

文章编号: 1001-3806(2007)06-0665-03

## 飞秒激光脉冲的腔外压缩

刘文军, 李华军, 曲士良, 陈相君

(哈尔滨工业大学 光电科学系(威海), 威海 264209)

**摘要:** 为了获得更高的时间分辨率, 更短的飞秒脉冲, 采用双棱镜和一个平面镜结构对飞秒激光脉冲进行腔外压缩, 构建了一台二次谐波频率分辨光学开关装置, 对谐振腔输出的飞秒脉冲及压缩后的脉冲进行了测量, 取得了脉冲压缩前和压缩后的实验数据, 压缩前脉冲的宽度为 89fs, 脉冲的时间带宽积为 0.9096, 误差为 2.4%, 输入脉冲的平均功率约为 480mW; 脉冲压缩后的测量结果为 22fs, 光谱宽度为 43nm, 时间带宽积为 0.44203, 误差为 1.1%, 压缩脉冲的平均功率约为 250mW。压缩比为 4:1, 高于有关文献的报道。结果表明, 该装置实现了飞秒脉冲腔外压缩, 对获得更短的飞秒脉冲是有帮助的。

**关键词:** 超快光学; 脉冲压缩; 脉冲测量; 频率分辨光学开关法

**中图分类号:** TN241 **文献标识码:** A

### Femtosecond pulse compression in external cavity

LU Wen-jun, LI Hua-jun, QU Shi-liang, CHEN Xiang-jun

(Department of Optics and Electronics Sciences, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

**Abstract:** In order to get shorter pulse width to improve time resolution, femtosecond pulse was compressed by using two prisms and a reflective mirror. Femtosecond pulse was measured with a home-made second-harmonic generation frequency-resolved optical gating. The temporal width of input pulse was 89fs, the time-bandwidth product was 0.9096, the minimum error was 2.4% and the average power of the input light was about 480mW. The width of compressed pulse was 22fs, the time-bandwidth product was 0.44203, the minimum error was 1.1% and the average power of the output light was about 250mW. The compression ratio was 4:1, which was higher than that in the related report. The experimental results indicate that the compressing device is valid and the result is useful for getting shorter pulses.

**Key words:** ultrafast optics; pulse compression; pulse measurement; frequency-resolved optical gating

## 引 言

由于飞秒激光脉冲的时间宽度极短而瞬间强度极高, 因而被广泛应用于物理、化学和生物学等领域进行探测和分辨超快过程, 如电子的跃迁、揭示和控制化学生物反应等<sup>[1~7]</sup>。在有些应用中, 为了获得更高的时间分辨率, 需要对飞秒激光脉冲进行压缩, 从而获得更短的飞秒脉冲。飞秒激光脉冲的腔外压缩一般采用光纤光栅对<sup>[8]</sup>, 但是光栅衍射的损耗大, 而且衍射光栅的色散量不容易在正负之间调节; 介电镜制作的干涉仪也被用于脉冲压缩<sup>[9]</sup>, 但介电镜的制作成本较高; 棱镜对结构具有衍射损耗小、色散量易于调节等优点, 因而被广泛应用于脉冲压缩<sup>[10]</sup>。

## 1 棱镜脉冲压缩器的工作原理

由棱镜对组成的脉冲压缩器结构如图 1 所示。它

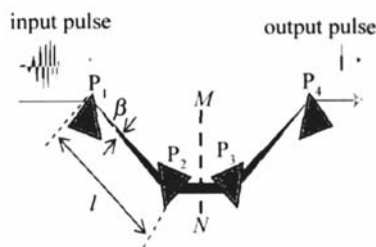


Fig 1 Combined four prisms sequence used to compress femtosecond pulse  
由 4 个完全相同的布儒斯特棱镜组成, 棱镜  $P_2$  的入射面平行于棱镜  $P_1$  的出射面, 棱镜  $P_4$  的入射面平行于棱镜  $P_3$  的出射面, 由  $P_1, P_2$  组成的第 1 个棱镜对和由  $P_3, P_4$  组成的第 2 个棱镜对关于  $MN$  对称。由于对称性, 第 2 个棱镜对和第 1 个棱镜对引入了同样大小的色散量, 脉冲光束经过第 1 个棱镜对以后不同的频率分量发生了横向位移, 第 2 个棱镜对使不同频率分量的横向位移发生翻转, 从而不同频率分量形成了共线

