

文章编号: 0258-7025(2007)08-1136-04

# 基于反射式达曼光栅的频率分辨光学开关装置

刘文军<sup>1,2</sup>, 李国伟<sup>2</sup>, 戴恩文<sup>2</sup>, 周常河<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 哈尔滨工业大学威海校区光电科学系, 山东 威海 264209; <sup>2</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 采用反射式达曼光栅对飞秒激光进行分束,可以避免材料色散的影响。搭建了利用反射式 $1\times 2$ 达曼光栅为基础的频率分辨光学开关(FROG)装置,并把测量结果与传统多发频率分辨光学开关装置的测量结果进行了对比。理论和实验结果表明,当输入脉冲宽度大于50 fs时,用达曼光栅作为分光器和使用分光镜分光的效果是一样的;当输入脉冲的宽度小于50 fs时,用达曼光栅作为分光器引入的展宽量明显小于分光镜引入的展宽量,尤其是当输入脉冲的宽度小于20 fs时用达曼光栅作为分光器的效果更为突出。

**关键词** 光栅;飞秒激光;频率分辨光学开关法;达曼光栅

**中图分类号** TN 247 **文献标识码** A

## Frequency-Resolved Optical Gating Using Refractive Dammann Gratings

LIU Wen-jun<sup>1,2</sup>, LI Guo-wei<sup>2</sup>, DAI En-wen<sup>2</sup>, ZHOU Chang-he<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Optics and Electronics Sciences,

Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai, Shandong 264209, China

<sup>2</sup>Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** A  $1\times 2$  array Dammann grating beam splitter for implementation of frequency resolved optical gating (FROG) is proposed. Beam splitting with Dammann grating can avoid the material dispersion in traditional beam splitters. The measuring result by the newly established FROG is compared with that of a traditional multi-pulse FROG. Theoretical and experimental results show that when the input pulse width is larger than 50 fs, the pulse broadening introduced by Dammann grating and general beam splitter is almost identical; but when the input pulse is shorter than 50 fs, the broadening effect of Dammann grating is obviously less than that introduced by general beam splitter, especially for laser pulses shorter than 20 fs.

**Key words** gratings; femtosecond laser pulse; frequency-resolved optical gating; Dammann grating

## 1 引言

由于飞秒激光脉冲的时间宽度极短而光谱极宽,因此它在光学元件或介质中传播时很容易发生时间-空间畸变<sup>[1, 2]</sup>。在很多光学实验以及飞秒脉冲测量装置中,包括强度自相关、频率分辨光学开关法(FROG)、光谱相位干涉电场再现法(SPIDER)<sup>[3]</sup>,都需要对脉冲进行分束。使用半透半反镜分光时,不可避免地引入光谱色散,导致脉冲发生畸变,而采用达曼光栅对作为分光器却可以避免这一现象。因此,提出了基于反射式达曼光栅的频率分辨光学开关测量装置,这种测量结构不同于

文献[4]中的飞秒脉冲测量装置,它用一块达曼光栅作为分光器,另外两块达曼光栅作为色散补偿光栅,而其他结构与传统频率分辨光学开关装置完全相同。

## 2 理论

二次谐波频率分辨光学开关法(SHG-FROG)是目前最为有效的飞秒脉冲测量方法之一,可以在时域和频域内对飞秒脉冲的振幅和相位进行测量<sup>[5]</sup>。它的工作原理是:用分光镜将飞秒脉冲一分为二,一个脉冲作为待测脉冲,另一个作为参考脉

