中国光学（中英文）
Chinese Optics
Ei 核心期刊

飞秒激光系统相位延迟反射镜的研制

牛鸿琨 张静 付秀华 马国水 金海俊 杨飞

Development of phase delay mirrors for femtosecond laser systems

NIU Hong-kun, ZHANG Jing, FU Xiu-hua, MA Guo-shui, JIN Hai-jun, YANG Fei

引用本文:
牛鸿琨, 张静, 付秀华, 马国水, 金海俊, 杨飞. 飞秒激光系统相位延迟反射镜的研制[J]. 中国光学, 2024, 17(6): 1442–1449. doi: 10.37188/CO.2024-0015
NIU Hong-kun, ZHANG Jing, FU Xiu-hua, MA Guo-shui, JIN Hai-jun, YANG Fei. Development of phase delay mirrors for femtosecond laser systems[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(6): 1442-1449. doi: 10.37188/CO.2024-0015

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2024-0015

文章编号 2097-1842(2024)06-1442-08

飞秒激光系统相位延迟反射镜的研制

牛鸿琨[1,2], 张 静[1*], 付秀华[1,2], 马国水[3], 金海俊[3], 杨 飞[4]
（1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学中山研究院 光电工程学院, 广东 中山 528437;
3. 光驰科技 (上海) 有限公司, 上海 200444;
4. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033）

摘要: 为了对飞秒激光系统的群延迟色散 (group-delay dispersion, GDD) 进行调控, 设计并制备了相位延迟反射镜。本文系统地研究了相位延迟反射镜补偿群延迟色散原理, 使用 Nb_2O_5 和 SiO_2 作为高低折射率材料, 并采用将相位延迟反射镜与其互补镜配对的方式平缓了群延迟色散曲线, 制备出了相位调控数据为−800 fs^2 的相位延迟反射镜。该反射镜在 900 ~ 1 100 nm 范围内的反射率达到 99% 以上, 解决了飞秒激光系统带宽调节的问题, 满足飞秒激光器的使用要求。

关 键 词: 群色散延迟; 低振荡; 反射镜; 宽带调节; 相位调控
中图分类号: O436 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2024-0015 **CSTR:** 32171.14.CO.2024-0015

Development of phase delay mirrors for femtosecond laser systems

NIU Hong-kun[1,2], ZHANG Jing[1*], FU Xiu-hua[1,2], MA Guo-shui[3], JIN Hai-jun[3], YANG Fei[4]
(1. *School of Opto-electronic Engineering*, *Changchun University of Science and Technology*, *Changchun* 130022, *China*;
2. *School of Opto-electronic Engineering*, *Zhongshan Institute of Changchun University of Science and Technology*, *Zhongshan* 528437, *China*;
3. *OPTORUN (Shanghai) Co.*, *Ltd.*, *Shanghai* 200444, *China*;
4. *Changchun Institute of Optics*, *Fine Mechanics and Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: 465589960@*qq.com*

Abstract: Phase delay mirrors were designed and prepared to regulate femtosecond laser systems' group-

收稿日期: 2024-01-15; **修订日期:** 2024-02-05
基金项目: 吉林省科技发展计划项目资助(No. 20230101008JC); 中国科学院青年创新促进会优秀会员(No. Y202053); 中国科学院国际伙伴计划(No. 181722KYSB20200001); 国家自然科学基金(No. 11973040); 中山市精密光学薄膜创新科研团队项目(No. CXTD2023008)
Supported by Science and Technology Development Plan Project of Jilin Province (No. 20230101008JC); Excellent Member of Youth Innovation Promotion Association, CAS (No. Y202053); International Partnership Program of the Chinese Academy of Sciences (No. 181722KYSB20200001); National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No. 11973040); Research Project of Precision Optical Thin Film Innovation Team in Zhongshan City (No. CXTD2023008)

delay dispersion (GDD). This paper systematically investigates the principle of compensating group-delay dispersion by phase-delay mirrors. Nb_2O_5 and SiO_2 were used as the materials with high and low refractive indices. The group-delay dispersion curves were smoothed out by pairing the phase-delay mirrors with their complementary mirrors. The phase-delayed mirrors with phase modulation data of −800 GDD were prepared, and the reflectivity reached more than 99% in the range of 900 nm−1 100 nm. The bandwidth adjustment problem of femtosecond laser systems is solved to meet the requirements of femtosecond lasers

Key words: group dispersion delay; low oscillation; reflector; broadband modulation; phase modulation

