

飞秒激光器中超宽带色散补偿啁啾镜对的设计*

牛海亮 章岳光[†] 沈伟东 余鹏 李旻晖 刘旭

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2011 年 1 月 10 日收到; 2011 年 2 月 23 日收到修改稿)

根据设计目标和制备要求, 以双啁啾作为啁啾镜膜系初始结构设计方法, 详细分析了双啁啾调制系数以及双啁啾层数对啁啾镜反射特性和色散特性的影响, 确立了两者之间的最佳取值组合. 利用分析结果设计了单个啁啾镜, 并实现了啁啾镜的配对设计, 获得了 600—1050 nm 范围内反射率大于 99.5%, 平均群延迟色散 -40 fs^2 , 振荡小于 $\pm 20 \text{ fs}^2$ 的啁啾镜对, 满足了钛宝石飞秒激光系统的色散补偿要求.

关键词: 超快激光, 色散补偿薄膜, 双啁啾镜, 啁啾镜对

PACS: 42.65.Re, 42.79.Bh, 42.79.Wc

1 引言

在超快激光系统中应用最为广泛的两种色散补偿镜分别是 Gires-Tournois (GT) 镜^[1]和啁啾镜^[2]. GT 镜能够提供大色散量补偿, 但是受其产生负色散的机制的限制, GT 镜所能够补偿的带宽比较窄. 尽管已经有人提出使用多个腔串联的办法来增加补偿带宽^[3], 所能够达到的带宽也仅为 200 nm 左右. 在要求进行宽带的色散补偿时, 啁啾镜是目前最主流的选择. 自 1994 年啁啾镜被发明以来已经取得了长足的发展, 无论是设计方法还是制备手段都有了很大的提高. 为了使得啁啾镜的性能最优化, 研究者们做出了不懈的努力, 提出了各种各样改进的方法, 比如双啁啾 (double chirped mirror, 简记为 DCM)^[4,5]、后端镀膜 (back-side-coated, 简记为 BASIC)^[6]、倾斜表面 (tilted-front-interface, 简记为 TFI)^[7]、针对 P 光的 Brewster 角入射的设计方法^[8]以及啁啾镜对的方法^[9]等. 国内在啁啾镜的设计和制备方面, 已经取得一系列成果^[10–15], 但在超宽带补偿方面仍鲜有报道. 本文将双啁啾和啁啾镜对的设计方法结合在一起, 详细分析了双啁啾调制系数以及双啁啾膜层数同时变化时对啁啾镜特性的影响, 并得到了双啁啾镜特性相对最佳时两者的取值组合. 以此为基础设计出了用于钛宝石飞

秒激光器的超宽带 (600—1050 nm) 啁啾镜对.

2 啁啾镜初始结构的设计

表征色散补偿镜 (dispersion mirror, 简记为 DM) 的光学特性除了反射率外, 最主要的是色散性能群延迟 D^G (group delay, 简记为 GD)、群延迟色散 D_{GD} (group delay dispersion, 简记为 GDD) 和三阶色散 D_{TO} (third-order dispersion, 简记为 TOD), 它们均可由多层薄膜的反射相移得到

$$\begin{aligned} D_G &= -\frac{d\varphi}{d\omega}, \\ D_{GD} &= -\frac{d^2\varphi}{d\omega^2}, \\ D_{TO} &= -\frac{d^3\varphi}{d\omega^3}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, φ 为膜系反射相移, $\omega = 2\pi c/\lambda$ 为角频率, c 为光速, λ 为波长. DM 镜的反射相移 φ 可以由多层膜的特征矩阵^[16]求得,

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^m \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j / n_j \\ i n_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ n_s \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$\delta_j = (2\pi/\lambda)n_j d_j \cos \theta_j$ 为薄膜的相位厚度, n_j , d_j , θ_j 分别为第 j 层的折射率、厚度和入射

* 中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 2010QNA5036) 和浙江省自然科学基金 (批准号: Y1090504) 资助的课题.

