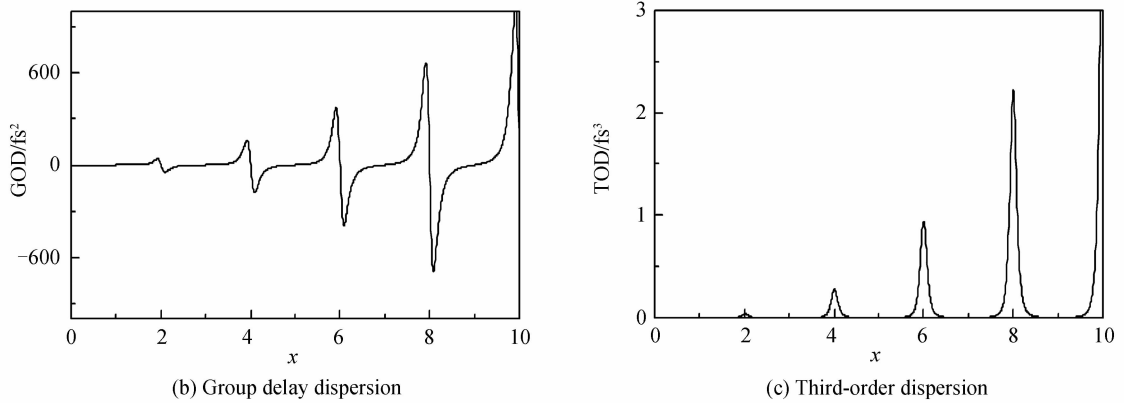


图 2 Gires-Tournois 镜在中心波长处的色散性能随 Gires-Tournois 腔厚度的变化
 Fig. 2 Performance of Gires-Tournois mirrors with different optical thickness of Gires-Tournois cavity at 800 nm

图 3 是计算的不同 Gires-Tournois 腔厚度的单腔 Gires-Tournois 镜的性能,膜系结构为 G/(HL)²⁵H xL HLHL/A,中心波长是 800 nm,高、低折射率膜层材料在中心波长处的折射率分别为 2.06 和 1.45.从图 3 中可以看到,随着 Gires-Tournois 腔厚度的增加(x 的增加),在高反带宽内,Gires-Tournois 镜的反射率和反射带宽变化不明显,而在

高反带宽内可获得的群延迟时间、群延迟色散和三阶色散均有显著的增加,说明 Gires-Tournois 腔厚度的变化对反射性能的影响不大但是对色散性能却具有极大的影响.因此在设计 Gires-Tournois 镜时,腔厚度的选择主要影响 Gires-Tournois 镜的色散性能.

