

# 基于棱镜对的超短脉冲压缩器的光学设计

张留洋<sup>1</sup> 金海洋<sup>1</sup> 曲玉秋<sup>2</sup> 浦绍质<sup>1</sup> 黄金哲<sup>1</sup> 汪东升<sup>3</sup> 杨莹<sup>1</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨理工大学光电信息科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150080

<sup>2</sup>黑龙江大学物理科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150080

<sup>3</sup>深圳迈瑞生物医疗电子股份有限公司, 广东 深圳 518057

**摘要** 针对掺钛蓝宝石固体激光器腔内脉冲压缩的问题, 利用光学设计软件设计棱镜对超短脉冲压缩器, 对脉冲群延迟色散进行补偿, 以此压缩超短脉冲。利用光学设计软件建立棱镜对脉冲压缩器模型, 利用计算群延迟色散的宏得出棱镜对群延迟色散与棱镜对间距之间存在线性关系, 结合蓝宝石晶体的群延迟色散, 优化获得与之匹配的压缩器结构参数。对脉冲中心波长群延迟色散进行补偿的同时, 使用色散小的熔融石英玻璃使 100 fs 脉冲边带波长的群延迟色散减小至 10 fs<sup>2</sup>。运用光学设计软件计算光学系统的群延迟色散具有直观、简单、计算量小的优点。

**关键词** 光学设计; 脉冲压缩器; 色散补偿; 棱镜对

**中图分类号** O439 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.102202

## Optical Design of Ultrashort Pulses Compressor Based on Prism Pairs

Zhang Liuyang<sup>1</sup> Jin Haiyang<sup>1</sup> Qu Yuqiu<sup>2</sup> Pu Shaozhi<sup>1</sup> Huang Jinzhe<sup>1</sup>

Wang Dongsheng<sup>3</sup> Yang Ying<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Optoelectric Information Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

<sup>2</sup>College of Physics Science and Technology, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China

<sup>3</sup>Shen-zhen Mindray Bio-Medical Electronics Limited Liability Company, Shenzhen, Guangdong 518057, China

**Abstract** Aiming at the problem of pulses compression in a Ti:sapphire solid laser cavity, optical design software is employed to design the ultrashort pulses compressor with prism pairs, which can compensate group delay dispersion (GDD) can compress the ultrashort pulses. First, a model of pulses compressor with prism pairs is built by optical design software. And the linear relation between GDD and the distance of prism pairs are obtained by a macro which can compute GDD. Combined with GDD of a sapphire crystal, the compressor structure parameters match with GDD is obtained after optimization. When GDD of the pulses center wavelength are compensated, GDD of marginal wavelengths is reduced to 10 fs<sup>2</sup> for a 100 fs pulse by using low-dispersion fused silica. Computation of GDD in an optical system using optical design software has the advantage of perceptual intuition, simpleness, low computational complexity.

**Key words** optical design; pulse compressor; dispersion compensation; prism pairs

**OCIS codes** 220.4830; 320.5520; 260.2030

## 1 引言

超短脉冲具有极高的峰值功率和极短的时间宽度, 在诸多领域有着越来越多的应用。从材料的精密加工<sup>[1]</sup>到核反应的激发<sup>[2]</sup>, 从光合作用能量转换的分析<sup>[3]</sup>到化学反应过程的追踪<sup>[4]</sup>, 超短脉冲以其超强的光能

**收稿日期:** 2016-06-13; **收到修改稿日期:** 2016-06-29; **网络出版日期:** 2016-09-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(61405049)、黑龙江省自然科学基金(F2016023)