[†] E-mail: zhangyueguang@zju.edu.cn

角, n_s 是基板折射率, 则

$$\begin{aligned} r &= \frac{n_a B - C}{n_a B + C}, \\ R &= |r|^2, \\ \varphi &= \arg r, \end{aligned} \quad (3)$$

n_a 为入射介质折射率. 根据 (1)—(3) 式, 由反射相移 φ 对 ω 多次求导就可得到多层膜系的色散特性. 从中可以看出膜系的各阶色散特性取决于膜层厚度 d , 折射率 n 和入射角 θ , 所以可通过光学薄膜设计, 改变参数 (n, d, θ) 来获得特定的群延迟、群延迟色散以及三阶色散, 满足色散补偿的要求.

在设计啁啾镜初始结构时如果采用单啁啾 (single chirp mirror, 简记为 SCM) 的方法, 会由于存在严重的寄生反射而导致啁啾镜的色散曲线出现很大的非线性振荡^[17], 所以这里采用双啁啾的方法. 设计过程中为了获得线性 GD 值 D^G 补偿的初始啁啾膜系, 各层对应的 Bragg 高反波矢线性渐变, 第 s 个膜层对对应的高反波矢为

$$K_0(s) = K_{\max} - (s-1) \frac{(K_{\max} - K_{\min})}{M}, \quad (4)$$

其中 $K_{\max}$, $K_{\min}$ 分别是第一层与最后一层对应的 Bragg 高反波矢, M 是总膜层对数. 对于单啁啾膜系, 由 $d_{h,s}n_h = d_{l,s}n_l$ 可推得高、低折射率层的物理厚度分别为

$$\begin{aligned} d_{h,s} &= \frac{\pi}{2K_0(s)n_h}, \\ d_{l,s} &= \frac{\pi}{2K_0(s)n_l}. \end{aligned} \quad (5)$$

而当考虑双啁啾时其双啁啾部分各层的物理厚度为

$$\begin{aligned} d_{h,s} &= \frac{(s/m)\eta\pi}{2K_0(s)n_h}, \\ d_{l,s} &= \frac{[\pi/K_0(s) - n_h d_{h,s}]}{n_l}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 m 为双啁啾部分的膜层对数, η 为双啁啾调制系数.

m 和 η 的取值会影响膜系的反射率和群延迟色散, 因而寻找合适的 m 和 η 值作为初始结构, 对最终啁啾镜的特性具有至关重要的作用. 通常在分析 m 和 η 的影响时是分立进行的^[12,18], 然而这样得出的结论并不能全面地反映两个参数的变化对双啁啾特性的影响, 因为两者之间是相互关联的. 所以为了获得与实际情况相符的结果, 必须分析 m 和 η 同时变化时膜系的特性情况. 分析中, 整个膜系对数 M 设为 20 对, m 和 η 的取值范围为 2—20

和 0.2—2.4. 分别以设计波段内膜系的实际 GD 值与线性优化目标值之间的差值来评价膜系的色散曲线振荡程度; 以设计波段内膜系的平均反射率来评价膜系的反射特性. 图 1 和图 2 即为计算得到的在不同 m 和 η 下的膜系色散曲线振荡特性和反射特性.

