

文章编号: 0253-2239(2009)09-2619-05

# 新型色散补偿薄膜的初始结构设计方法

罗震岳 刘旭 沈伟东 薛晖 顾培夫 章岳光

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 啁啾脉冲振荡(CPO)与飞秒激光显微系统都要求在一定带宽内能够提供大的色散补偿,如此大的色散补偿要求是之前应用于飞秒激光器的各种色散补偿薄膜结构难以达到的。为此提出一种将基于共轭腔与 G-T 腔混合结构的初始膜系设计,只要在此基础上稍加优化,就可以满足系统的色散补偿要求。针对 CPO 系统与飞秒激光显微系统的实际需求,提供了两个设计实例,验证了这种初始结构的有效性。相比于单纯用计算机优化方法生成的膜系,该结构更加简单而规整,因而便于实际的加工制备。

**关键词** 光学薄膜;色散补偿;飞秒激光

中图分类号 O484.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092909.2619

## Novel Design Method for Initial Structure of Dispersion Compensation Filters

Luo Zhenyue Liu Xu Shen Weidong Xue Hui Gu Peifu Zhang Yueguang

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

**Abstract** Chirped pulse oscillation (CPO) and femtosecond laser microscopy both require large dispersion compensation amount within a certain bandwidth. This required compensation amount is too large to achieve for those dispersion compensation filters that has already used in femtosecond laser system. A novel design method was introduced based on a conjugate cavity and Gires-Tournois cavity hybrid initial structure, dispersion compensation requirement of the system can be fulfilled by subsequent computer optimization. To prove the validity of this method, we apply two design examples were provided which meet the practical requirement of CPO and femtosecond laser microscopy. Compared with those designs by singly computer optimization, this design is much more simpler and in order, so it is easier for preparation.

**Key words** thin film optics; dispersion compensation; femtosecond laser

## 1 引言

在超短激光系统中实现精确的色散补偿是近年来研究的热点,相比于光栅对、棱镜对等传统的色散补偿方式,光学色散补偿薄膜有着明显的优点:能够对各级色散分别精确补偿、易于集成化、插入损耗小等,因而近年来得到了快速发展与广泛应用。通常评价光学薄膜器件色散补偿能力的标准主要有:有效补偿带宽、平均色散补偿量以及色散补偿曲线的非线性震荡大小等。光学色散补偿薄膜通常可以分

为两大类<sup>[1]</sup>:啁啾镜与多腔 Gires-Tournois (GT) 镜。啁啾镜的特点是在较大的带宽内实现色散补偿,但补偿量比较小,同时膜系结构复杂,制造比较困难;多腔 GT 镜补偿量要略大一些,膜系规整,制造相对简单,但是有效补偿带宽比较小。

过去研究人员主要针对超短脉冲激光器的特性要求来进行色散补偿薄膜的设计,在这类系统中要求尽可能宽的有效补偿带宽,而对色散补偿能力要求普遍不高(比如为了补偿 5mm 厚 Ti:Sapphire 引

收稿日期: 2008-10-27; 收到修改稿日期: 2008-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(60708013,60778025)资助项目。

作者简介: 罗震岳(1986—),男,硕士研究生,主要从事光学薄膜相位特性方面的研究。E-mail: surpassluo@hotmail.com

导师简介: 刘旭(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光学薄膜与光电显示技术等方面的研究。

E-mail: liuxu@zju.edu.cn(通信联系人)

起的色散需要提供 $255 \text{ fs}^2$ 的补偿量),采用啾啾镜作为基本结构,光学薄膜器件已经能够在这类系统中实现较好的色散补偿<sup>[2]</sup>。然而在其他几类常见的飞秒激光应用系统中对色散补偿量提出了更高的要求,比如啾啾脉冲放大系统(CPA, chirped pulse amplifier)或啾啾脉冲振荡系统(CPO, chirped pulse oscillator)中<sup>[3,4]</sup>要求在 $20 \text{ nm}$ 左右的带宽内提供 $25000 \text{ fs}^2$ 的色散补偿量,而飞秒激光显微系统中<sup>[5,6]</sup>要求在 $100 \text{ nm}$ 左右的带宽内提供 $1700 \sim 2700 \text{ fs}^2$ 的色散补偿量,如此大的色散补偿要求使得之前应用于飞秒激光器的各种薄膜结构已无法满足这一要求。虽然最近 V. Pervak<sup>[3]</sup>, G. Tempea<sup>[6]</sup>等分别采用 needle 与 gradual 自动合成