收稿日期:2007-01-18;收到修改稿日期:2007-03-05

作者简介:刘文军(1968—),男,山东人,讲师,博士,主要从事飞秒激光测量和微加工方面的研究。

E-mail: liuwenjun86@163.com

冲,用会聚透镜将两个脉冲会聚到非线性晶体中产生和频信号,通过调节延迟臂的延迟量  $\tau$ ,可以使参考脉冲的光谱对待测脉冲的光谱进行扫描,产生光谱分辨的描述图,描述图是两个脉冲之间延迟量的函数。二次谐波多发频率分辨光学开关法的描述图为

$$I_{\text{FROG}}^{\text{SHG}}(\omega, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_{\text{sig}}(t, \tau) \exp(-i\omega t) dt \right|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} [E(t) \exp(i\omega_0 t)] \times \{E(t - \tau) \exp[i\omega_0(t - \tau)]\} \exp(-i\omega t) dt \right|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E(t) E(t - \tau) \exp[-i(\omega - 2\omega_0)t] dt \right|^2, \quad (1)$$

用投影算法对描述图进行迭代运算,可以得到脉冲的时域和频域特性。在传统频率分辨光学开关装置中使用的分光器件均为半透半反镜,它属于透射式光学元件,飞秒脉冲在其中传播时必将导致脉冲发生畸变,尤其是对于宽度小于10 fs的飞秒脉冲和远紫外飞秒脉冲,这种畸变更为明显。为了减少分光镜对测量脉冲的影响,对分光镜的厚度有着特定的要求,例如在某些情况下要求分光镜的厚度不超过  $2 \mu\text{m}^{[6]}$ 。

达曼光栅是一种空间坐标调制型二元相位光栅,它可以按照要求把入射光分成强度均等、间隔相同的出射阵列<sup>[7~9]</sup>。基于反射式达曼光栅的频率分辨光学开关装置如图1所示,入射的飞秒激光脉冲照射到达曼光栅  $G_3$  上,产生+1级衍射。由于飞秒脉冲的光谱极宽,不同的光谱分量会发生光谱色散,光栅  $G_1$  和  $G_2$  分别对+1级色散进行补偿,就可以得到无色散的飞秒脉冲输出,李国伟等<sup>[10]</sup>推出对  $m$  级色散进行补偿所用补偿光栅的周期为分束所用光栅周期的  $m$  倍。分光光栅  $G_3$  和补偿光栅  $G_1$  及  $G_2$  之间的最小距离

$$L = \frac{2Dd}{[4\lambda_0 - (m + |m - 2|) \cdot \Delta\lambda]}, \quad (2)$$

式中  $D$  为入射飞秒脉冲光束直径,  $d$  为达曼光栅的空间周期,  $m$  为衍射级次,  $\lambda_0$  为飞秒激光的中心波

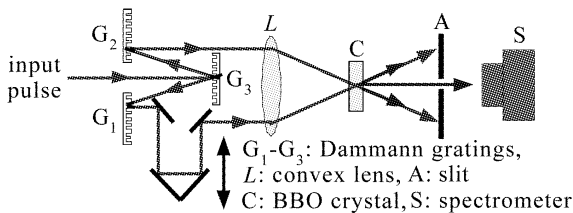


图1 基于反射式达曼光栅频率分辨光学开关装置结构示意图

Fig. 1 Schematic of SHG-FROG experimental setup based on Damann gratings

长,  $\Delta\lambda$  为飞秒激光带宽。从式(2)可以看出,在达曼光栅空间周期确定的前提下,光栅对之间的最小距离与入射光束直径、光谱带宽、衍射级次有关。

设入射飞秒脉冲为无啁啾的高斯脉冲

$$E(t) = \exp[-2\ln 2(t^2/\tau_{\text{FWHM}}^2)^2], \quad (3)$$

式中  $\tau_{\text{FWHM}}$  为输入脉冲半峰全宽,从补偿光栅输出的脉冲宽度为<sup>[10, 11]</sup>

$$\tau_{\text{out}} = \sqrt{\tau_{\text{FWHM}}^2 + \frac{8\ln 2 \beta^2 L^2}{\sigma^2} + \frac{(4\ln 2 k \beta^2 L)^2}{\tau_{\text{FWHM}}^2 + 8\ln 2 \beta^2 L^2 / \sigma^2}}. \quad (4)$$

