

飞秒脉冲激光器中色散补偿膜的设计*

廖春艳 邵建达 范正修

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 阐述了用光学薄膜进行色散补偿的基本原理, 介绍了设计的基本过程. 根据 Ti:Sapphire 飞秒激光器腔内色散补偿的要求, 设定了色散补偿目标, 通过计算机优化, 得到了一种 40 层的 Ta₂O₅/SiO₂ 介质膜系. 该膜系能在 720 ~ 870 nm 范围获得大于 99.5% 的反射率, 在 510 ~ 550 nm 获得大于 90% 的透射率, 在 740 ~ 850 nm 提供较平滑的 -40 fs² 的群延迟色散. 这样的结果经过 7 次反射后, 可以补偿 5-mm Ti:sapphire 晶体产生的绝大部分群延迟色散.

关键词 光学薄膜; 飞秒脉冲; 群延迟色散; 色散补偿

中图分类号 O484.4⁺1 **文献标识码** A

0 引言

超短激光技术是近年来激光物理的主要发展趋势之一^[1]. 脉宽更窄、功率更高的激光器的研制一直是激光器的重要发展方向之一^[2]. 但是随着脉宽的变窄, 脉冲在激光器的固体增益介质中传播时, 介质的群延迟色散 (group delay dispersion, GDD) 将成为发展更短激光脉冲的障碍^[1,3]. 因此为了获得更短的脉冲, 必须对增益介质的正色散进行补偿.

棱镜对^[4]是当前引入的最典型的腔内色散补偿元件, 但是用棱镜对对群延迟色散进行补偿的同时会引入高阶的色散, 阻碍了脉宽的进一步压缩^[5]. 并且, 由于输出脉冲宽度对腔和棱镜的调节非常敏感, 这就使得系统的稳定运行变得十分困难. 同时, 棱镜间隔的最小值也限制了激光器的尺寸和输出脉冲的重复频率^[1]. 所以有必要寻求一种新型的色散补偿元件.

从上个世纪九十年代开始, 国内外的研究者就致力于该领域的研究并取得了很大的成效^[6-9]. 主要得到了两大类色散补偿膜. 其中一类是 R. Szpöcs^[10] 率先提出的啁啾反射镜 (chirped mirror), 啁啾镜虽然能提供较宽的腔内色散补偿, 但可获得的色散量较小, 一般需要多次反射才能满足色散补偿要求. 另一类是 G-T 镜 (Gires-Tournois mirror)^[11], G-T 镜可获得较大的色散量, 但是带宽较窄, 通常需要通过几个 G-T 镜组合或多个 G-T 腔得到较宽的色散补偿. 本文设计了一种由 40 层的 Ta₂O₅/SiO₂ 介质膜系组成的色散补偿结构. 同以往的色散补偿结构^[11] 相比, 该结构中非 λ/4 层层数少, 易于镀制. 与以往的 G-T 镜^[9] 相比, 该结构能

在更宽的色散带宽 (110 nm) 内提供更稳定的群延迟色散, 将更有利于脉宽的压缩; 与啁啾镜^[8] 相比, 该结构能提供较大的群延迟色散量, 因此经过 7 次反射就可以较好地补偿飞秒脉冲激光器中 5-mm Ti:sapphire 晶体引入的腔内正色散.

1 薄膜进行色散补偿的理论基础

当光入射到薄膜上时将在薄膜两个表面上多次反射, 如图 1. 作为多次反射光干涉的结果的合成振

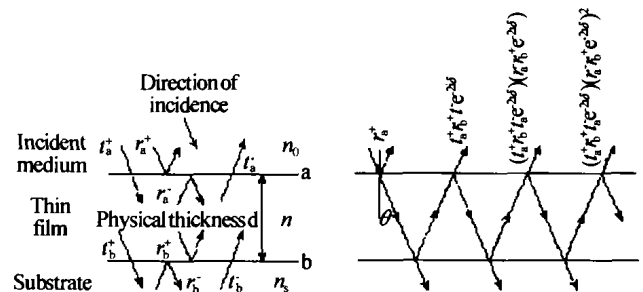


图 1 多光束干涉的参数

Fig. 1 Parameters in the multiple beam summation

幅反射系数为^[12]

$$r = r_a^+ + t_a^+ r_b^+ t_a^- e^{-2i\delta} + (t_a^+ r_b^+ t_a^- e^{-2i\delta}) (r_a^- r_b^+ e^{-2i\delta}) + (t_a^+ r_b^+ t_a^- e^{-2i\delta}) (r_a^- r_b^+ e^{-2i\delta})^2 + \dots = \frac{r_a + r_b e^{-2i\delta}}{1 + r_a r_b e^{-2i\delta}} \quad (1)$$

式中, $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n d \cos \theta$ 是膜层的有效位相厚度.