方法设计出了满足要求的膜系,但他们并没有提出一种针对这类特性要求的初始结构,因而使得优化后的膜系结构复杂,不易于制备。

本文提出将多个共轭腔与 G-T 腔串联作为初始结构,在这种初始结构的基础上稍加优化就能够一定带宽内实现较大量的色散补偿。针对 CPA 系统与飞秒激光显微系统的实际需求,提供了两个设计实例,验证了这种初始结构的有效性。

## 2 共轭腔色散补偿的理论基础

由光学薄膜的基础理论可知<sup>[7]</sup>,周期性对称膜系 pqp 在光学上可以用一等效单层膜来描述。这层等效膜的折射率  $E$  和相位厚度  $\Gamma$  可以分别表示为

$$E = \sqrt{\frac{M_{21}}{M_{12}}} = n_1 \left[ \frac{\sin(2\delta_p) \cos(\delta_q) + A \cos(2\delta_p) \sin(\delta_q) - B \sin(\delta_q)}{\sin(2\delta_p) \cos(\delta_q) + A \cos(2\delta_p) \sin(\delta_q) + B \sin(\delta_q)} \right]$$

$$\Gamma = \arccos[\cos(2\delta_p) \cos(\delta_q) - A \sin(2\delta_p) \sin(\delta_q)]$$

其中  $A = \frac{1}{2} \left( \frac{n_1}{n_2} + \frac{n_2}{n_1} \right)$      $B = \frac{1}{2} \left( \frac{n_1}{n_2} - \frac{n_2}{n_1} \right) \delta_{p,q} = 2\pi n_{p,q} d_{p,q} / \lambda$

其中  $\delta_{p,q}, n_{p,q}, d_{p,q}$  分别为膜层的折射率,厚度以及等效相位厚度。

对于 $(0.5 \text{ H L } 0.5 \text{ H})^n$ 与 $(0.5 \text{ L H } 0.5 \text{ L})^n$ 这两种典型的周期性对称膜系,其中 H, L 分别表示光学厚度为四分之一波长的高低折射率膜层,  $n$  表示周期数。在参考波长附近 $|\cos \Gamma| > 1$ ,且有效导纳都是虚数,因而各自表现出禁带特性,但可以证明,这两个周期性对称膜系的等效导纳在禁带内的符号和变化趋势是相反的,在禁带中心附近的某个波长上两个等效导纳是共轭的纯虚数,即  $E = -E'$ ,而两个位相厚度  $\Gamma$  是相等的,此时如果将这两种周期性对称膜系连在一起,等效的传输矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \cos(n\Gamma) & \frac{i}{E} \sin(n\Gamma) \\ iE \sin(n\Gamma) & \cos \Gamma \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(n\Gamma) & \frac{i}{-E} \sin(n\Gamma) \\ -iE \sin(n\Gamma) & \cos(n\Gamma) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

即此时在禁带中出现了一个透射的共振峰,这种效应类似于 F-P 腔的共振效应,由于造成这种共振效应的起因是两边的膜堆具有共轭的等效导纳,因此称这种结构为共轭腔结构。同样采用类似 G-T 腔的结构:

$\text{sub}|(0.5 \text{ HL } 0.5 \text{ H})^m (0.5 \text{ LH } 0.5 \text{ L})^n | \text{air} (m > n)$ , 光在传播过程中会产生类 G-T 腔的谐振效应。因此

也能产生一定反射群延迟,可以用来做色散补偿。

为了比较这种共轭腔与传统 G-T 腔的区别,分别计算了 G-T 腔与共轭腔的反射率-群延迟曲线,如图 1 所示,其中  $R_1, \text{GD}_1$  是针对 G-T 腔:  $\text{sub}|(\text{HL})^{10} 2\text{H}(\text{LH})^3 | \text{air}$  计算得到的结果,  $R_2, \text{GD}_2$  是针对共轭腔  $\text{sub}|(0.5 \text{ HL } 0.5 \text{ H})^{10} (0.5 \text{ LH } 0.5 \text{ L})^3 | \text{air}$  计算得到的结果(参考波长 $550 \text{ nm}$ )。光经过共轭腔产生的最大群延迟量有所下降,但是群延迟曲线的半宽变大了,这意味着共轭腔能够有效补偿更大的频谱范围。同时还可以发现,共轭腔的群延迟曲线发生了一定的偏移,因而如果能够将 G-T 腔与共