1　引　言

自从上世纪 60 年代世界上第一台红宝石激光器问世以来, 激光技术一直朝着高功率、短脉宽、全固态、小型化方向发展。近几年来, 该领域最引人瞩目的就是超快激光技术。高功率超快激光器因为具有超短的脉宽、高脉冲重复频率和超短的频谱等特点, 已经成为精密加工、前端科学研究、天文探测等高科技领域的关键核心部件。

激光器在产生脉冲的过程中, 具有一定光谱宽度的超短脉冲在色散介质中传输时, 不同频率的光波会有不同的传输速度, 从而造成不同频率成分在时间上分开, 从而导致脉冲展宽。对于一般的光学材料, 脉冲会发生红移, 即出现正啁啾现象, 而光学非线性效应也会加剧这一现象, 因此, 精确补偿并且抵消色散与非线性效应的不利影响是超短脉冲激光器中的关键技术。

对于飞秒激光器, 传统的调节色散方式为使用一对棱镜或光栅来对色散进行补偿, 但是由于在制备时其材料自身引起的高阶色散无法避免, 而且无法在光学系统中紧凑排布, 这使得传统色散调节方式的输出频率受限。相位补偿镜由于具有周期性结构, 所以更容易设计出所需要补偿的一阶、二阶色散。此外, 由于相位补偿镜相对于光栅、棱镜具有损耗更低、体积更小、更容易使用的优点, 在激光系统中的重要性逐渐增加。近年来国内外对于相位补偿镜的研究也在逐渐增加。

2017 年, 哈尔滨工业大学将光子多层膜中的传输矩阵理论应用于双啁啾镜设计, 在理论上设计出可以对 600 ~ 1 100 nm 带宽范围提供−100 fs^2 色散补偿的色散镜对[1]; 2018 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所设计了一对高色散镜, 其基于高反射层和 G-T 腔组合这一结构, 设计了一对能在 680~920 nm 带宽范围内提供−200 fs^2 平坦群延迟色散的高色散镜[2]; 2020 年, 立陶宛物理与科学技术中心通过沉积后退火工艺, 对啁啾反射镜的表面应力进行补偿, 制备出了在 750~900 nm 带宽范围内能提供−300 fs^2 稳定平滑群延迟色散的相位延迟反射镜[3]; 2021 年, 马克斯·普朗克光子研究所通过一次镀膜同时制备两个反射镜减少了镀膜间的误差, 制备了能在 980~1 080 nm 波长范围内提供−500 fs^2 左右的稳定群延迟色散的相位延迟反射镜对[4]。

在负色散补偿方面, 目前所使用的色散镜分为两种类型: Gires-Tournois(G-T) 干涉镜和啁啾镜。啁啾镜通过调制中心布拉格波长随膜厚变化, 使不同波长分量进入到膜层的不同深处。从内向外逐渐变薄的膜层使得长波在相位补偿反射镜内的光程较长, 短波在相位补偿反射镜内的光程较短, 从而在相位补偿反射镜内产生不同的负延迟色散[5]。啁啾相位补偿反射镜可以对更宽波长范围内的色散进行补偿, 但由于膜层总厚度的限制, 也会导致负延迟色散的数值受限, 大约在−200 fs^2 以内, 故需要进行多次反射达到更高的二阶色散。此外, 啁啾镜为非规整膜系, 这也增大了啁啾镜的制备难度。

本文采用 G-T 腔来提供色散补偿, 制备了在 970 ~ 1 100 nm 波长范围内反射率达 99% 以上, 在 980 ~ 1 050 nm 波长范围内可提供−800 fs^2 的负色散镜, 据所查资料显示, 相关研究未见报导。

2　膜系设计

根据飞秒激光器的要求, 需要设计并制备中心波长为 1 030 nm、入射角为 0° ~ 3°, 在 970 ~ 1 100 nm 波长范围内反射率大于 99%, 其 GDD(群延迟色散) 在 1 030 nm 处为−800 fs^2, 在 1 060 nm 处为 0 fs^2。相位补偿反射镜的技术参数如表 1 所示。

表 1　相位补偿反射镜的技术参数

Tab. 1　Technical parameters of phase compensation mirrors

参数	具体信息
基板	K9或者石英
入射角度/(°)	0° ~ 3°
反射率/(%)	⩾99%@970 ~ 1 100 nm
GDD/ fs^2	−800@1 030 nm
GDD/ fs^2	0@1 060 nm