如果其中一个界面 (界面 b) 是理想的全反射面 ($R_b = 100\%$), 另一个界面的反射率为 R , 入射光脉冲每反射一次将受到一次相移 $2\delta = \frac{4\pi}{\lambda} n d \cos \theta$, 令 $t_0 = 2nd \cos \theta / c$, 则 $2\delta = \omega t_0$, 那么由式 (1), 振幅反射系数为

$$r = \frac{-\sqrt{R} + e^{-i\omega t_0}}{1 - \sqrt{R} e^{-i\omega t_0}}$$

根据欧拉公式可得

* 国家自然科学基金资助项目 (60378005)

Tel: 021-69918494 Email: lcy9612@siom.ac.cn

收稿日期: 2004-03-23

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

因此反射光的相位变化^[13,14]是

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

忽略 t_0 和折射角 θ 对于 ω 的依赖关系, 上式分别对 ω 求一阶导数、二阶导数、三阶导数可分别得到群延迟时间、群延迟色散和三阶色散

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

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

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

从式(3)~(5)可以看出, 群延迟时间、群延迟色散和三阶色散随入射角 θ 和/或膜层厚度 d 的变化可以发生从正到负的变化, 因此可通过调节入射角 θ 和/或膜层厚度 d 来调节色散. 而在光学薄膜设计中, 改变光学常数(n, d, θ)可以在极大范围内改变频谱的反射特性和位相特性. 也就是说, 通过一定的光学膜系设计, 能够得到特定的群延迟时间、群延迟色散和三阶色散, 满足色散补偿的要求.

2 色散补偿膜的设计

2.1 设计目标

用于飞秒脉冲固体激光器中的色散补偿膜的设计一般考虑以下三方面^[1]: ① 在不小于色散带宽的宽带范围内具有高反射率; ② 在整个调节范围内具有平滑的负群延迟色散以允许激光器的飞秒锁模; ③ 为了取代腔内的标准分色镜, 在泵浦波长处具有较高的透射率.

本文的设计针对掺钛蓝宝石(Ti:Sapphire)自锁模激光器中的腔内色散补偿. 为了问题的方便, 仅考虑 Ti:Sapphire 晶体引入的色散. Ti:Sapphire 晶体在 800 nm 的二阶色散约为 $56 \text{ fs}^2/\text{mm}$, 对 5 mm 长的晶体, 在 800 nm 其二阶色散量约为 280 fs^2 . 如果设计的色散补偿膜在中心波长 800 nm 处的二阶色散为 -40 fs^2 , 这样经过 7 次反射便可以补偿 5 mm 长的钛宝石晶体的色散.

根据上述设计要求, 结合 Ti:Sapphire 晶体的色散性能, 本文提出以下设计目标: ① 720 ~ 880 nm 反射率 $R > 99.5\%$; ② 中心波长 800 nm 处 $\text{GDD} = -40 \text{ fs}^2$, 带宽为 100 nm; ③ 510 ~ 550 nm 透射率 $T > 90\%$.

2.2 材料和初始设计

设计选用的高、低折射率材料分别为 Ta_2O_5 和 SiO_2 . 它们的折射率根据镀膜机用实际靶材标定, 在 800 nm 波长处的折射率分别为 2.098 和 1.480.

在色散补偿膜的设计中, 初始设计的好坏至关重要. 不合适的初始设计可能优化不出有意义的结果, 而恰当的初始设计则可以节约大量的计算时间. 从 1.2 部分的分析可知, 调节膜层厚度 d 可以调节膜层的色散, 但是单纯线性地改变膜层厚度会使光波在膜层间传输形成 F-P 效应, 即长波长分量在深入膜层底部返回后, 由于表层膜层一定的反射带宽, 又被表层的膜层所反射, 因而使得长波长分量在膜层间振荡, 最终使色散曲线形成振荡, 导致色散补偿不充分, 甚至形成脉冲分裂. 为了减小这种振荡, 本文通过一个啁啾正弦调制函数来调制膜层的厚度^[15], 并以这样的结构为初始结构, 在此基础上通过现有的商用膜系设计软件进行优化可以很快找到合适的膜层结构.

2.3 优化结果与分析

图 2 是本文最后得到的设计膜系. 该膜系是由 40 层高 (Ta_2O_5)、低 (SiO_2) 折射率材料交替组成的, 基底是 K9 玻璃. 其中基底以上 25 层是标准的 $\lambda/4$ 膜系, 能保证膜层在 720 ~ 880 nm 波长范围内的高反性能. 从 26 层到 40 层的膜层厚度则由计算机优化确定. 具体的优化目标函数是: ① 在中心波长 800 nm 处的群延迟色散为 -40 fs^2 , 带宽为 750 ~ 850 nm, 并在该带宽内有一定的斜率, 即同时提供一定量的负三阶色散; ② 在 510 ~ 550 nm 的透射率大于 90%; ③ 同时满足在 720 ~ 880 nm 波长范围内 $R > 99.5\%$.