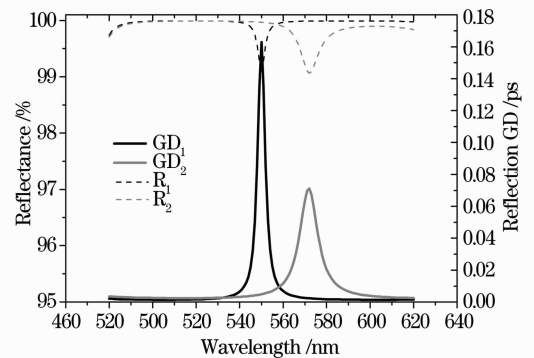


图 1 G-T 腔与共轭腔的反射率与群延迟曲线

Fig. 1 Reflectivity and reflection group delay characteristics of Gires-Tournois cavity and conjugate cavity

共振腔串联起来,就可以有效地将两条群延迟曲线连起来,从而在更大的频谱范围内进行色散补偿,同时可以获得很高的色散补偿量。

在实际的优化设计过程中还发现,采用多个 G-T腔与共共振腔串联的初始结构,能够覆盖更宽的波段,并且在优化过程中能够较快地达到优化目标。下面将针对两个实际使用的飞秒激光系统的色散补偿要求,给出设计结果。

### 3 设计实例

#### 3.1 用于 Yb:YAG 振荡器系统中的色散补偿镜设计

最近研究人员采用一种二极管抽运的激光振荡器获得了 60 W 平均功率的高能激光输出<sup>[4]</sup>,在这种激光振荡器中为了达到光孤子锁模的效果,要求比较大的负群延迟色散(GDD)。以一个典型的 Yb:YAG 振荡器系统为例,要求能够在 1020~1040 nm 的带宽内产生  $-22000 \text{ fs}^2$  的 GDD, V. Pervak<sup>[3]</sup>最近通过计算机优化的方法给出了一个膜系设计,但结构比较复杂。下面我们将基于 G-T腔串联共共振腔的初始结构来进行设计。

考虑到所要求的 GDD 值比较大,单独的 G-T腔或者是共共振腔无法满足要求,我们选用一个 G-T腔与一个共共振腔混合的结构形式作为初始设计,简单调整各个腔两边的周期数以尽可能接近设计要求,最终选择如下初始结构  $(0.94\text{H } 0.94\text{L})^{10} (\text{HL})^{10} 2\text{H}(0.5\text{HL } 0.5\text{H})^2 (0.5\text{LH } 0.5\text{L})^2$ , H, L 分别对应四分之一波长光学厚度的  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  ( $n=2.1@1030 \text{ nm}$ ) 以及  $\text{SiO}_2$  ( $n=1.434@1030 \text{ nm}$ ),参考波长为 1040.0 nm,整个结构是一个 G-T腔,  $(0.5 \text{ HL } 0.5 \text{ H})^2 (0.5 \text{ LH } 0.5 \text{ L})^2$  作为 G-T腔中的低反射率膜层,同时本身又是一个共共振腔结构。图 2 给出了该初始结构的群延迟曲线,可以看出这种初始结构在 1000~1050 nm 相对较宽的波段范围内提供色散补偿,并且群延迟

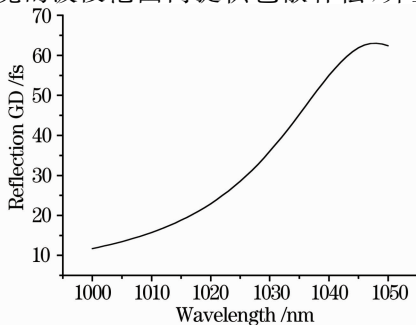


图 2 初始结构的群延迟曲线

Fig. 2 Reflection group delay for the initial structure

曲线近似线性,这预示着群延迟色散曲线会比较平坦,并且非线性震荡比较小。因而这个初始结构的色散特性已经比较接近设计要求了。

在这个初始结构的基础上,针对设计目标,进行计算机优化,优化时固定后面 30 层的光学厚度不变以保证高反特性,只优化前面 20 层,所得结果如图 3 所示。从优化之后的膜系结构可以看出,设计结果基本保持了初始膜系的基本结构,只是在各层的具体厚度上有些略微调整。整个薄膜的物理厚度为  $7.14 \mu\text{m}$ ,最薄膜层物理厚度是 20 nm。