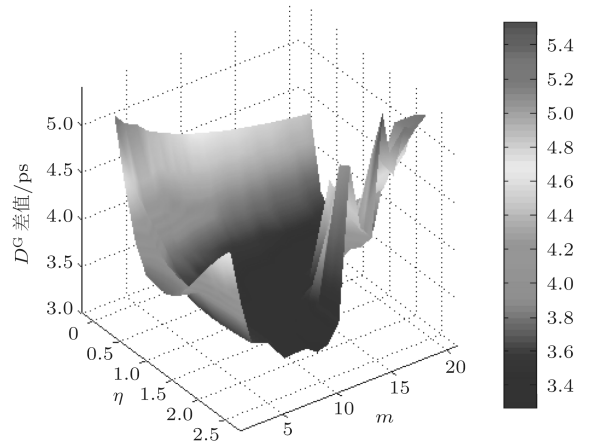


图 1 m 和 η 取不同值时膜系的色散曲线振荡特性 纵轴表示在设计波段内每一波长处膜系的实际 GD 值与线性目标值之间的差值绝对值之和

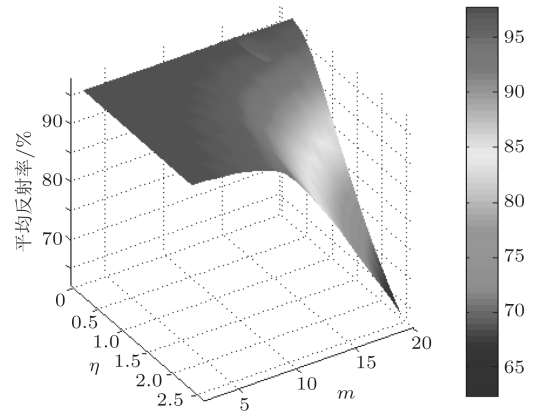


图 2 m 和 η 取不同值时膜系的反射特性 纵轴表示在设计波段内膜系的平均反射率

从图 1 和图 2 可以看出, 当 η 取值为 0.2—0.8 时, 随着双啁啾膜层数 m 的增加, 整个膜系的色散曲线逐渐趋于平滑, 同时在设计波长范围内的平均反射率会有小幅下降; 当 η 的取值为 1.0—2.4, m 的取值为 2—11 时, m 的值越大, 膜系的色散曲线越平滑, 但是当 m 取值为 12—20 时, m 的值越大, 膜系的色散曲线的振荡反而会加剧, 这是因为在短波长处膜系的色散曲线出现了很强烈的非线性振荡, 同时在设计波段内的平均反射率会有明显下降, 见图 3.

从图 1 和图 2 也可看出, 当 m 的取值为 2—6 或 12—20 时, 随着双啁啾调制系数 η 的增加, 整个膜系色散曲线的振荡程度会先减小后增大, m 为 2—6 时, 膜系在设计波段内的平均反射率随 η 的增加会有小幅下降, m 为 12—20 时, 随 η 的增加

这一下降程度会非常剧烈, 这也造成了膜系的色散曲线在短波长处出现了强烈的非线性振荡; 当 m 的取值为 7—11 时, 随着 η 的增加, 膜系的色散曲线逐渐趋于平滑, 同时在设计波段内的平均反射率的下降低并不明显, 见图 4.