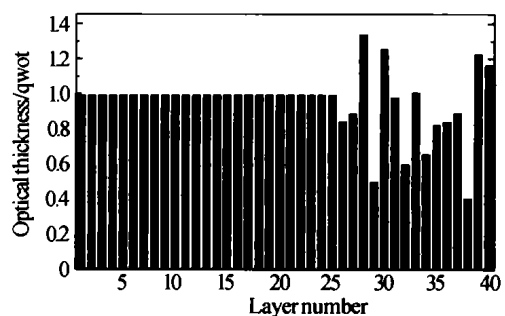


图 2 优化膜系的光学厚度

Fig. 2 Optical layer thickness of optimized mirror

图 3 是该膜系的反射率曲线和群延迟色散曲线. 从光谱曲线 a 可以看到, 本文设计的膜系结构在 720 ~ 880 nm 的波长范围内能获得大于 99.5% 的反射率、在 510 ~ 550 nm 波长范围内能获得大于 90% 的透射率, 可以满足设计目标. b 中实线是本文设计的反射镜的群延迟色散曲线, 虚线是其经过 7 次反射得到的群延迟色散, 点线是 5 mm Ti:Sapphire 晶体的二阶正色散的期望补偿值(斜率表示三阶色散). 如图中所示, 本文设计的膜系的群延迟曲线在

740 ~ 850 nm 波长范围内膜系能提供平滑变化的 -40 fs^2 群延迟色散, 并且群延迟色散随波长增加而上升, 这表明该结构能同时提供一定量的负三阶色散. 7次反射后的群延迟色散约为 -252 fs^2 (800 nm), 可以补偿 2.1 中提到的 5 mm 长的 Ti:Sapphire 晶体的绝大部分二阶正色散. 并且经过 7 次反射后的群延迟色散曲线的斜率趋势与 Ti:Sapphire 晶体 GDD 期望补偿值的斜率趋势相同, 说明这种结构同时也具有补偿 Ti:Sapphire 晶体的三阶正色散的潜力.

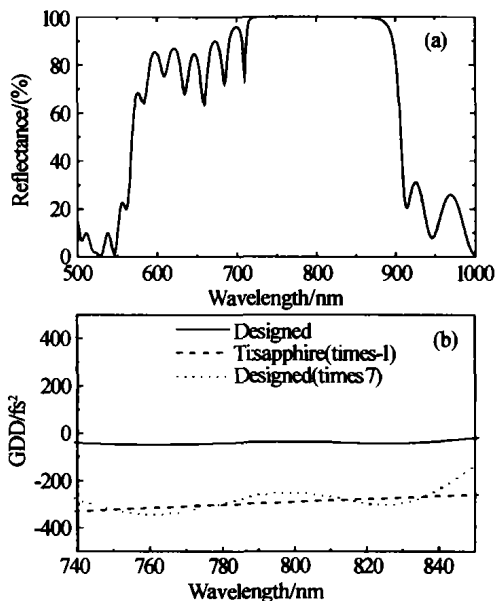


图3 膜系的优化结果(a)反射率(b)群延迟色散
Fig.3 Calculated (a) reflectance and (b) GDD verse wavelength of optimized mirror

另外,膜系群延迟色散曲线在 740 ~ 850 nm 存在一些振荡,尤其是经过 7 次反射后振荡更加明显,这主要是由于设计的膜系界面匹配还不是足够的完美,因而长波长分量在界面的反射还没有完全消除,从而引起了群延迟色散曲线的细微振荡.这说明色散(主要是三阶色散)补偿还不充分,有待于进一步提高,这将是我们的下一步设计的重点.

图 4 是该膜系中非 $\lambda/4$ 层的一阶层敏感性. 可以看到:这些膜层的厚度对目标函数的敏感性都在 10^{-7} nm^{-1} 数量级,表明这些层的厚度变化对镀制结果的影响较小. 这说明这一膜系对镀制工艺水平的

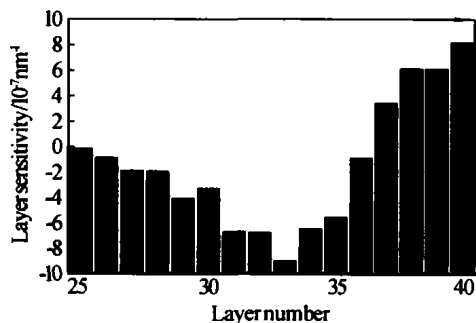


图4 优化结果的一阶层敏感性
Fig.4 First-order layer sensitivity of the result

要求并不苛刻,是可以重复实现的.