2.1　G-T 相位补偿镜原理

G-T 镜结构类似于 F-B 镜，F-B 镜是由两个或者多个对称的反射镜组成，而 G-T 镜是由两个不对称的反射镜组成一个单腔 F-B 结构，靠近空气侧的反射率要低，当光从反射率较低的一侧入射时，会形成类似腔镜反复震荡的效果，通过优化膜系结构实现所需要的负色散补偿[6]。如图 1 所示。

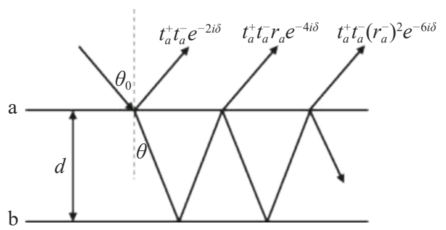


图 1　G-T 镜示意图

Fig. 1　Schematic diagram of G-T mirror

图 1 中界面 b 是理想的反射面（$R_b = 100\%$），另一个界面 a 的反射率为 R，θ_0 和 θ 分别为界面 a 上的入射角和折射角，t_a 为界面 a 上的透过率，r_a 为界面 a 上的反射率，δ 为膜层的有效相位厚度，则相邻两束反射光之间的相位差[7] 为：

$$2\delta = \frac{4\pi}{\lambda} nd\cos\theta \quad . \tag{1}$$

令 $t_0 = 2nd\dfrac{\cos\theta}{c}$，其中 c 为光速，又有 $\omega = \dfrac{2\pi\lambda}{c}$，则 $2\delta = \omega t_0$，多次反射光干涉结果的合成振幅反射系数为

$$r = \frac{-\sqrt{R} + e^{-i\omega t_0}}{1 - \sqrt{R}e^{-i\omega t_0}} \quad , \tag{2}$$

式中，反射率可以表示为

$$R_{G-T} = \left[\frac{1 + R + 2\sqrt{R}\cos(\omega t_0)}{1 + R - 2\sqrt{R}\cos(\omega t_0)}\right]^2 \quad , \tag{3}$$

反射光的相位变化为

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

对相位进行求导可得到 G-T 镜的群延迟时间 (GD_t) 和群延迟色散 (GDD)

$$GD_t = \frac{d\varphi}{d\omega} = -\frac{t_0(1-R)}{(1 + R - 2\sqrt{R}\cos\omega t_0)} \quad , \tag{5}$$

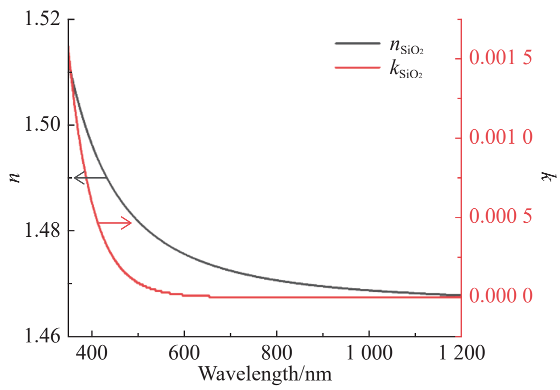
$$GDD = \frac{d^2\varphi}{d\omega^2} = \frac{2t_0^2\sqrt{R}(1-R)\sin\omega t_0}{(1 + R - 2\sqrt{R}\cos\omega t_0)^2} \quad , \tag{6}$$

2.2　膜系优化设计

根据飞秒激光器的技术指标[8]，选用 G-T 镜来对二阶色散进行调控，按照技术参数要求，初步确认相位延迟反射镜的基本结构为 $S\,|\,(HL)^{m+n}(H1.5LH)^m(L1.5HL)^n\,|\,A$，其中 A 表示空气；S 表示基底；H、L 分别表示高低折射率材料。