式中  $k$  为波数,  $\beta = -m\lambda_0^2 / (2\pi c d \cos\theta)$ ,  $\sigma = -\cos\gamma / \cos\theta$ ,  $c$  为光速,  $\theta$  为衍射角,  $\gamma$  为入射角。同样宽度的输入脉冲,以分光镜对其进行分光,输出脉冲的宽度<sup>[10, 11]</sup>

$$\tau_{\text{out}} = \left[ \tau_{\text{FWHM}}^2 + \frac{4\ln 2 \frac{\lambda_0^3 L_d}{2\pi c^2} \cdot \frac{d^2 n(\lambda)}{d\lambda^2}}{\tau_{\text{FWHM}}^2} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

式中  $n(\lambda)$  为分光镜的折射率,  $L_d$  为分光镜的厚度。图2中给出了以BK7玻璃为底片的光分镜(厚度分别为2 mm和3 mm)的输出脉冲宽度与达曼光栅对 ( $m = 1$ ) 的输出脉冲宽度之间的对比。当输入脉冲的宽度大于50 fs时,用达曼光栅作为分光器和使用分光镜分光的效果是一样的;当输入脉冲的宽度小于50 fs时,用达曼光栅作为分光器引入的展宽量明显小于分光镜引入的展宽量,尤其是当输入脉冲的宽度小于20 fs时用达曼光栅作为分光器的效果更为突出。因此,无论从加工的难易程度,还是从引入脉冲展宽量的大小,用达曼光栅作为分光器要优于半透半反镜。

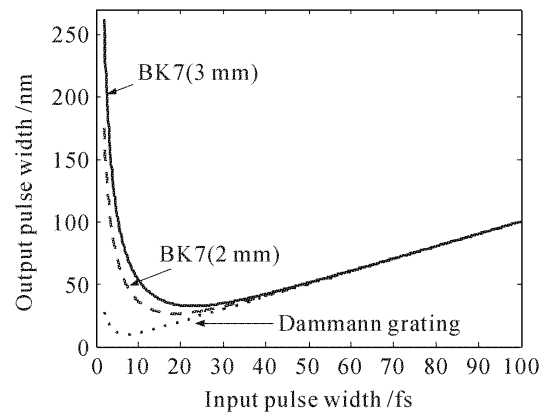


图2 分光镜的输出脉冲宽度和达曼光栅对 ( $m = 1$ ) 的输出脉冲宽度之间的对比

Fig. 2 Comparison of the output pulse width between Damann gratings and the BK7 substrate

### 3 实 验

实验中使用的达曼光栅是按照标准的二元光学制作方法,利用已制作好的光栅模板,对镀铬玻璃板进行曝光、显影、去胶、去铬、湿法腐蚀,得到中心波长为810 nm,周期为100  $\mu\text{m}$ 的1 $\times$ 2达曼光栅,光栅的刻蚀深度为0.2  $\mu\text{m}$ ,对制作好的光栅表面镀金制成反射式光栅。

在图1中光栅 $G_3$ 与 $G_1$ 或 $G_2$ 之间的距离为200 mm,入射光斑直径为3 mm,从补偿光栅 $G_2$ 出射的光束作为待测脉冲,从补偿光栅 $G_1$ 出射的脉冲作为参考脉冲进入延迟臂,延迟臂固定在微动马