作者简介: 刘文军 (1968-), 男, 讲师, 现主要从事飞秒激光的测量及微加工方面的研究。

E-mail: liuwenjun86@163.com

收稿日期: 2006-08-14; 收到修改稿日期: 2006-11-28

输出,并且输出脉冲光束与输入脉冲光束是平行的。为了降低因棱镜对的引入而引起的损耗,要求光束以布儒斯特角入射到每个棱镜表面,电矢量在入射面内的光被全部透射,脉冲光束在每个棱镜上的出射角均为最小偏向角。这种压缩装置的优点是插入损耗小,易于调节,无延迟色散光线的横向位移。

由于飞秒激光脉冲的频谱很宽,当飞秒脉冲通过棱镜对时不同频率成份的相移不同,位相可以展开为中心频率  $\omega_0$  处的泰勒级数<sup>[11,12]</sup>:

$$\phi(\omega) = \phi(\omega_0) + \left(\frac{d\phi}{d\omega}\right)_{\omega_0} (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2\phi}{d\omega^2}\right)_{\omega_0} (\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{d^3\phi}{d\omega^3}\right)_{\omega_0} (\omega - \omega_0)^3 + \dots \quad (1)$$

$$\frac{d^2\phi}{d\omega^2} = \frac{\lambda^3}{2\pi^2 c^2} \frac{d^2P}{d\lambda^2} \quad (2)$$

$$\frac{d^3\phi}{d\omega^3} = \frac{-\lambda^4}{4\pi^2 c^3} \left( 3 \frac{d^2P}{d\lambda^2} + \lambda \frac{d^3P}{d\lambda^3} \right) \quad (3)$$

不同的频率分量在棱镜对之间的光程是不同的,不同波长分量的导数为:

$$\frac{d^2P}{d\lambda^2} = 4 \frac{d^2n}{d\lambda^2} + (2n - n^3) \frac{dn}{d\lambda} \frac{1}{\lambda^2} \sin\beta - 8 \frac{dn}{d\lambda} \frac{1}{\lambda} \cos\beta \quad (4)$$

$$\frac{d^3P}{d\lambda^3} = 4 \frac{d^3n}{d\lambda^3} \sin\beta - 24 \frac{dn}{d\lambda} \frac{d^2n}{d\lambda^2} \cos\beta \quad (5)$$

色散参量为:  $D = -L^{-1} \frac{dT}{d\lambda} = \left(\frac{\lambda}{d}\right) \frac{d^2P}{d\lambda^2} \quad (6)$

式中,  $\lambda$  是脉冲光在空气中的波长,  $P$  是光程,  $P = l \cos\beta$ ,  $L$  为光路的实际长度,  $T$  为光通过  $L$  所用的时间,  $l$  为棱镜顶角之间的距离,  $\beta$  为光束经过棱镜  $P_1$  发生色散后两个边缘频率分量之间的夹角,如图 1 所示,  $n$  为介质的折射率<sup>[13]</sup>。  $(d^2P/d\lambda^2)$  决定着色散的性质,在图 1 中入射到棱镜  $P_1$  的脉冲光谱发生色散,通过横向移动棱镜  $P_2$  可以改变不同频率分量在棱镜中的光程,可以使光谱的低频分量在棱镜  $P_2$  中所走的距离大于高频分量,相对于高频分量来说低频分量被延迟,从而产生负啁啾,即  $(d^2P/d\lambda^2) < 0$ ,使得具有正啁啾的脉冲被压缩变窄。这样通过调节激光束经过棱镜的光程来控制群速度色散量,实现无啁啾脉冲输出,以获得超短脉冲。

## 2 实 验

在图 1 所示的装置中,脉冲通过棱镜  $P_2$  后,角色散被补偿,但是在脉冲中含有大量线性啁啾,与棱镜  $P_1, P_2$  对称的  $P_3$  和  $P_4$  的作用是对线性啁啾进行补偿,从而实现压缩脉冲的无啁啾输出,但是在实际操作过

程中,4个棱镜的具体位置很难调整到完全对称状态。由于棱镜对之间的对称性,可以在图 1 中  $MN$  的位置上放置平面反射镜,从而省略棱镜  $P_3$  和  $P_4$ 。实验装置如图 2 所示,棱镜  $P_1, P_2$  之间的距离为 18cm,  $M$

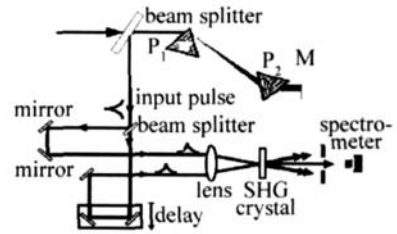


Fig 2 Schematic of experimental setup for compressing and measuring femtosecond pulse