3 结论

通过计算机优化得到了一种 40 层的 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 介质膜系. 设计结果表明:该膜系在 720 ~ 870 nm 可获得大于 99.5% 的反射率,在 510 ~ 550 nm 可获得大于 90% 的透射率;同时在 740 ~ 850 nm 的波长范围内能较稳定地提供 -40 fs^2 的群延迟色散,可以用于飞秒脉冲锁模激光器的群延迟色散补偿.

参考文献

- 1 Szipöcs R, Köhízi-Kis A. Theory and design of chirped dielectric laser mirrors. *Applied Physics B*, 1997, **65** (2): 115 ~ 135
- 2 白晋涛,穆参军,于连君,等. 全固化自锁模飞秒 Ti:S 激光器实验研究. *光子学报*, 2001, **30** (10): 1292 ~ 1296
Bai J T, Mu C J, Yu L J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30** (10): 1292 ~ 1296
- 3 Brabec T, Spielmann Ch, Krausz R. Limitations to pulse duration in solitary lasers. *Optical Letter*, 1992, **17** (10): 748 ~ 750
- 4 王屹山,陈果夫,赵尚弘,等. 宽带自锁模钛宝石飞秒激光脉冲的实验研究. *光子学报*, 2000, **29** (3): 203 ~ 208
Wang Y S, Chen G F, Zhao S H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29** (3): 203 ~ 208
- 5 Ivan P, Margaret M, Henry C K, et al. Fourth-order dispersion-limited solitary pulses. *Optical Letter*, 1994, **19** (18): 1465 ~ 1467
- 6 Körtner F X, Matuschek N, Schibli T, et al. Design and fabrication of double-chirped mirrors. *Optical Letter*, 1997, **22** (11): 831 ~ 833
- 7 Chen Xiaowei, Yang Tianxin, Tan Bin, et al. An efficient optimization method for dispersion compensation mirrors design. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31** (7): 860 ~ 864
- 8 Tempea G, Yakovlev V, Bacovic B, et al. Tilted-front-interface chirped mirrors. *J Opt Soc Am B*, 2001, **18**: 1747 ~ 1750
- 9 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. *光学学报*, 2001, **21** (11): 1384 ~ 1387
Sun H, Zhang Z G, Chai L, et al. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21** (11): 1384 ~ 1387
- 10 Szipöcs R, Ferencz K, Spielmann Ch, et al. Chirped multilayer coating for broadband dispersion control in femtosecond lasers. *Optical Letter*, 1994, **19** (3): 201 ~ 203
- 11 Szipöcs R, Köhízi-Kis A, Lakó S, et al. Negative dispersion mirrors for dispersion control in femtosecond lasers: chirped mirrors and multi-cavity Gires-Tournois interferometers. *Applied Physics B*, 2000, **70** (Suppl.): S51 ~ S57

- 12 Macleod H A. *Thin-Film Optical Filters*. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2001. Chapter 2
- 13 Ferencz K, Szipöcs R. Recent developments of optical coatings in Hungary. *Optical Engineering*, 1993, 32(10): 2525 ~ 2538
- 14 Jürgen Kuhl, Joachim Heppner. Compression of femtosecond optical pulses with dielectric multilayer interferometers. *IEEE Transactions on Quantum Electronics*, 1986, QE-22(1): 182 ~ 185
- 15 Gabriel Tempea, Ferenc Krausz, Christian Spielmann, et al. Dispersion control over 150 THz with chirped dielectric mirrors. *IEEE Journal of Selected Quantum Electronics*, 1998, 4(2): 193 ~ 196

Design of Negative Dispersion Mirrors Used for the Femtosecond-pulse Laser

Liao Chunyan, Shao Jianda, Fan Zhengxiu

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

Received date: 2004-03-23

Abstract The basic theory of dispersion compensation of the thin film is discussed. The optimized multiplayer mirrors used for a femtosecond mode-locked Ti:Sapphire laser is reported. The mirrors exhibit high reflectivity ($>99.5\%$) over a wavelength range from 720 to 870 nm, high transmittance ($>90\%$) from 510 to 550 nm and smooth variation of group delay dispersion from 740 to 850 nm. Most GDD of a 5-mm Ti:Sapphire crystal can be compensated by seven bounces.

Keywords Negative dispersion mirrors; Femtosecond-pulse; Group delay dispersion; Dispersion compensation

Liao Chunyan born in 1979, is a candidate of Ph. D. in research and development center for optical thin film coatings, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Recently, She is undertaking the research of the optical thin film used for the dispersion compensation in the ultrashort lasers.