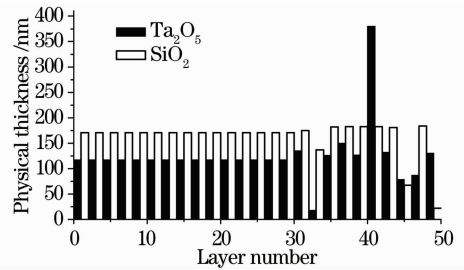


图 3 优化之后的膜系结构(层数从基板侧逐渐增加)

Fig. 3 Physical thickness for the optimized structure

图 4 给出了优化结构的反射率与群延迟色散(GDD)补偿曲线。可以看出在要求的波段范围内,可以维持较高的反射率( $R > 99.9\%$ ),这使得光脉冲能够多次在表面反射而没有大的能量损耗。同时 GDD 值基本上控制在  $-2400 \text{ fs}^2$  左右,比文献<sup>[3]</sup>中的  $-2000 \text{ fs}^2$  还要大,虽然有一些波动,但是最大的波动范围不超过 8%。光在这种色散补偿镜表面反射 10 次后就可以达到系统的要求。同时,不管是膜层数目还是总的物理厚度相比于文献<sup>[3]</sup>中的设计结果都有明显的降低,并且结构更加规整而简单,便于制备。

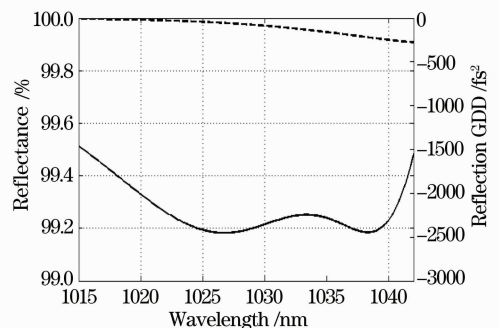


图 4 反射率与群延迟色散(GDD)补偿曲线

Fig. 4 Reflectivity and reflection group delay characteristics for the optimized structure

为了进一步分析这种色散补偿薄膜的工作机理,计算了同频率的光波在薄膜内部的驻波场分布,如图 5 所示,图中可以看到光能量主要集中在薄膜

靠近空气侧的部分,主要由这部分膜层来控制各个波长的光在膜系内部的群延迟,而靠近基板侧的那部分起的主要作用是保证有较高的反射率,而对色散补偿量几乎没有贡献。同时从图中还可以看出,对于 1040 nm 波长的光,最大穿透深度大约是 5000 nm,对应的群延迟是 17 fs,但计算该波长光的群延迟是 148 fs,所以群延迟主要不是来自于对光穿透深度的调制,而是来自于腔的共振,这与文献[3]完全不同。从图 5 中还可直观看出,对于 1035~1040 nm 的光,在穿透深度 3000 nm 左右因为发生腔共振而产生很高的驻波场值。

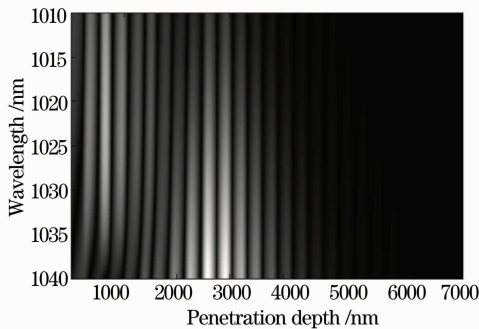


图 5 不同频率的光波在薄膜内部的驻波场分布  
Fig. 5 Standing wave distribution for each spectral component inside the dispersion compensating mirror

色散补偿镜的 GDD 曲线对制造误差十分敏感,为了确认设计结果的实用性。进行了初步的误差分析,计算时假设各层薄膜的物理厚度随机改变  $\pm 1$  nm,随机循环 200 次。在图 6 中用误差棒表明了最坏的情况,可见在考虑误差的情况下 GDD 的补偿曲线会呈现一定的波动,但是波动的范围还是可以接受的,同时对各种误差情况下的 GDD 曲线取平均,其值非常接近理想情况,表明由于制造误差产生的该膜系对于镀制的要求并不苛刻 GDD 曲线偏差基本以理想情况为中心上下波动。此外我们的