为镀有中心波长为 810nm 反射膜的平面反射镜,BS 为分光镜,压缩后的脉冲被输入到搭建的二次谐波频率分辨光学开关装置(second-harmonic generation frequency-resolved optical gating, SHG-FROG)<sup>[14]</sup>中进行测量。汇聚透镜焦距为 20cm,晶体 BBO 的厚度为 30 $\mu$ m,两束光在 BBO 晶体中的交叉角约为 10°,产生的和频信号光谱用光谱仪记录,整个光谱被分成 100 个分离的时间延迟,时间延迟的间隔为 4.52fs,波长的步幅为 0.2377nm。首先用二次谐波频率分辨光学开关装置对压缩前的脉冲进行测量,实验中拍摄的描述图如图 3 所示,对信号分布进行计算机迭代处理,得

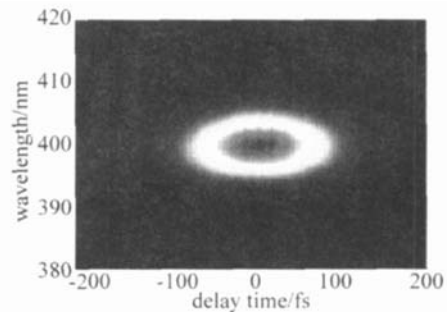


Fig 3 Experimental result of input pulse measured with SHG-FROG: measured trace

到的脉冲宽度、光谱宽度及其位相在时域和频域的详细信息如图 4 和图 5 所示,脉冲宽度的测量结果为 89fs,算法误差为 2.4%,脉冲的时间带宽积为 0.9096,输入脉冲的平均功率约为 480mW。

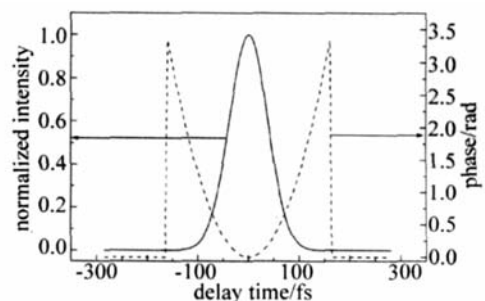


Fig 4 Intensity and phase in time domain

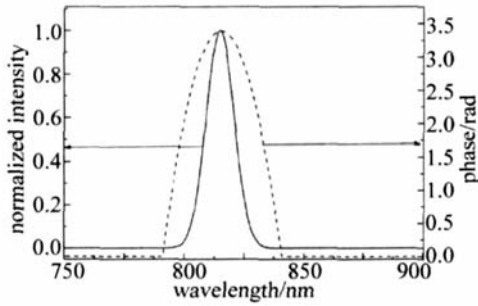


Fig 5 Intensity and phase in spectral domain

谐振腔的输出脉冲经过双棱镜和反射镜进行压缩后,输入到二次谐波频率分辨光学开关装置中进行测量,测量结果如图 6~图 8 所示。压缩后的脉冲测量

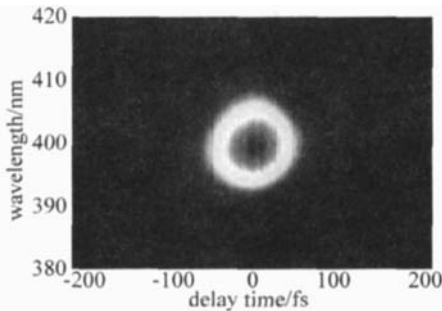


Fig 6 Experimental result of compressed pulse measured with SHG-FROG: Measured trace

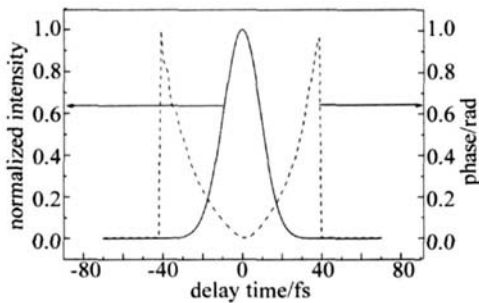


Fig. 7 Intensity and phase in time domain

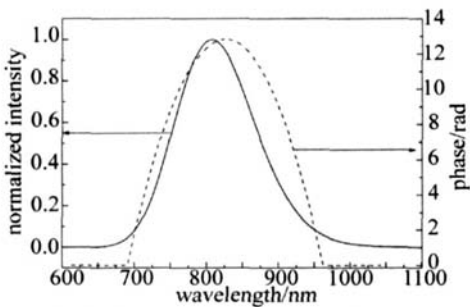


Fig. 8 Intensity and phase in spectral domain

结果为脉冲宽度为 22fs,光谱宽度为 43nm,时间带宽积为 0.44203,误差为 1.1%;输出压缩脉冲的平均功率约为 250mW。脉冲压缩比为 4:1,高于参考文献 [15] 和参考文献 [16] 中报道的压缩比。原因在于参考文献 [16] 中飞秒脉冲压缩到几个飞秒时,高阶色散的作用不可忽略,而棱镜对无法对高阶色散进行补偿,实现进一步的压缩;另外,在参考文献 [16] 中把脉冲从约 20fs 压缩到 7.6fs 是采用了自适应控制的变形