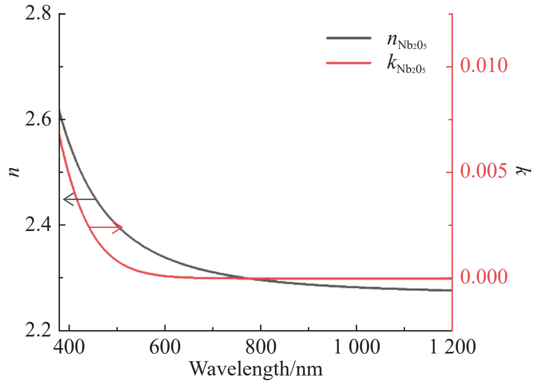
采用磁控溅射沉积的方法制备膜系[9]。通过对靶材进行筛选，最终选择 Nb 靶与 Si 靶，用反应溅射生成 Nb_2O_5 膜和 SiO_2 膜，基底为石英或 K9 玻璃。如图 2（彩图见期刊电子版）所示。对设备进行调试后，在稳定工艺下镀制出的 Nb_2O_5 和 SiO_2 单层膜。经过测试和计算机拟合，得到 Nb_2O_5 和 SiO_2 两种材料的光学常数曲线。

靠近基板侧的 $(HL)^{m+n}$ 多层膜结构为整体膜系提供高的反射率，靠近空气层的 $(H1.5LH)^m(L1.5HL)^n$ 多层膜结构则通过调控谐振腔的等效厚度实现负色散延迟。通过 Optilayer 软件将光谱要求的技术参数导入，对膜系进行优化，优化后的膜系结构简图[10] 如图 3（彩图见期刊电子版）所示。



(a) SiO_2 光学常数曲线

(a) Optical constant curve of SiO_2



(b) Nb_2O_5 光学常数曲线
(b) Optical constant curve of Nb_2O_5

图 2　计算机拟合出的 SiO_2 和 Nb_2O_5 光学常数曲线图

Fig. 2　Optical constant profiles of SiO_2 and Nb_2O_5 obtained by computer fitting

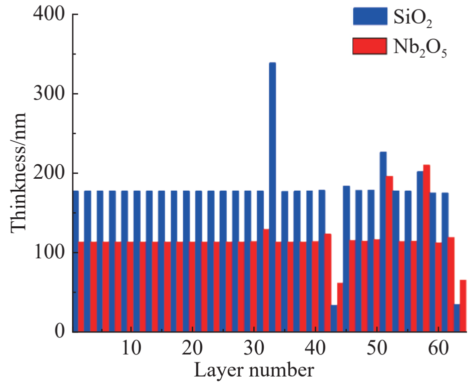


图 3　相位延迟反射镜薄膜结构

Fig. 3　Structure of the phase-delayed reflector's film system

优化后膜系层数为 64 层, 中心波长 λ_0 = 1 030 nm, 对应的 Nb_2O_5 的折射率为 $n_{Nb_2O_5}=2.278$, SiO_2 的折射率为 $n_{SiO_2}=1.462$。设计反射率在 970～1 100 nm 波长范围内为 99.9%, 在 980 nm～1 050 nm 波长范围内的色散补偿量为 $-800 fs^2$GDD, 如图 4 所示。

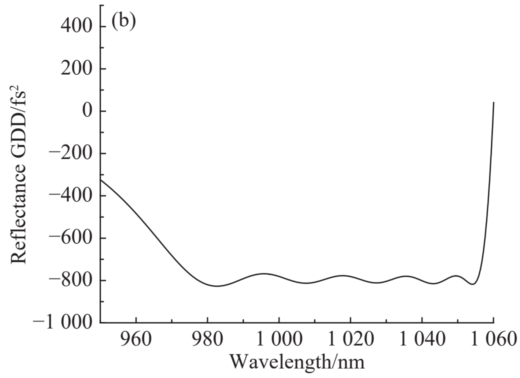


图 4　设计得到的相位延迟反射镜的(a)反射率曲线与(b)群延迟色散曲线图

Fig. 4　(a) Reflectance curve and (b) group delay dispersion curve of the designed phase-delayed reflector

从图 4 可以看出, 在 980～1 050 nm 波长范围内群延迟色散具有振荡波纹, 为了平滑群延迟色散的振幅, 在原相位延迟反射镜的基础上继续进行优化设计, 得到与之匹配的互补镜对。互补镜层数为 66 层, 膜系结构如图 5(彩图见期刊电子版)所示。通过将 G-T 镜与其互补镜对进行匹配[11], 得到的最终的反射率曲线与色散曲线如图 6 所示。