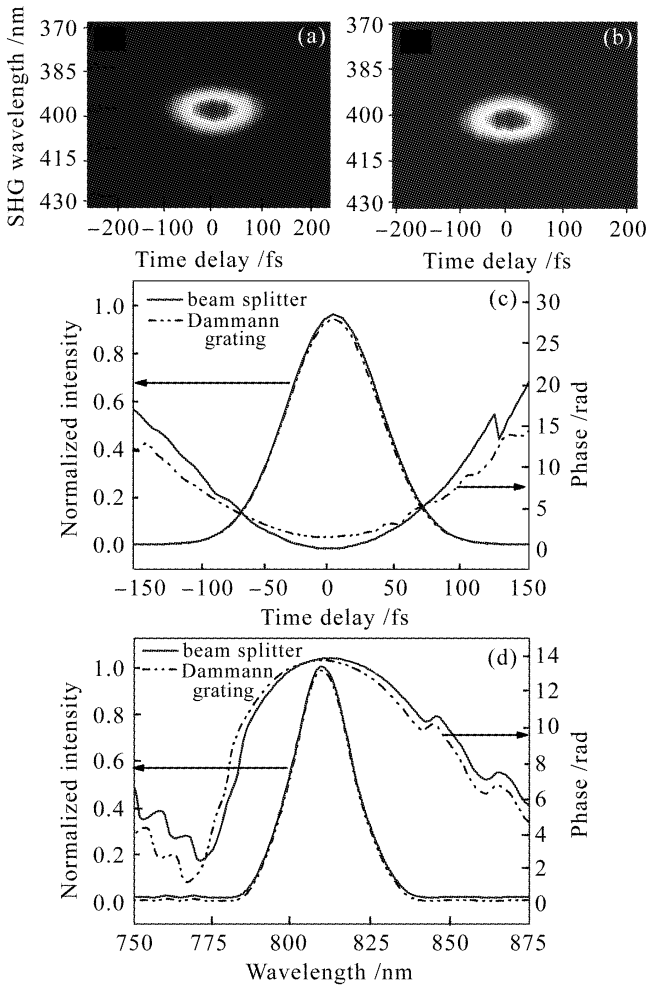


图3 两种测量装置的测量结果

(a) 基于达曼光栅多发频率分辨光学开关装置测量的描述图;  
(b) 传统多发频率分辨光学开关装置测量的描述图;(c) 两种测量装置再现的脉冲强度和相位在时域内的分布;(d) 两种测量装置再现的脉冲强度和相位在频域内的分布

Fig. 3 Comparison of experimental results between SHG-FROG based on Dammann gratings and standard SHG-FROG

measured traces generated by SHG-FROG based on Dammann gratings (a) and standard SHG-FROG (b); (c) intensity and phase in time domain; (d) intensity and phase in spectral domain

达上,会聚透镜的焦距为20 cm,BBO晶体的厚度为100  $\mu\text{m}$ ,非线性晶体中产生的和频信号描述图由光谱仪记录,由计算机控制延迟臂的移动和光谱仪的数据采集。在实验中,把基于达曼光栅多发频率分辨光学开关装置的测量结果与实验室内搭建的传统多发频率分辨光学开关装置的测量结果进行对比。对来自钛宝石激光器谐振腔的输入脉冲进行测量,测量结果如图3所示。振荡频率为76 MHz,中心波长为810 nm,用传统多发频率分辨光学开关测量得到的脉冲宽度为81.2 fs,算法的最小误差为0.00494;用基于反射式达曼光栅的多发频率分辨光学开关装置测量得到的脉冲宽度为80.6 fs,算法误差为0.00424。