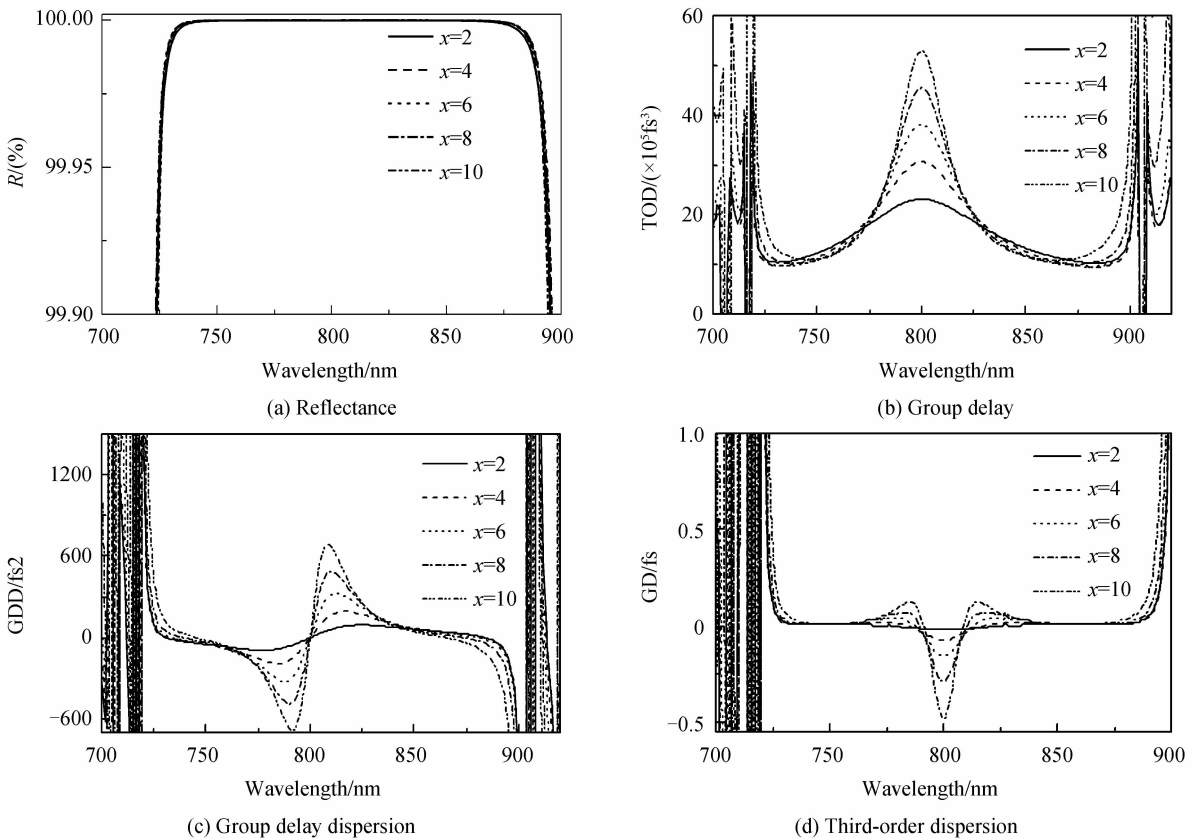


图 3 Gires-Tournois 腔厚度不同的 Gires-Tournois 镜的反射率和色散性能
 Fig. 3 Performance of Gires-Tournois mirrors with different optical thickness of Gires-Tournois cavity

2.3 部分反射膜堆的影响

部分反射膜堆一部分与 Gires-Tournois 腔相接,一部分与环境介质(本文中皆为空气)接触,根据耦合模理论和传输线理论,为了得到更好的阻抗匹

配,部分反射膜堆的最外层采用低折射率材料.部分反射膜堆的一般结构为(HL)ⁿ,部分反射膜堆紧挨着低折射率材料的 Gires-Tournois 腔,其反射率为^[16]

$$R = \left(\frac{n_0 - Y}{n_0 + Y} \right)^2 \quad (7)$$

图 4 计算了具有不同周期数 n 的部分反射膜堆的反射率. 计算中取的高低折射率材料的折射率分别是 2.3 和 1.45. 从图中可以看到, 随着 n 的增加, 部分反射膜堆的反射率也随之增加. 当 $n=5$ 时, $R=0.559$; 当 $n=6$ 时, $R=0.694$.

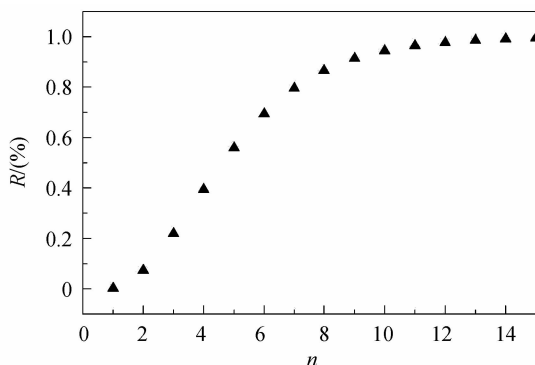


图 4 部分反射膜堆的反射率与周期数 n 的关系
Fig. 4 The reflectance of reflective films with n

由式(4)~(6)计算的中心波长 800 nm 处色散性能随部分反射膜堆的色散性能的变化曲线如图 5 所示. 在计算时, Gires-Tournois 腔的光学厚度选择为 λ . 从图中可以看到, 随着部分反射膜堆的反射率的增加, 可获得的群延迟时间和三阶色散呈非线性的增加. 在反射率达到 0.5 时, 三阶色散急剧增加.