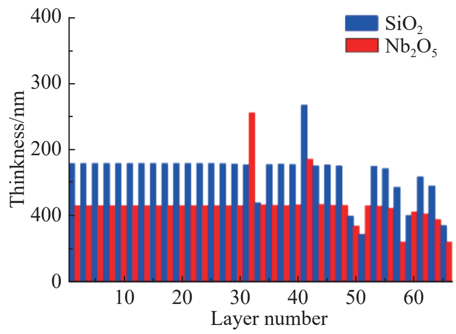
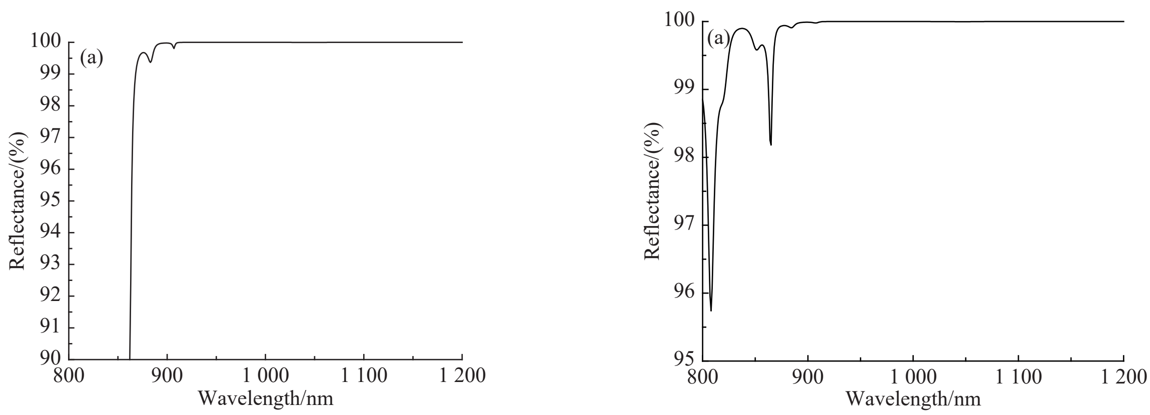


图 5　相位延迟反射镜互补镜对膜系结构

Fig. 5　Structure of the film system of complementary mirror pairs for phase-delayed mirror



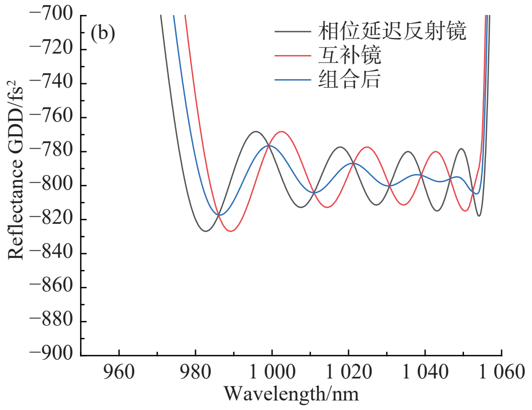


图 6 相位延迟反射镜与互补镜组合后的(a)反射率曲线与(b)群延迟色散曲线图

Fig. 6 (a) Reflectance curve and (b) group delay dispersion curve of the phase-delayed reflector combined with the complementary mirror

从图 6 可以看出，将 G-T 镜配对使用后，在 970～1100 nm 波长范围内反射率为 99.9%，在 970～1050 nm 波长范围内群延迟色散量由 (-800 ± 35) fs^{2}GDD 减少到 (-800 ± 15) fs^{2}GDD。

3 薄膜的制备

镀膜采用的是光驰的 OWLS-1800 平面磁控溅射镀膜机，监控方式为时间监控。镀膜机备有两个 ICP 源，可以稳定高效地激发反应气体，以保证膜层质量的稳定性。靶材使用的是纯度为 99.999% 的 Nb 靶和 Si 靶，与纯度为 99.999% 的 O_2，在中频磁控溅射下反应生成 Nb_2O_5 和 SiO_2，并沉积在基底表面。相位延迟反射镜优化的工艺参数如表 2 所示。

表 2 薄膜材料沉积工艺参数

Tab. 2 Film material deposition parameters

材料	Nb_2O_5	SiO_2
基底温度(°C)	145	145
工作真空(Pa)	7.7×10^{-1}	5.2×10^{-1}
沉积速率($nm\cdot s^{-1}$)	0.255	0.225
ICP气体	O_2+Ar	O_2+Ar
ICP参数	Power: 2.2 kW 电压：510 V 电流：14.5 A	Power: 2.2 kW 电压：730 V 电流：8.5 A

4 实验结果与分析

4.1 误差分析与修正

G-T 镜对的光谱使用 Cary7000 紫外红外可见分光光度计进行测量，测试结果如图 7 所示。由图 7 可知，所制备的 G-T 镜的反射率曲线在中心波长范围内存在 0.15% 的振荡，所测得的群延迟色散的振幅为 (800 ± 82)fs^2，如图 7(彩图见期刊电子版)所示。