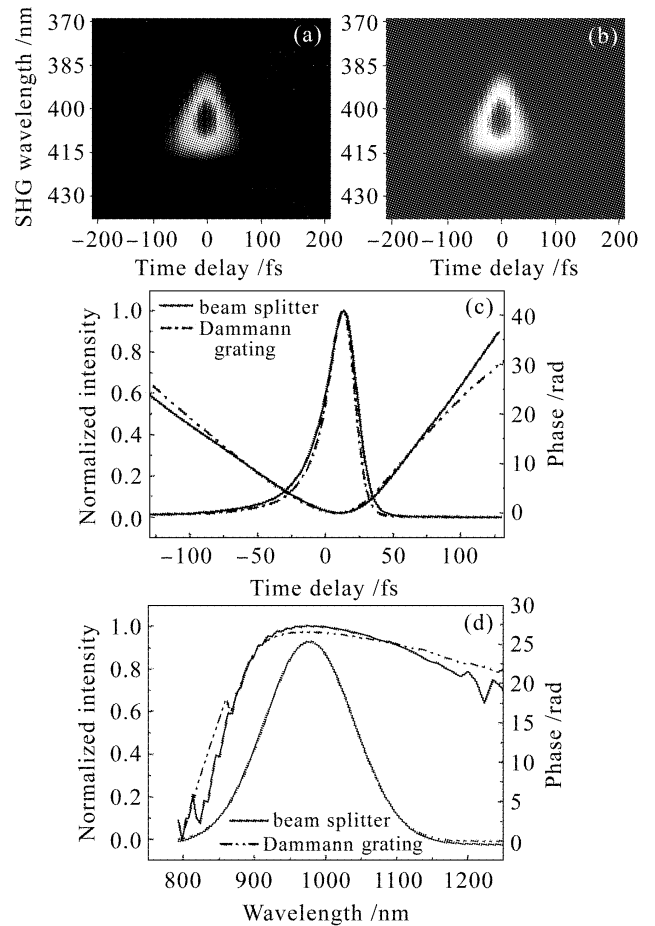


图4 两种测量装置对压缩脉冲的测量结果

(a) 基于达曼光栅多发频率分辨光学开关装置测量的描述图;  
(b) 传统多发频率分辨光学开关装置测量的描述图;(c) 两种测量装置再现的压缩脉冲强度和相位在时域内的分布;(d) 两种测量装置再现的脉冲强度和相位在频域内的分布

Fig. 4 Experimental results of compressed pulse measured with SHG-FROG based on Dammann gratings and standard SHG-FROG, respectively

measured traces generated by SHG-FROG based on Dammann gratings (a) and standard SHG-FROG (b); (c) intensity and phase in time domain; (d) intensity and phase in spectral domain

采用棱镜对将谐振腔产生的脉冲进行压缩后,用两种装置对压缩后的脉冲进行测量,结果如图 4 所示。用传统多发频率分辨光学开关测量得到的脉冲宽度为 28.2 fs,算法的最小误差为 0.00832;用基于反射式达曼光栅的频率分辨光学开关装置测量得到的脉冲宽度为 22.7 fs,算法误差为 0.00752。

用两种测量装置分别对产生的双脉冲进行测量,测量结果如图 5 所示。用传统多发频率分辨光学开关测量得到的单脉冲宽度为 46.7 fs,双脉冲之间的间隔为 132.7 fs,算法的最小误差为 0.00904;用基于反射式达曼光栅的多发频率分辨光学开关装置测量得到的脉冲宽度为 47.4 fs,双脉冲之间的间隔为 132.4 fs,算法误差为 0.00872。