因此为了减少三阶色散对飞秒脉冲的影响, 部分反射膜堆的结构参数 n 应小于 5.

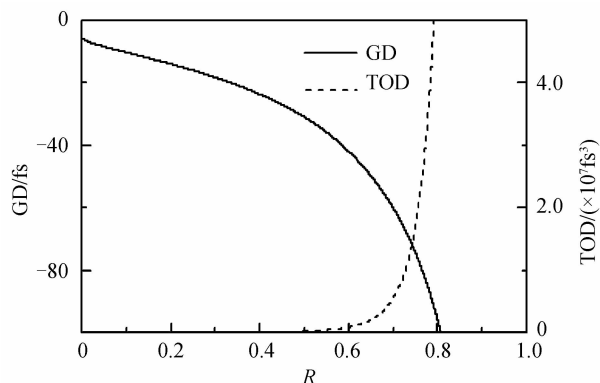


图 5 Gires-Tournois 镜在中心波长 800 nm 处的色散性能与部分反射膜堆的反射率之间的关系

Fig. 5 Performance of Gires-Tournois mirrors at 800 nm

图 6 是计算的具有不同部分反射膜堆结构的单腔 Gires-Tournois 镜的性能, 膜系结构为 $G/(HL)25H4L(HL)^n/A$, 中心波长是 800 nm, 高、低折射率膜层材料在中心波长处的折射率分别为 2.3 和 1.45. 从图中可以看到, 随着部分反射膜堆的周期数 n 的增加, 在高反带宽内, Gires-Tournois 镜的反射率和反射带宽变化不明显. 而中心波长附近可获得的群延迟时间、群延迟色散和三阶色散有大幅度的增加. 说明部分反射膜堆的变化对反射性能的影响不大但是对色散性能却具有极大的影响. 也就是说,