**作者简介:** 张留洋(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事超快光学和光学设计方面的研究。

E-mail: johnien@163.com

强度揭秘光与物质的相互作用,以其超高的时间分辨率展示微观世界的超快变化,因此追求更高强度、更短宽度的脉冲一直是人们不懈努力的目标。

在振荡器中,光脉冲经过增益介质及其他透射器件时会产生正色散,随着正色散的积累,脉冲将会越来越宽,难以产生超短脉冲,需在腔内插入脉冲压缩器,对脉冲进行色散补偿;在放大器中,首先要通过展宽器引入大的啁啾,以展宽脉冲,降低脉冲的峰值功率,对脉冲进行放大后,再用脉冲压缩器对脉冲进行压缩,从而得到高能短脉冲。由此可见,脉冲压缩器对超短脉冲的产生和放大有着极其重要的作用。脉冲压缩器的角色散元件可以产生负色散以补偿正色散,从而达到压缩脉冲的目的。Treacy 等<sup>[5]</sup>提出光栅对可以产生负色散,用于产生啁啾脉冲或者压缩啁啾脉冲。Fork 等<sup>[6-7]</sup>提出棱镜对可以产生负色散,并将其用于脉冲压缩,通过棱镜与光栅组合补偿色散的腔外压缩技术,得到 6 fs 的超短脉冲。Zeytunyan 等<sup>[8]</sup>用棱镜光栅组合控制掺钛蓝宝石激光器脉冲的三阶色散,得到 14 fs 的脉冲。李朝阳等<sup>[9]</sup>用光栅棱镜组合补偿超高功率飞秒脉冲的四阶色散,得到近似傅里叶变换极限的脉冲。

压缩器中的色散计算,一般采用光线追迹的方法先获得光程,然后微分获得系统的高阶色散。在计算光程的过程中,往往需要采取适当的近似,以获得简洁的色散表达式,即使如此,色散的表达形式仍非常复杂,难以直观地看出色散与系统参数之间的关系。运用光学设计软件,可以直观地看出光线在光学系统中的传输,不仅可以快速准确地得出不同频率光线的光程,而且可以实现光学系统的优化,获得最佳的光学系统参数。张留洋等<sup>[10]</sup>将光学设计软件应用于宽带倍频系统之中,获得产生变换极限倍频脉冲的光学系统。本文将光学设计软件应用于脉冲压缩器的设计之中,利用光学设计软件的直观性,获得色散与其结构参数之间的关系。

## 2 脉冲压缩系统

如图 1 所示,便是 Fork 等<sup>[6-7]</sup>提出的并被广泛使用的脉冲压缩器结构图。该压缩器由 4 个完全相同的棱镜组成,棱镜 I 和 II、III 和 IV 的相邻面相互平行,且棱镜 I 和 IV、II 和 III 关于面  $MM'$  对称。当脉冲经过棱镜对 I 和 II 时,脉冲中的短波成份比长波成份有着更大的偏折,从而使短波成份比长波成份有着更大的传播距离,产生负色散。同理,脉冲在经过棱镜 III、IV 时同样产生负色散。由于系统的对称性,脉冲经过 4 个棱镜的传播,等效于经过一个平板玻璃,则出射脉冲在空间上完全合束。

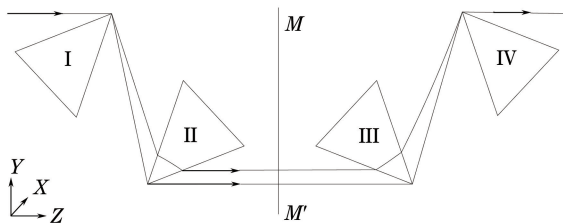


图 1 四棱镜脉冲压缩器结构图

Fig. 1 Structure chart of four-prism pulse compressor

## 3 系统设计

### 3.1 系统要求及参数分析

针对掺钛蓝宝石激光器谐振腔内脉冲色散补偿,设计四棱镜脉冲压缩器。脉冲中心波长 800 nm,宽度 80 fs,频谱宽度约为 10 nm。要求系统能够补偿腔内 20 mm 蓝宝石晶体的群延迟色散(GDD),并要求脉冲边带群延迟色散尽量小,不引起脉冲的明显畸变。棱镜系统在优化过程中,保持对称性。

选择追迹波长范围为 795~805 nm,波长间隔为 1 nm 的 11 个波长。为减小光能损失,要求脉冲以布儒斯特角和最小偏向角入射。由于激光能量集中于中心,且发散角较小,等效于一条通过光斑中心的光线,系统的视场角为  $0^\circ$ 。为减小光学系统长度,可使用色散较大的 SF11 玻璃。