镜,相对于平面镜来说成本较高。

### 3 结论

用双棱镜和 1 个平面镜实现了飞秒激光脉冲的腔外压缩。构建了 1 台用于飞秒脉冲测量的二次谐波频率分辨光学开关装置,利用该装置对谐振腔输出的飞秒脉冲及压缩后的脉冲进行了测量,对信号分布进行计算机迭代处理,得到了飞秒脉冲的时间宽度及光谱宽度、电场及其相位在时域和频域的详细信息。输入脉冲的宽度为 89fs,算法误差为 2.4%,脉冲的时间带宽积为 0.9096,脉冲压缩后的时间宽度为 22fs,光谱宽度为 43nm,时间带宽积为 0.44203,误差为 1.1%,压缩比为 4:1,得到了较高的压缩比。结果表明:该装置成功地实现了飞秒脉冲腔外压缩,这一结果对获得更短的飞秒脉冲是有帮助的。

### 参考文献

- [1] FEURER T, VAUGHAN J C, NELSON K A. Spatiotemporal coherent control of lattice vibrational wave [J]. *Science*, 2003, 299 (5605): 374~377.
- [2] RABITZ H. Shaped laser pulse as reagents [J]. *Science*, 2003, 299 (5606): 525~527.
- [3] TIAN P, KEUSTERS D, SUZAKI Y *et al* Femtosecond phase-coherent two-dimensional spectroscopy [J]. *Science*, 2003, 300 (5625): 1553~1555.
- [4] CHEN B F. Numerical simulation of femtosecond pulses measurement with SPIDER [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (1): 13~15 (in Chinese).
- [5] YU Y L, MU C J, BAI J T *et al* The design of a new multilayer blazed reflective grating used in broadening femtosecond lasers [J]. *Laser Technology*, 2005, 29 (4): 358~360 (in Chinese).
- [6] YOU M, ZHAO W, CHEN G H *et al* Crystallization in PTR glass induced by irradiation of femtosecond lasers [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (1): 40~42 (in Chinese).
- [7] ZHAO G, CHEN J G, ZHANG Q *et al* Analytical description of the damage threshold of femtosecond pulses [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (1): 90~92 (in Chinese).
- [8] FORK R L, BRITTO C C H, 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.
- [9] HACKER M, STOBRAWA G, SAUERBREY R. Femtosecond-pulse sequence compression by Gires-Toumois interferometers [J]. *Opt Lett*, 2003, 28 (3): 209~211.
- [10] SCHEHRER K L, FORK R L, AVRAMOPOULOS H *et al* Derivation and measurement of the reversible temporal lengthening of femtosecond optical pulses for the case of a four-prism sequence [J]. *Opt Lett*, 1990, 15 (10): 550~552.
- [11] FORK R L, BRITTO C C H, BECKER P C *et al* Compression of optical pulses to six femtosecond by using cubic phase compensation [J]. *Opt Lett*, 1987, 12 (7): 483~485.
- [12] COJOCARU E. Analytic Expressions for the fourth and the fifth-order dispersions of crossed prisms pairs [J]. *Appl Opt*, 2003, 42 (34): 6910~6914.

(下转第 670 页)

大均呈现出先减小后增大的趋势; (2)  $f(n)$  的变化幅度很小, 这说明光学胶的折射率对光强分束比的影响不大; (3) 光强分束比的最小点也是其最接近 1 的点, 对这 3 种常用棱镜而言, 这一点均对应  $n=1.570$ 。

## 2 光学胶合剂折射率对渥拉斯顿棱镜总光强透射比的影响

在单色自然光入射的情况下, 将 o 光, e 光光强透射比之和定义为渥拉斯顿棱镜的总光强透射比, 即:

$$T = T_o \cdot I_o + T_e \cdot I_e = (T_o \cdot I + T_e \cdot I) / 2 \quad (11)$$