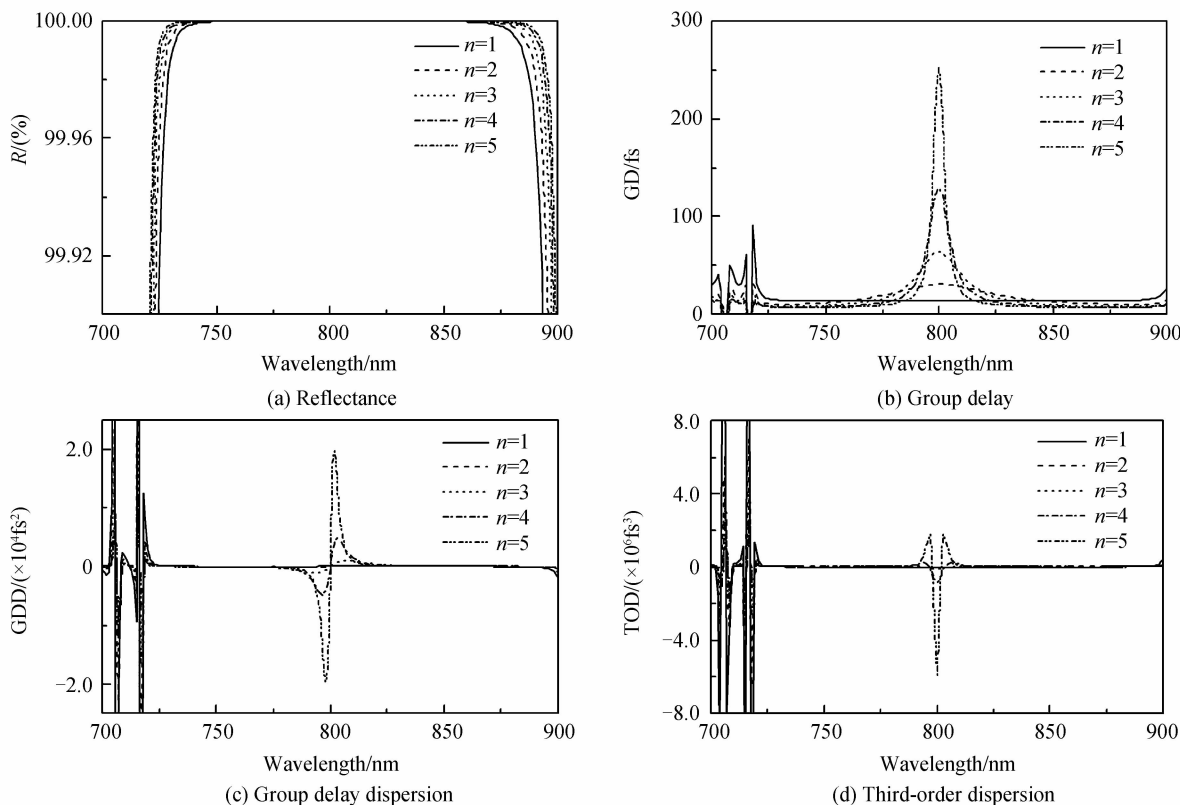


图 6 不同的部分反射膜堆结构的 Gires-Tournois 镜的反射率和色散性能

Fig. 6 Performance of Gires-Tournois mirrors with different n

在设计 Gires-Tournois 镜初始结构时,部分反射膜堆的选择将主要影响 Gires-Tournois 镜的色散性能.为了获得较大的群延迟色散和较小的三阶色散, n 的取值应小于 5.

3 结论

综上所述,运用薄膜光学的相关理论计算了 Gires-Tournois 镜的色散,分析了各个组成部分对 Gires-Tournois 镜性能的影响.高反射膜堆的选择主要影响 Gires-Tournois 镜的反射率性能,高反射膜堆的周期数 m 取值在 20~30 之间能得到较理想的 Gires-Tournois 镜设计性能.Gires-Tournois 腔的厚度主要影响 Gires-Tournois 镜的色散性能,Gires-Tournois 腔的光学厚度通常选择为 $\lambda/4$ 的 2 或 4 倍.部分反射膜堆的结构也主要影响 Gires-Tournois 镜的色散性能,部分反射膜堆的周期数 n 应小于 5.

参考文献

- [1] DEMIRBAS U, HONG K, FUJIMOTO, *et al.* Low-cost cavity-dumped femtosecond Cr: LiSAF laser producing >100 nJ pulses[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(4): 607-609.
- [2] ZHU J, WANG Z, Wang Q, *et al.* Diode-pumped passively mode-locked femtosecond Yb:(Y_{0.9}La_{0.1})₂O₃ ceramic laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, **10**(12): 121403-121403.
- [3] CHOUDHARY A, LAGATSKY A, KANNAN P *et al.* Diode-pumped femtosecond solid-state waveguide laser with a 4.9 GHz pulse repetition rate[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(21): 4416-4418.
- [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] FORK R, BRITO 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.
- [7] 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.
- [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] 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.
- [12] 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.
- [13] LIAO Chun-yan, WU Zu-bin, FAN Zheng-xiu, *et al.* HHNegative dispersion Mirrors in Ta₂O₅SiO₂ for femtosecond Ti: Sapphire lasers by using gires-tournois interferometers[J]. *Chinese Physics Letters*, 2005, **22**(6): 1443-1445.
- [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] LIAO Chun-yan, FAN Zheng-xiu, SHAO Jian-da. Design of Gires-Tournois mirrors used for the dispersion compensation in Cr: LiSAF laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011,**40**(8): 1177-1180.
廖春艳,范正修,邵建达. Cr: LiSAF 飞秒激光器中 Gires-Tournois 镜的设计[J].光子学报,2011,**40**(8):1177-1180.
- [16] MACLEOD H A. Thin-film optical filters [M]. 3rd ed. Bristol: Institute of Physics, 2001:72-75.
- [17] MACLEOD H A. Thin-film optical filters [M]. 3rd ed. Bristol: Institute of Physics, 2001:185.