经上述分析后,系统中可用于优化的参数仅有棱镜对间距。通过调节棱镜对间距,可实现中心波长二阶色散的补偿。

### 3.2 模型建立及系统优化

在序列/非序列混合模式中建立压缩器模型,根据系统的对称性,设置棱镜 II 和 III、棱镜 I 和 IV 的 Y 坐标相等;编写计算棱镜 I 和 II、棱镜 III 和 IV 间距的宏,在系统优化时,控制其间距相等,使系统在 Z 方向对称;由于脉冲仅在棱镜间传播时引入负色散,因此优化时使脉冲经过棱镜的顶点,减少正色散的引入,通过操作数  $V_{\text{npyv}}$  获得棱镜 II 的 Y 坐标,利用操作数  $V_{\text{nsst}}$  获得光线与棱镜 II 的交点坐标,当光线经过棱镜顶点时,二者间的几何关系为:

$$V_{\text{npyv}} = V_{\text{nsst}} + l \cos \frac{\alpha}{2}, \quad (1)$$

式中,  $l$  为棱镜腰长,  $\alpha$  为棱镜顶角。由于对称性的设置,光线必通过棱镜 III 的顶点。

利用 Donald<sup>[11]</sup> 的公式计算群延迟色散的宏,获得系统的群延迟色散。由上述约束条件设置评价函数,并把棱镜 II 的 Y、Z 坐标和棱镜 IV 的 Z 坐标设为优化变量,对系统进行优化,得出压缩器群延迟色散随棱镜对间距的变化关系。同样可得不同长度的蓝宝石晶体的群延迟色散,如图 2 所示。

对图 2 进行线性拟合,可得:

$$G_{\text{DD}_p} = 307.7 - 16.68L_p, \quad (2)$$

$$G_{\text{DD}_s} = 66.61L_s, \quad (3)$$

式中,  $G_{\text{DD}_p}$ 、 $G_{\text{DD}_s}$  分别为棱镜对和蓝宝石晶体的群延迟色散,  $L_p$ 、 $L_s$  分别为棱镜对顶点间距和蓝宝石晶体长度,两条拟合直线的决定系数  $R^2 = 1$ 。

使用的蓝宝石晶体为 20 mm,则产生的群延迟色散为:1332.2 fs<sup>2</sup>,根据(2)式,压缩器棱镜对的间距为 98.32 mm时,可补偿中心波长的群延迟色散。此时,考察脉冲中其他频率成份的群延迟色散。虽然中心波长的群延迟色散得到完全补偿,但其他波长仍存在一定的剩余群延迟色散,且边带波长剩余群延迟色散最大,为  $\pm 67$  fs<sup>2</sup>。过大的边带剩余群延迟色散将会引起脉冲畸变,需要对其加以控制。通过分析棱镜材料色散系数与压缩器群延迟色散的关系,色散系数越小的材料引起的边带波长群延迟色散越小,因此采用色散系数较小的熔融石英作为棱镜的玻璃材料。经过不同玻璃材料压缩器色散补偿后,脉冲不同频率成份的群延迟色散如图 3 所示。

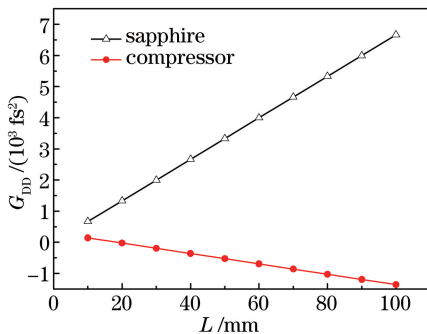


图 2 蓝宝石晶体和压缩器群延迟色散分别随晶体长度和棱镜对间距的变化

Fig. 2 GDD of sapphire crystal and compressor varies with length of crystal and distance of prism pairs, respectively

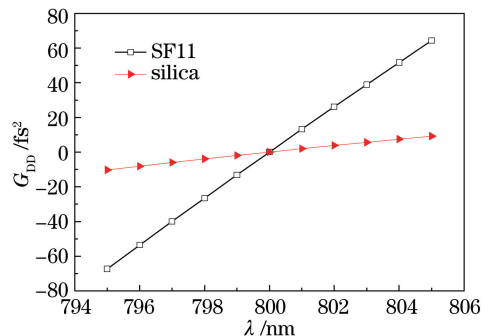


图 3 玻璃材料对群延迟色散的影响

Fig. 3 Influence of glass materials on GDD

改变计算群延迟色散宏的中心波长,得出脉冲群延迟色散随不同波长成份的变化关系,进行线性拟合可得:

$$G_{\text{DD}_1} = -1576.3 + 1.97\lambda, \quad (4)$$

$$G_{\text{DD}_2} = -10522.33 + 13.15\lambda, \quad (5)$$

式中,  $G_{\text{DD}_1}$ 、 $G_{\text{DD}_2}$  分别为硅玻璃材料和 SF11 玻璃材料压缩器的群延迟色散,两条拟合直线的决定系数  $R^2 = 1$ 。用色散系数小的熔融石英材料制作棱镜,压缩器在补偿中心波长群延迟色散的同时对边带波长的群延迟色散也能较好地进行补偿,边带波长的群延迟色散降低到  $\pm 10$  fs<sup>2</sup>,优化后的系统结构参数如表 1、2 所示。