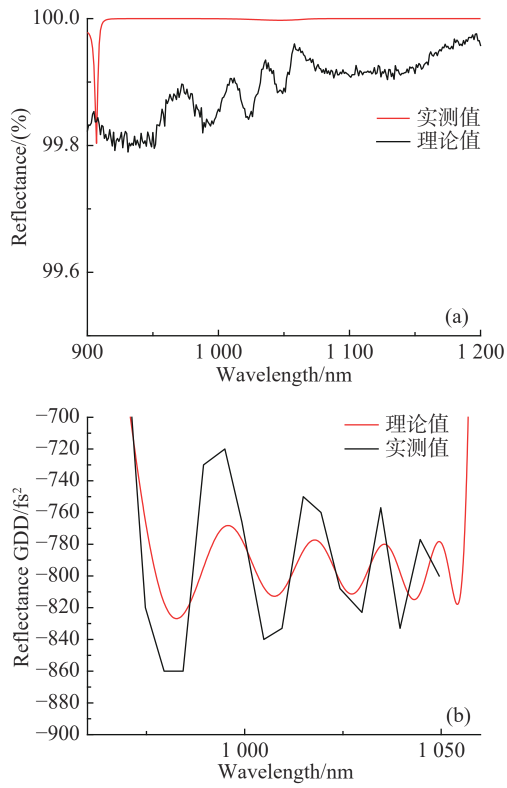


图 7 计算及测量得到的相位延迟反射镜的 (a) 反射率曲线与 (b) 群延迟色散曲线对比图

Fig. 7 (a) Reflectivity curve and (b) group delay dispersion curve of phase-delay reflector obtained by measurement and calculation

经过多次实验与分析发现，在镀膜时真空室的温度会随着镀膜时间的延长逐步增加，温度变化对于 SiO_2 折射率的影响不大，但是 Nb_2O_5 的折射率对温度较为敏感，当基板温度升高时，Nb_2O_5 的折射率逐步降低，如图 8 所示。经过分析与拟合发现，随着温度的升高，Nb_2O_5 的光学厚度 nd 增加，与设计不符，导致误差产生。

为了减小厚度误差，对不同温度下沉积的一定厚度的 Nb_2O_5 薄膜进行光谱测量，拟合得到了

不同温度下的折射率色散分布曲线。将其代入膜系设计, 对每一层 Nb_2O_5 的厚度进行修正, 重新镀制膜系。如图 9 所示, 可以看出修正后的相位延迟反射镜的测量数值与设计曲线吻合较好, 满足使用要求。

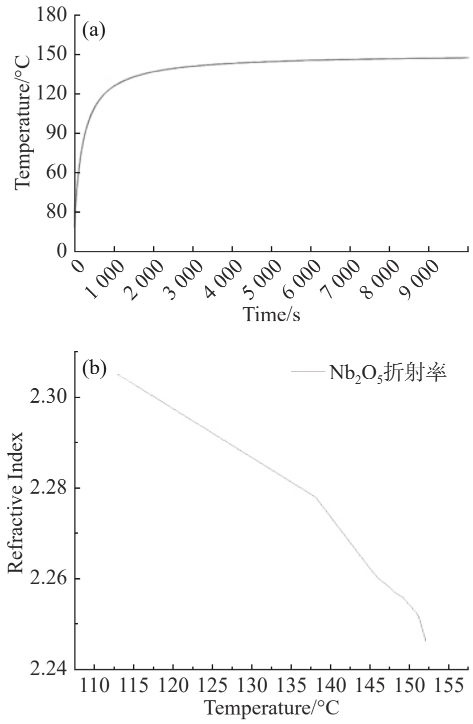


图 8　Nb_2O_5 材料折射率温度测试拟合结果。(a) 基板温度随时间变化曲线; (b) Nb_2O_5 折射率随温度变化曲线

Fig. 8　Fitting results of refractive index of Nb_2O_5 material varying with temperature. (a) Substrate temperature varying with time; (b) refractive index of Nb_2O_5 varying with temperature