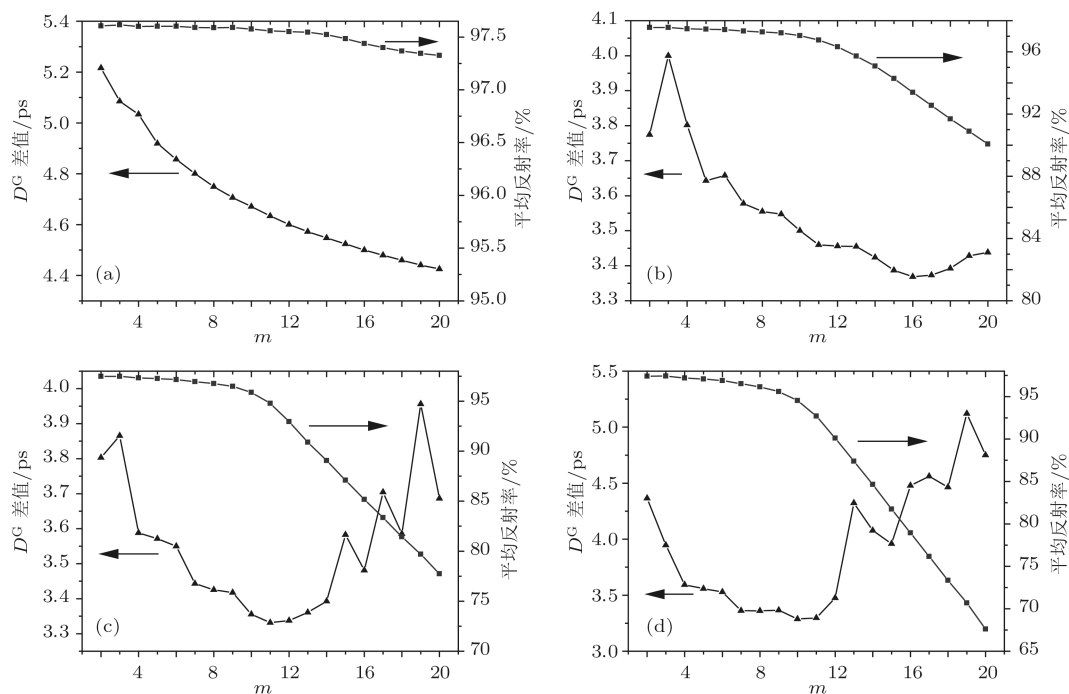


图 3 η 取不同值时膜系的色散曲线振荡特性和反射特性随 m 的变化曲线 (a) $\eta = 0.2$; (b) $\eta = 0.8$; (c) $\eta = 1.4$; (d) $\eta = 2$

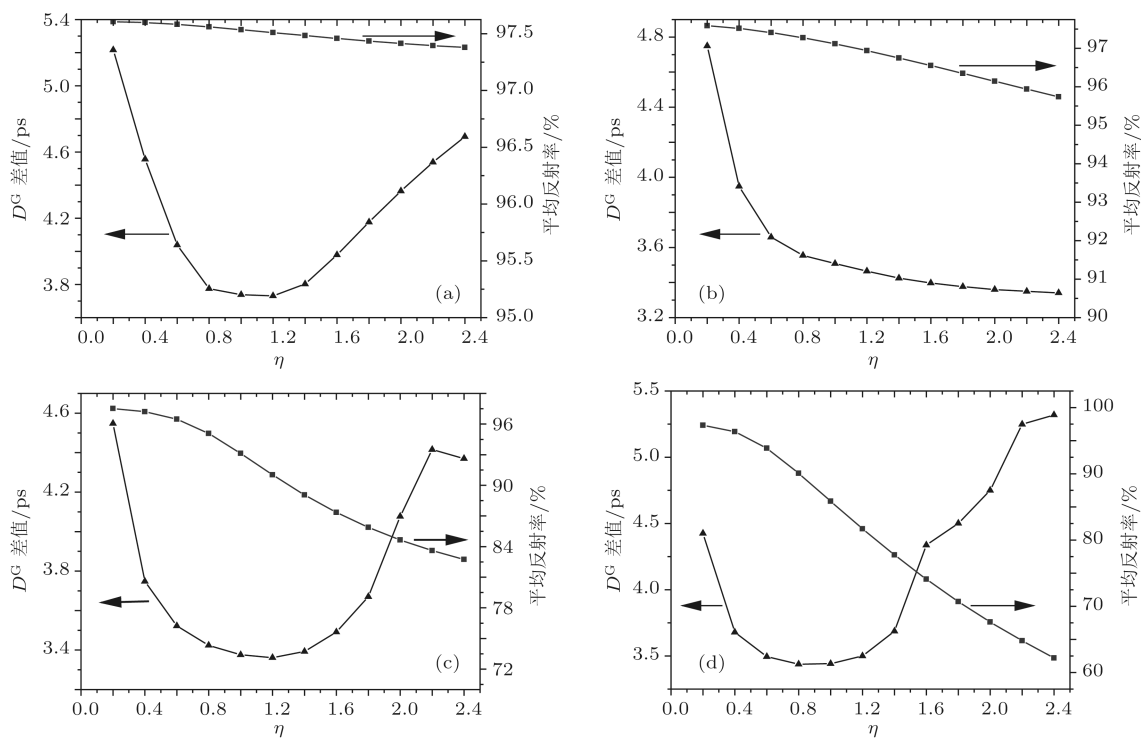


图 4 m 取不同值时膜系的色散曲线振荡特性和反射特性随 η 的变化曲线 (a) $m = 2$; (b) $m = 8$; (c) $m = 14$; (d) $m = 20$

从上述分析和讨论可以总结出: 膜系的双啁啾层数 m 和双啁啾调制系数 η 存在一个使得膜系特性相对最优的取值区域: m 在 8—11, η 在 0.8—1.4. 根据设计经验和计算数据, 这里 (m, η) 取为 (10, 1.4).