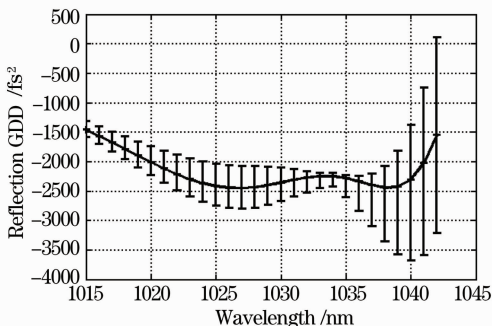


图 6 误差分析,误差棒表明最坏的情况  
Fig. 6 Tolerance analysis. Error bar representing the worst case

设计中 70% 以上的膜层都是规整的四分之一膜系,便于制造时的膜系监控和误差控制,这些都说明这一设计结果是实用而可行的。

### 3.2 用于预补偿聚焦透镜产生的色散的色散补偿

在飞秒激光多光子显微成像技术、反斯托克斯拉曼光谱显微术以及飞秒激光材料加工中都会使用到聚焦透镜,聚焦透镜会引入  $1700\sim 2700$  fs<sup>2</sup> 的群延迟色散,对于半峰全宽(FWHM)小于 100 fs 的光脉冲,经过这样一个聚焦透镜后会产生强烈的变形,因而也需要引入色散补偿镜进行预补偿,根据实际系统的要求<sup>[5,6]</sup>,设定如下补偿目标:在 750~850 nm 的波段范围内提供  $-200$  fs<sup>2</sup> 的色散补偿量,这样经过表面十次左右的反射就可以满足系统的色散要求,同时还要保证 99.5% 以上的反射率。

考虑到有效补偿的工作范围比较宽,考虑采用 3 个 G-T 腔与 1 个共轭腔串联的形式,并且调整 G-T 腔的间隔层厚度以覆盖尽可能宽的波段,在简单的参数调整之后,选用如下的初始结构  $\text{sub} | (\text{HL})^{14} 3.2 \text{H} (\text{LH})^5 \text{L} 1.6 \text{H} (\text{LH})^5 2 \text{L} (0.5 \text{H} \text{L} 0.5 \text{H})^2 (0.5 \text{L} \text{H} 0.5 \text{L})^2 | \text{air}$ ,其中 H, L 分别对应四分之一波长光学厚度的  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  ( $n=2.12$  @800 nm) 与  $\text{SiO}_2$  ( $n=1.44$  @800 nm),通过软件优化,很快就得到如下的优化设计结果,如图 7 所示。从图 7 中可以看出,优化后的结果还是基本保留了初始膜系的设计特性,其中第 29 和 52 层是 G-T 腔的间隔层。1~25 层表现为厚度渐变的高反膜系,主要是为了在一定的波段范围内保证较高的反射率。整个膜系总厚度是  $7.05 \mu\text{m}$ ,最薄层厚度为 50 nm。由图 8 可见,整个系统的特性基本达到了要求,并且 GDD 补偿曲线的震荡控制在  $\pm 12$  fs<sup>2</sup> 以内,完全符合设计要求。相比于文献[10]基于多腔 G-T 腔为初始结构的设计结果,该结构在更宽的波段范围内提供了相当于 5 倍的色散补偿量。这进一步证明了本结构适用于在一定的频谱范围内提供较大的色散补偿量。