设入射光光强为 1, 则上式为:  $T = (T_o + T_e) / 2 \quad (12)$

仍以常用渥拉斯顿棱镜以及针对波长为 633nm 的光为例, 由 (8) 式、(9) 式、(11) 式用计算机拟合出的  $T-n$  关系曲线如图 3 所示。

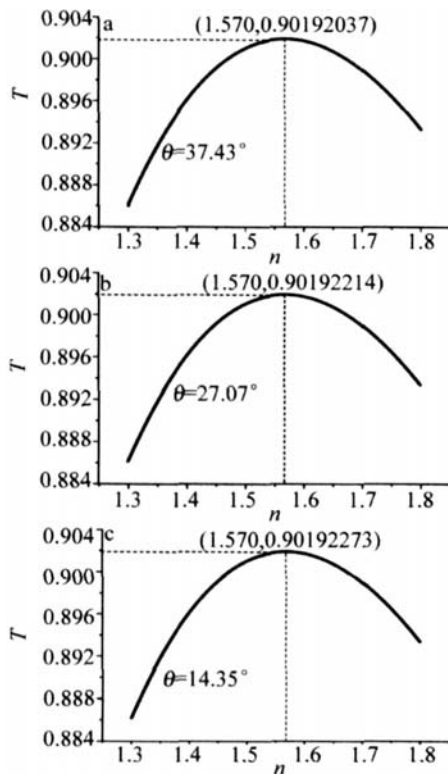


Fig 3 Relationship between the total transmission of transmitted light and the refractive index of optical cement used in Wollaston prism

从图中可得出如下结论: 在常用光学胶折射率的

范围内: (1) 光学胶折射率对不同结构角的渥拉斯顿棱镜的总光强透射比均有影响; (2) 尽管 3 种渥拉斯顿棱镜具有的结构角不同, 但它们总光强透射比即  $T$  的最大值却相差不大, 约为 0.902, 且最大值对应同一光学胶折射率 (1.570)。

## 3 结论

光学胶的折射率  $n$  对渥拉斯顿棱镜透射光的光强分束比以及总光强透射比均有一定影响, 这充分说明: 在选择渥拉斯顿棱镜所用光学胶时, 除需考虑光学胶的透明光谱范围、抗剪切强度等性能之外, 光学胶凝固态的折射率值得格外关注。通过分析, 作者认为: 采用折射率为 1.570 的光学胶, 不仅可以使常规渥拉斯顿棱镜在光线正入射时其透射光有 1:1 的光强分束比, 也可以使两束出射光总光强透射比达到最大。

## 参考文献

- [1] LI J Z. Handbook of optics [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1986. 1454~1462 (in Chinese).
- [2] LI J H. Optics [M]. Ji'nan: Shandong Education Press, 1991. 405 (in Chinese).
- [3] LI J L, WANG Y W, LI Y H. Research on performance of  $\text{CaCO}_3$  for light-polarized device [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2002, 31 (4): 413~416 (in Chinese).
- [4] HEM Q, ZHENG Y J. The test and design of beam splitter prisms of polarized laser [J]. Optical Technique, 1983, 19 (6): 21~26 (in Chinese).
- [5] ZHAO P, WU F Q, REN S H. The research of the spectral character of the calcite/ $\text{BaF}_2$  UV polarizing prism beam deviation angle [J]. Laser Technology, 2005, 29 (2): 219~221 (in Chinese).
- [6] WANG W, WU F Q, SU F F. Research of splitting angle and splitting intensity ratio of OE double escape prism [J]. Laser Technology, 2003, 27 (6): 560~562 (in Chinese).
- [7] WANG W, WU F Q, SU F F. Symmetric polarization beam splitting prism based on three-element Wollaston prism [J]. Optical Technique, 2004, 30 (2): 182~183 (in Chinese).
- [8] ZHANG D Q, WU F Q. Spectral characterization of glan-prism field-angle [J]. Journal of Qufu Normal University (Natural Science Edition), 2001, 27 (4): 50~52 (in Chinese).
- [9] YAO Q Y. Optics tutorial [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. 334 (in Chinese).
- [10] LAO Y B. Polarization optics [M]. Beijing: Science Press, 2003. 24~25 (in Chinese).

(上接第 667 页)

- [13] FORK R L, MARTNEZ O E. Negative dispersion using pairs of prisms [J]. Opt Lett, 1984, 9 (5): 150~152.
- [14] TREBNO R. Frequency-resolved optical gating: The measurement of Ultrashort Laser Pulse [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002. 101~322.

- [15] WURZER A J, LOCHBRUNNER S, RIEDLE E. Highly localized vibronic wavepackets in large reactive molecules [J]. Appl Phys, 2000, 71 (3): 405~409.
- [16] BAUM P, LOCHBRUNNER S, GALLMANN L *et al*. Real-time characterization and optimal phase control of tunable visible pulses with a flexible compressor [J]. Appl Phys, 2002, B74 (S) 219~224.