在实际情况中, 由于啁啾膜系和入射介质的导纳不匹配, 会引起色散曲线的振荡, 因而需要在膜层顶部加一宽带减反 (anti-reflective, 简记为 AR) 膜系, 并且对这一宽带减反膜系的要求很高, 在设计带宽内反射率 $R < 10^{-4}$ [5]. 由于啁啾镜对中单个啁啾镜的色散曲线平滑性要求不是很高, 只需配对的反射镜色散曲线能够互补即可. 因而在膜层顶部加了一个 $R < 2 \times 10^{-3}$ 的普通减反膜系, 这在设计上比较容易得到, 结果如图 5 所示.

图 6 为加减反膜系前后的单啁啾和双啁啾膜系 ($m = 10, \eta = 1.4$) 的群延迟曲线. 可以看到, 在膜系的顶端加减反膜系后, 两者群延迟曲线的振荡都得到了压缩, 并且双啁啾膜系色散曲线振荡压缩的效果更加明显.

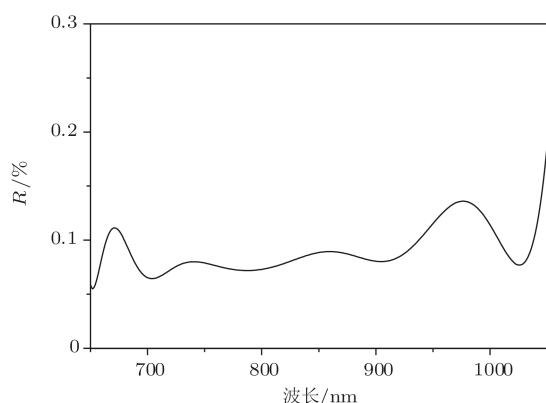


图 5 宽带减反膜系的反射率曲线

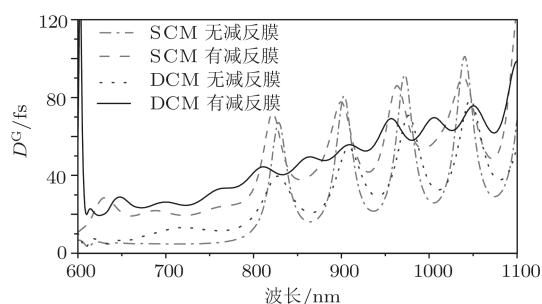


图 6 带有减反膜系的单啁啾和双啁啾膜系的 GD 曲线

3 啁啾镜对的优化设计

在获得单个双啁啾镜膜系的初始结构后, 即可进行啁啾镜对的优化设计. 啁啾镜对是指一对

色散补偿曲线互补的啁啾镜 [8]. 针对具体的钛宝石飞秒激光器系统的色散补偿要求, 设定啁啾镜的优化目标为: 反射率在 600—1050 nm 带宽内大于 99.5%; 啁啾镜对的 D_{GD} 总和在设计带宽内为 -80 fs^2 , 非线性振荡控制在 $\pm 20 \text{ fs}^2$ 内, 因而单个啁啾镜的 D_{GD} 为 -40 fs^2 . 选用的高、低折射率材料为 Nb_2O_5 , SiO_2 , 它们在中心波长处的折射率分别为 2.22 和 1.48.