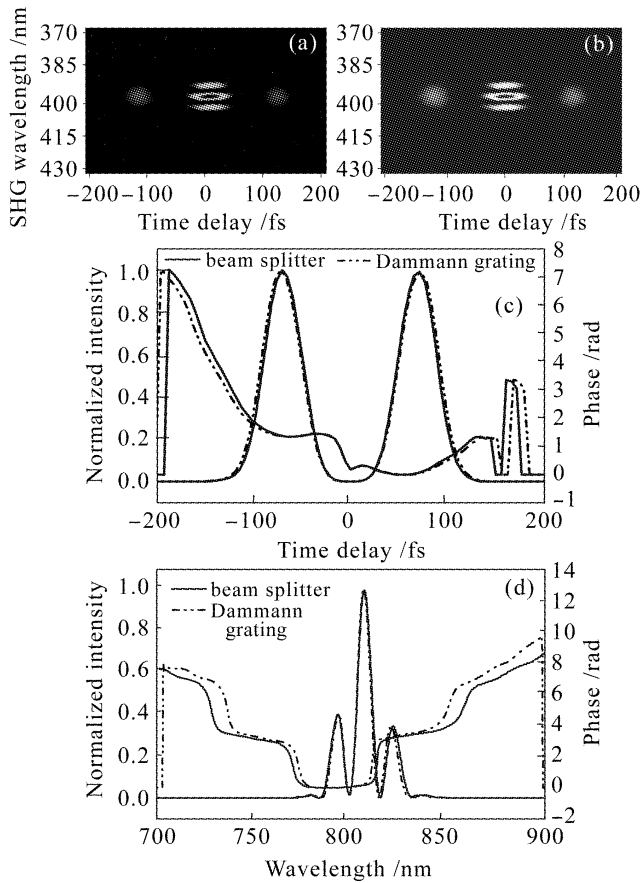


图 5 两种测量装置对双脉冲的测量结果

(a) 基于达曼光栅多发频率分辨光学开关装置测量的描述图;  
(b) 传统多发频率分辨光学开关装置测量的描述图;(c) 两种测量装置再现的压缩脉冲强度和相位在时域内的分布;(d) 两种测量装置再现的脉冲强度和相位在频域内的分布

Fig.5 Experimental results of double pulses measured with SHG-FROG based on Dammann gratings and standard SHG-FROG, respectively measured traces generated by SHG-FROG based on Dammann gratings (a) and standard SHG-FROG (b); (c) intensity and phase in time domain; (d) intensity and phase in spectral domain

## 4 结 论

搭建了以反射式  $1 \times 2$  达曼光栅为分束器的频率分辨光学开关装置,并把测量结果与传统频率分辨光学开关装置的测量结果进行了对比。理论和实验结果表明当输入脉冲宽度大于 50 fs 时,用达曼光栅作为分光器和使用分光镜分光的效果几乎一样;当输入脉冲的宽度小于 50 fs 时,用达曼光栅作为分光器引入的展宽量小于分光镜引入的展宽量。理论结果表明当输入脉冲的宽度小于 20 fs 时用达曼光栅作为分光器的效果尤为突出。理论和实验证明了用达曼光栅代替分光镜的可行性,对达曼光栅采用不同的刻蚀深度,可以使测量装置适用于不同波段的飞秒脉冲测量。达曼光栅结构不仅可以用于频率分辨光学开关装置,而且也可以用于其他类型的测量和分光装置中。

## 参 考 文 献

- Seleuk Akturk, Mark Kimmel, Patrick O' Shea *et al.*. Measuring spatial chirp in ultrashort pulses using single-shot frequency-resolved optical gating [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(1):68~78
- Seleuk Akturk, Xun Gu, Erik Zeek *et al.*. Pulse-front tilt caused by spatial and temporal chirp [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(19):4399~4410
- Wu Zubin, Wang Ying, Cao Shiyong *et al.*. Phase measurement of femtosecond laser pulses using improved spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):21~25  
吴祖斌,王颖,曹士英等.用改进的光谱相位相干直接电场重构法装置测量飞秒激光脉冲的相位[J].*中国激光*, 2006, **33**(1):21~25
- Enwen Dai, Changhe Zhou, Guowei Li. Dammann SHG-FROG for characterization of the ultrashort optical pulse [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(16):6145~6152
- R. Trebino. Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulse [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002
- David J. Jones, Scott A. Diddams, Jinendra K. Ranka *et al.*. Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis [J]. *Science*, 2000, **288**(5466):635~639
- H. Dammann, E. Klotz. Coherent optical generation and inspection of two-dimensional periodic structures [J]. *J. Mod. Opt.*, 1977, **24**(4):505~515
- Rick L. Morrison. Symmetries that simplify the design of spot array phase gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1992, **9**(3):464~471
- Zou Hua, Zhou Changhe, Dai Enwen. Femtosecond pulse shaping of unequally-spaced space-time conversion and recognition technique with Dammann-type filter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3):330~334  
邹华,周常河,戴恩文.不等间距达曼型滤波器的飞秒脉冲时空变换整形与识别技术[J].*中国激光*, 2006, **33**(3):330~334
- Guowei Li, Changhe Zhou, Enwen Dai. Splitting of femtosecond laser pulses by using a Dammann grating and compensation gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**(4):767~772
- Martinez Oscar E. Grating and prism compressors in the case of finite beam size [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(7):929~934