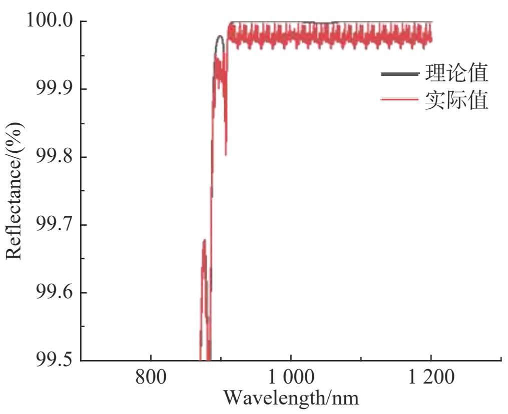


图 9　相位延迟反射镜反射率测量曲线

Fig. 9　Measured reflectance curve for phase-delayed reflector

4.2　相位延迟的测量

相位延迟反射镜对的相位延迟量通过实验室搭建的检测装置进行测试, 检测原理图如图 10 所示。由光源发出的飞秒激光入射到高反射镜, 经过分光镜后, 部分激光进入到光栅对中, 再由屋脊棱镜反射回来, 另一部分激光经二次反射到相位延迟反射镜组。系统引入镜对后测得的自相关曲线, 如图 11 所示。与正常使用光栅对进行相位补偿相比, 其飞秒激光的输出脉宽由 453 ps 减小到 253 fs, 可以得出在引入相位延迟反射镜对后, 该系统的脉冲带宽成功被压缩。

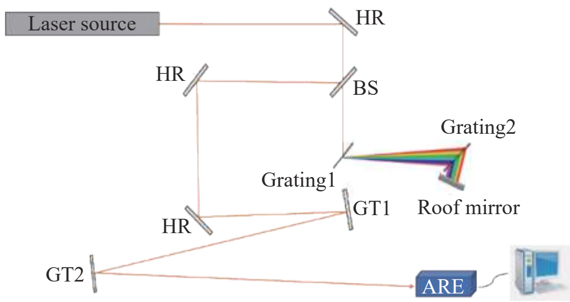


图 10　飞秒激光器示意图

Fig. 10　Schematic diagram of femtosecond laser system

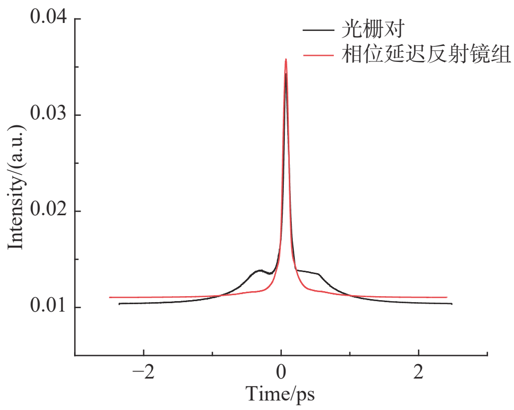


图 11　飞秒激光系统的测量结果

Fig. 11　Measurement results of femtosecond laser system

在该激光系统中, 除 G-T 镜组以外, 光栅对也可以为飞秒激光系统提供群延迟色散。其中心间隔越大, 为系统提供的负色散越大, 通过改变光栅对的中心间隔, 可以获得与 G-T 镜组等效的相位延迟效果。对光栅对的相位求二阶导数 φ^2, 计算出 G-T 镜对的相位补偿量:

$$\varphi_2 = \frac{-8\pi^2 c b_g}{\omega_0^3 \Lambda^2 \cos^2\theta_{r0}} , \tag{7}$$

其中 $\omega_0 = \frac{2\pi c}{\lambda_0}$, c 为光速, θ_{r0} 为对应波长 λ_0 下的衍射角, b_g 为两光栅的中心间距 ($b_g = b_0 \sec\theta_{r0}$), Λ 为光栅常数。

如图 12(彩图见期刊电子版)所示, 通过测出

的自相关曲线，计算出 G-T 反射镜的群延迟色散，为−800fs^2。可以看出 G-T 镜与其互补镜与设计结果基本吻合，两者匹配使用后，群延迟色散振辐有所减少。

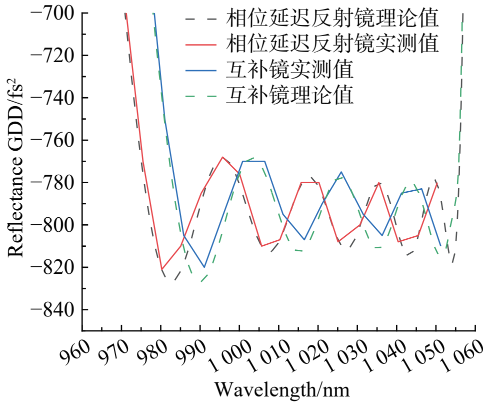


图 12　计算和实测的相位延迟反射镜的群延迟色散曲线

Fig. 12　Calculated and measured group delay dispersion curves of phase-delayed reflector