膜系的优化采用 Optilayer 设计软件, 此软件有强大的自动合成 needle 算法 [19], 再辅以 gradual 算法 [20], 能够快速收敛获得理想的结果. 为了得到与目标更为接近的膜系结构, 在优化过程中始终以 GD 值 D^G 而不是 D_{GD} 作为优化参量 [8]. 膜系的 D_{GD} 值可通过对 D^G 数值求导得到

$$D_{GD} = \frac{dD^G}{d\omega} \cong \frac{D_1^G - D_2^G}{\omega_1 - \omega_2}$$

故

$$\begin{aligned} D_2^G &= D_1^G - D_{GD}(\omega_1 - \omega_2) \\ &= D_1^G - D_{GD}\left(\frac{2\pi c}{\lambda_1} - \frac{2\pi c}{\lambda_2}\right), \end{aligned}$$

这里 c 为光速, 因此只要知道起始波长处的 GD 值便可得到整个设计波段内的目标 GD 值, 见图 7(b) 中的实线. 经过优化的啁啾镜 (CM1) 的特性如图 7.

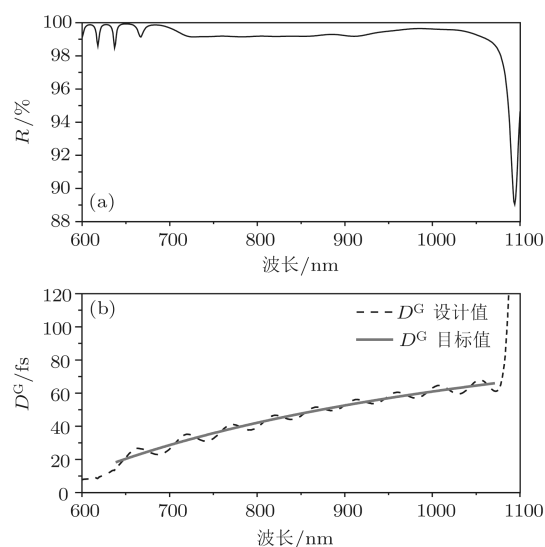


图 7 CM1 经一次优化的特性曲线 (a) 反射率; (b) GD 值

图 7 中, CM1 的色散曲线在目标值附近上下振荡, 且振荡的振幅和周期基本上是恒定的. 因此适当改变 CM1 的设计参考波长, 使其色散曲线向左或向右移动半个周期, 并以此时的膜系结构作为 CM2 的初始结构, 这样经过少数几次反复优化

即可以得到色散曲线互补得非常好的啁啾镜对. 在优化过程中, 除了第一次优化的啁啾镜, 每次优化时以与它配对的啁啾镜的当前优化结果的互补值为目标

$$\begin{cases} D_{\text{CM1,target}}^{\text{G}} = 2D_{\text{linear}}^{\text{G}} - D_{\text{CM2,real}}^{\text{G}}, \\ D_{\text{CM2,target}}^{\text{G}} = 2D_{\text{linear}}^{\text{G}} - D_{\text{CM1,real}}^{\text{G}}, \end{cases} \quad (7)$$

反复优化以达到最优结果. 在本设计中因为啁啾镜 2 的初始结构选得较好, 所以优化两个循环便能得到色散曲线互补得非常好的啁啾镜对. 图 8 是最终优化得到的 CM1 和 CM2 的膜层结构.