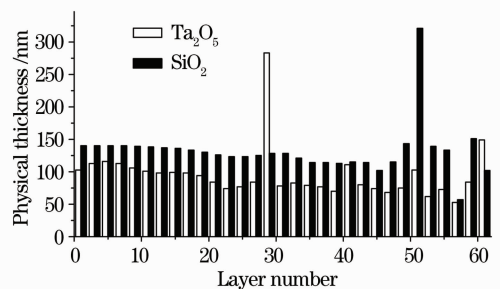


图 7 优化后的膜系结构(层数从基板侧逐渐增加)  
Fig. 7 Physical thickness for the optimized structure

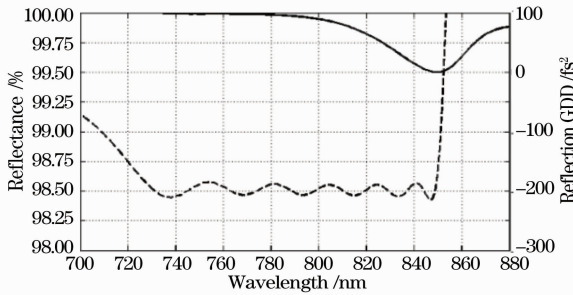


图 8 反射率与群延迟色散(GDD)补偿曲线

Fig. 8 Reflectivity and reflection group delay characteristics for the optimized structure

## 4 结 论

提出了一种包含多个共轭腔与 G-T 腔作为初始膜系设计方法,设计步骤为首先通过调整间隔层厚度,两端的周期数等结构参数,得到色散特性最接近设计要求的初始膜系结构,然后通过计算机优化,就可以快速得到符合设计要求的结果,这种设计方法特别适用于那些对色散补偿的带宽要求不宽,但对色散补偿量有较大要求的场合,比如 CPO 系统和飞秒激光多光子显微成像系统。针对这两个系统分别给出了两个设计实例,具体说明了共轭腔与 G-T 腔串联这种初始结构的实用性。

## 参 考 文 献

- 1 Szpoc R, KohaziKis A., Lako. S. *et al.*. Negative dispersion mirrors for dispersion control in femtosecond lasers; chirped dielectric mirrors and multi-cavity Gires-Tournois interferometers [J]. *Appl. Phys. B* 2000, **70**(7): 51~57
- 2 V. Pervak, A. V. Tikhonravov, M. K. Trubetskov *et al.*. 1.5-octave chirped mirror for pulse compression down to sub-3 fs[J]. *Appl. Phys. B*. 2007, **87**: 5~12

- 3 Pervak, C. Teisset, A. Sugita *et al.*. High-dispersive mirrors for femtosecond lasers[J]. *Opt. Express* 2008, **16**: 10220~10233
- 4 E. Innerhofer, T. Südmeyer, F. Brunner *et al.*. 60 W average power in 810 fs pulses from a thin-disk Yb:YAG laser[J]. *Opt. Lett.* 2003, **28**: 367~369
- 5 Tempea, G. Tuan Le, Martion Hofer *et al.*. Dispersion management for microscope objectives[C]. *Conference on Lasers & Electro-Optics (CLEO)*, 2005, **1-3**: 2034~2036
- 6 G. Tempea, B. Povazay A. Assion *et al.*. All-Chirped-Mirror Pulse Compressor for Nonlinear Microscopy in Biomedical Optics [C]. *Conference on, Biomedical Topical Meeting (BIO)* 2006: WF2
- 7 Tang JinFa, Gu PeiFu. *Modern Optical Thin Film Technology* [M]. Hangzhou: Zhejiang Univ. Press, 2006. 43~47
- 唐晋发,顾培夫. *现代光学薄膜技术*[M]. 杭州: 浙江大学出版社 2006, 43~47
- 8 Chen Rui, Wang Fengli, Wang Zhanshan. Producing Subfemtosecond Pulses by Using Chirped Multilayer Mirror in the Extreme Ultraviolet Region[J]. *Chinese J. lasers* 2008, **35**(9): 1380~1383
- 陈锐,王凤丽,王占山. 极紫外啁啾多层膜反射镜产生亚飞秒脉冲[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1380~1383
- 9 Gao Yanxia, Zhao Gaiqing, Xu Shixiang. A Novel All-Optical Accurate Synchronization for Broadband Optical Parametric Chirped Pulse Amplification [J]. *Acta Optica Sinica*. 2007, **27**(8): 1481~1484
- 高艳霞,赵改清,徐世祥. 用于宽带啁啾脉冲光参量放大系统精确同步的新方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1481~1484
- 10 Liao Chunyan, Shao Jianda, Fan Zhengxiu Design of Negative Dispersion Mirrors Used for the Femtosecond-pulse Laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 731~733
- 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): 731~733
- 11 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
- 12 V. Pervak, F. Krausz, A. Apolonski. Dispersion control over the UV-VIS-NIR spectral range with HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> chirped dielectric multilayers, [J] *Opt. Lett.*, 2007, **32**: 1183~1185