5　结　论

本文采用 Nb_2O_5 和 SiO_2 高低折射率材料，设计并制备了一种能够应用于飞秒激光系统的相位延迟反射镜。采用相位延迟反射镜与互补镜结合的方式，在设计波长范围内有着与相位延迟反射镜相匹配的群延迟色散曲线，将相位延迟反射镜与其互补镜组合使用后，成功起到了减小群延迟色散振荡波纹的效果。在薄膜制备过程中，通过反复实验与分析，对不同温度下 Nb_2O_5 材料的光学常数进行拟合，减小了受温度影响产生的膜厚误差，制备出的相位延迟反射镜在 970 ~ 1 100 nm 波长范围内反射率达 99.9%，并且可以在 970 ~ 1 050 nm 波长范围内提供−800 fs^{2}的群延迟色散，满足使用需求。

参考文献:

[1]　刘文军，任守田，潘玉寨，等. 基于多层膜系传输矩阵理论的双啁啾镜设计与实验[J]. 大学物理实验，2017，30(3)：80-84.
LIU W J, REN SH T, PAN Y ZH, *et al*.. Design and experiment of double chirped mirrors based on transfer matrix theory[J]. *Physical Experiment of College*, 2017, 30(3): 80-84. (in Chinese).

[2]　刘加，王胭脂，赵睿睿，等. 飞秒脉冲钛宝石激光器中的低振荡高色散镜对[J]. 中国激光，2018，45(10)：1003001.
LIU J, WANG Y ZH, ZHAO R R, *et al*.. Low vibration and high dispersion mirror pair in femtosecond pulsed Ti: sapphire laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(10): 1003001. (in Chinese).

[3]　MELNIKAS S, GIMŽEVSKIS U, KIČAS S. Stress compensated back side coated chirped mirror with high negative dispersion[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 121: 105820.

[4]　CHEN Y, HAHNER D, TRUBETSKOV M, *et al*.. Suppression of group delay dispersion oscillations of highly dispersive mirrors by non-uniformity and post-deposition treatment[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 142: 107192.

[5]　CHEN Y, WANG Y ZH, LU Y SH, *et al*.. Design, production, and characterization of a pair of positive and negative high dispersive mirrors for chirped pulse amplification systems[J]. *Optics Express*, 2023, 31(9): 14521-14531.

[6]　杨浩，滕浩，吕仁冲，等. 基于同心展宽器的飞秒啁啾脉冲放大研究[J]. 量子电子学报，2022，39(4)：566-573.
YANG H, TENG H, LYU R CH, *et al*.. Study on femtosecond chirped-pulse amplification based on concentric stretcher[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2022, 39(4): 566-573. (in Chinese).

[7]　才玺坤，张立超，时光，等. 离子束溅射制备低应力深紫外光学薄膜[J]. 中国光学，2016，9(6)：649-655.
CAI X K, ZHANG L CH, SHI G, *et al*.. Low stress DUV optical coatings deposited by ion beam sputtering[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(6): 649-655. (in Chinese).

[8]　梅禹珊，付秀华，杨永亮，等. 光纤激光器光学膜设计与制备[J]. 中国光学，2011，4(3)：299-304.
MEI Y SH, FU X H, YANG Y L, *et al*.. Design and preparation of optical films for fiber lasers[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 299-304. (in Chinese).

[9]　YUAN W J, LI CH SH, SHEN W D, *et al*.. Robust unbalanced Gires-Tournois mirror for group delay dispersion measurement evaluation by white light interferometer[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 157: 108654.

[10]　JI X CH, DAI J L, ZHANG J L, *et al*.. Group delay dispersion monitoring for computational manufacturing of dispersive mirrors[J]. *Optics Express*, 2023, 31(5): 8177-8189.

[11]　ZHANG Y H, WANG Y ZH, CHEN Y, *et al*.. Ultra-broad bandwidth low-dispersion mirror with smooth dispersion and high laser damage resistance[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(14): 3761-3764.

作者简介：

张　静(1984—), 吉林长春人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事光学薄膜、光学工艺等方面的研究。E-mail: 465589960@qq.com