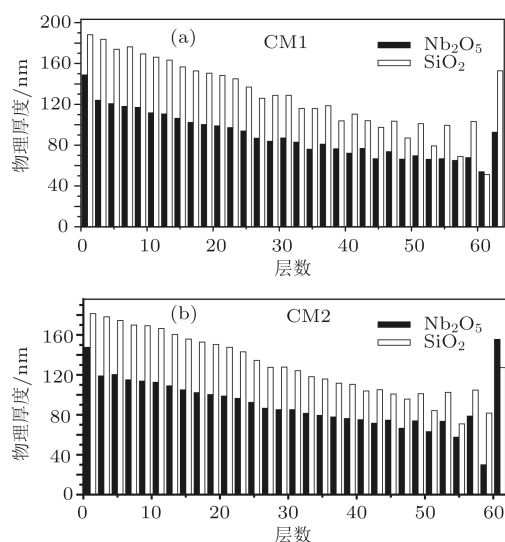


图 8 啁啾镜对的膜层结构 (a) CM1; (b) CM2

从图 8 可以看到, 啁啾镜对的膜层结构基本上仍遵循 Bragg 波长由底部到顶部逐渐减小的规律. 从制备的角度来看, 啁啾镜 CM1 由 64 层高低折射率层材料组成, 总厚度为 6967 nm, 最薄层 51 nm; 啁啾镜 CM2 由 62 层高低折射率层材料组成, 总厚度为 6821 nm, 最薄层为 29 nm, 啁啾镜对没有极薄层, 所以制备相对容易. 设计得到的反射率曲线、 D^{G} 曲线以及 D_{GD} 曲线分别如图 9(a),(b),(c) 所示.

从图 9 的设计曲线上可以看出, 所设计的啁啾镜对在 600—1050 nm 波段内的反射率很高, 达到了设计要求, 这样就减少了激光脉冲在镜子表面反射时的能量损耗. 并且在此波段内的平均二阶色散

量为 -40 fs^2 , 且非常平滑, 这样就使得在整个设计波段范围内的色散补偿量差异不是太大, 有利于得到最优的锁模输出效果.

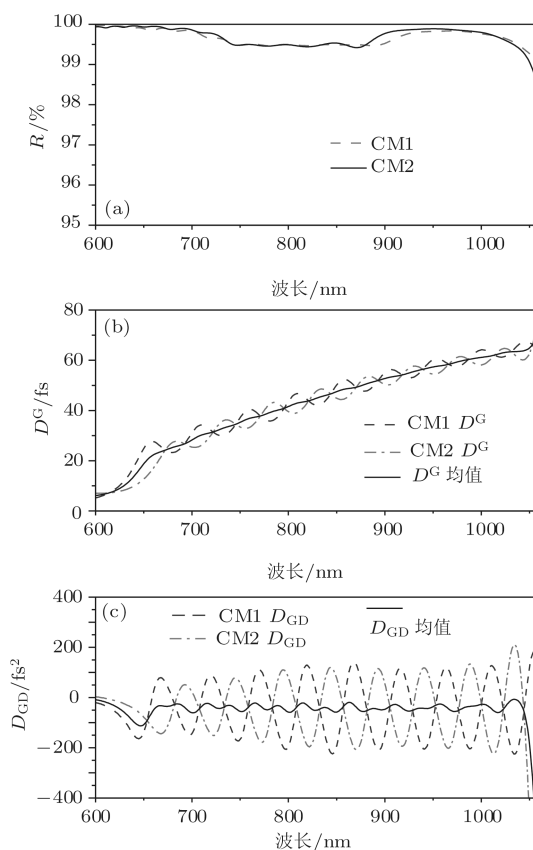


图 9 啁啾镜对的特性曲线 (a) 反射率; (b) GD; (c) D_{GD}

4 结论

讨论了色散补偿镜设计的理论基础, 在此基础上详细分析了双啁啾调制系数以及双啁啾层数对双啁啾膜系的反射特性以及色散特性的影响, 确立了两者的最佳取值组合. 利用分析结果设计了单个啁啾镜, 并实现了啁啾镜的配对设计, 满足了钛宝石飞秒激光系统的色散补偿要求. 设计完成的啁啾镜对将在实验室自己组装的双离子束溅射系统中实际加工制备, 并在钛宝石飞秒激光系统中应用.