表 1 光学系统结构参数

Table 1 Structure parameters of optical system

mm

Surface#	type	Radius	Thickness	Glass	Exit location X	Exit location Y	Exit location Z
OBJ	Standard	Infinity	Infinity				
STO	Standard	Infinity	20.00				
2	Coordinate break						60.398
3	Standard	Infinity	20.00	Sapphire			
4	Standard	Infinity	5.00				
5	Coordinate break		20.00			20.00	-60.398
6	Non-sequential component	Infinity	-		0	0	1435.085
7	Standard	Infinity	10.00				
IMA	Standard	Infinity					

表 2 光学系统非序列元件参数

Table 2 Parameters of non-sequential components in optical system

Object type	X position /mm	Y position /mm	Z position /mm	Tilt about X /( $^{\circ}$ )	Tilt about Y /( $^{\circ}$ )	Tilt about Z /( $^{\circ}$ )	Material
Ploy object	0	-14.4	80	-13.308	0	0	Silica
Ploy object	0	-517.525	667.522	-193.308	0	0	Silica
Ploy object	0	-517.525	747.522	-166.692	0	0	Silica
Ploy object	0	-14.4	1335.055	13.308	0	0	Silica

## 4 结 论

通过对脉冲压缩器的分析,针对掺钛蓝宝石固体激光器腔内色散补偿,确定设计指标,并设计棱镜对脉冲压缩器。由腔内蓝宝石的群延迟色散,得出与之匹配的压缩器结构参数,在对脉冲中心波长群延迟色散进行补偿的同时,可使边带波长群延迟色散减小至  $10 \text{ fs}^2$ ,从而减小脉冲畸变。将光学设计软件应用于超快光学系统设计,对拓展光学设计软件的应用范围具有一定的意义。

## 参 考 文 献

- Jia Wei, Wang Qingyue, Fu Xing, *et al.* Progress of femtosecond laser micromachining[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2004, 21(2): 194-201.  
贾 威, 王清月, 傅 星, 等. 飞秒激光在材料微加工中的应用[J]. 量子电子学报, 2004, 21(2): 194-201.
- Gu Yuqiu, Zhang Feng, Shan Lianqiang, *et al.* Initial indirect cone-in-shell fast ignition integrated experiment on Shenguang II-updated facility[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(11): 11010.  
谷渝秋, 张 锋, 单连强, 等. 神光 II 升级装置锥壳靶间接驱动快点火集成实验[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(11): 11010.
- Junko Y, Jan K, Vittal K, *et al.* Light-dependent production of dioxygen in photosynthesis[J]. Metal Ions in Life Sciences, 2015, 15: 13-43.
- Bagchi B. Ultrafast chemical dynamics in time domain through fluorescence spectroscopy[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences, 2015, 85(4): 483-488.
- Treacy E. Optical pulse compression with diffraction gratings[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1969, 5(9): 454-458.
- Fork R L, Martinez O E, Gordon J P. Negative dispersion using pairs of prisms[J]. Opt Lett, 1984, 9 (5): 150-152.
- Fork R L, Cruz C H B, Becker P C, *et al.* Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation[J]. Opt Lett, 1987, 12(7): 483-485.
- Zeytunyan A, Yesayan G, Mouradian L. Pulse compression to 14 fs by third-order dispersion control in a hybrid grating-prism compressor[J]. Applied Optics, 2013, 52(32): 7755-7758.

- 9 Li Z Y, Wang C, Li S, *et al.* Fourth-order dispersion compensation for ultra-high power femtosecond laser[J]. *Optical Communications*, 2015, 357: 71-77.
- 10 Zhang Liuyang, Sun Peijing, Huang Jinzhe, *et al.* Optical design of frequency-doubling syetem for ultrashort pulses based on prism pairs[J]. *Acta Optica Scinca*, 2015, 35(9): 0922006.  
张留洋, 孙培敬, 黄金哲, 等. 基于棱镜对的超短脉冲倍频系统的光学设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0922006.
- 11 Donald C O S. Group velocity dispersion using commercial optical design programs[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(19): 4740-4746.