- [1] Gires F, Tourniois P 1964 *C. R. Acad. Sci. Paris* **258** 6112
- [2] Szpöcs R, Ferencz K, Spielmann C, Krausz F 1994 *Opt. Lett.* **19** 203
- [3] Szpöcs R, Köhazsi-Kis A, Lako S, Apai P 2000 *Appl. Phys. B* **70**

- 51
- [4] Matuschek N, Kartner F X, Keller U 1997 *Opt. Lett.* **22** 11
- [5] Matuschek N, Kartner F X, Keller U 1998 *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* **4** 2

- [6] Matuschek N, Gallmann L, Sutter D H, Steinmeyer G, Keller U 2000 *Appl. Phys. B* **71** 509
- [7] Tempea G, Yakovlev V, Bacovic B, Krausz F, Ferencz K 2001 *J. Opt. Soc. Am. B* **18** 1747
- [8] Steinmeyer G 2003 *Opt. Express*. **19** 2385
- [9] Pervak V, Tikhonravov V, Trubetskov M K 2007 *Appl. Phys. B* **87** 5
- [10] Wang X, Chen L L, Yang W J, Zhang Z G 2008 *Acta Opt. Sin. (Suppl)* 0089-03 (in Chinese) [王曦, 陈玲玲, 王晔健, 张志刚 2008 光学学报 (增刊) 0089-03]
- [11] Xie X D, Wang Q Y, Wang Z, Zheng 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]
- [12] Chen X W, Yang T X, Yang S Y, Yu J, Li S C 2002 *Acta Opt. Sin.* **22** 5 (in Chinese) [陈晓伟, 杨天新, 杨少英, 于建, 李世忱 2002 光学学报 **22** 5]
- [13] 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, 张炜, 魏志义 2006 物理学报 **55** 4725]
- [14] Wang Y Z, Shao J D, Dong H C, Jin Y X, He H B, Yi K, Fan Z X, Song Y J, Hu M L, Chai L, Wang Q Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 018101 (in Chinese) [王胭脂, 邵建达, 董洪成, 晋云霞, 贺洪波, 易葵, 范正修, 宋有建, 胡明列, 柴路, 王清月 2011 物理学报 **60** 018101]
- [15] Wang Z, Wang Q Y, Han Y K, Cao S Y, Zhang Z G, Chai L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3375 (in Chinese) [王专, 王清月, 韩英魁, 曹士英, 张志刚, 柴路 2004 物理学报 **53** 3375]
- [16] Tang J F, Gu P F, Liu X, Li H F 2006 *Modern Optical Thin Film Technology* (Hangzhou: Zhejiang University Press) pp 5—29 (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 5-29 页]
- [17] Steinmeyer G 2006 *Appl. Opt.* **45** 7
- [18] Lim Y S, Jeon H S, Noh Y C, Yee K J 2002 *J. Korean Phys. Soc.* **40** 5
- [19] Tikhonravov A V, Trubetskov M K, DeBell G W 1996 *Appl. Opt.* **35** 5493
- [20] Tikhonravov A V, Trubetskov M K, Amotchkina T V, Kokarev M A 2004 *Proc. SPIE* **5250** 312

Design of ultrabroadband double-chirped mirror pairs for ultrafast lasers*

Niu Hai-Liang Zhang Yue-Guang[†] Shen Wei-Dong Yu Peng Li Yang-Hui Liu Xu

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

(Received 10 January 2011; revised manuscript received 23 February 2011)

Abstract

According to the requirements for design and manufacture, we choose double-chirped method for designing the initial structure of the chirped coatings, and analyze the dependences of reflectivity and group delay dispersion on the parameters of coatings such as the double-chirped modulation factor and the proportion of double-chirped layers on the total thin film stack. Further more, we establish their optimal values. Based on the analysis, a chirped mirror pair, whose reflectivity is more than 99.5% and average group delay dispersion is -40 fs^2 with a residual ripple of less than $\pm 20 \text{ fs}^2$ in a wavelength range of 600 nm–1050 nm, is demonstrated, which is to be used in the Ti: Sapphire femtosecond laser system for dispersion compensation.

Keywords: ultrafast laser, dispersion compensation mirror, double-chirped mirror, chirped mirror pair

PACS: 42.65.Re, 42.79.Bh, 42.79.Wc

* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. 2010QNA5036), and the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation, China (Grant No. Y1090504).

[†] E-mail: zhangyueguang@zju.edu.cn