

GRENOUILLE 系统中时间延迟量参数优化设计

贾豫东, 张晓青

(北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: GRENOUILLE 飞秒脉冲测量系统中, 时间延迟量是一个关键参数, 直接决定了飞秒脉冲宽测量范围。本文量化分析了时间延迟量与菲涅尔双棱镜底角、待测光斑直径等参数之间的关系, 研究表明, 菲涅尔双棱镜底角越大, 待测光斑半径越大, 双棱镜 - SHG 晶体间距越大, 产生的最大时间延迟量越大, 可测得的飞秒脉冲越宽。确定了光路系统中器件参数, 通过实验进行了验证, 测量结果的误差优于 5%, 为 GRENOUILLE 测量系统优化设计提供了参考和依据。

关键词: 飞秒脉冲测量; GRENOUILLE; 时间延迟; 菲涅尔双棱镜; 厚 SHG 晶体

中图分类号: TN24 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2017.05.017

Optimization and design of time delay in GRENOUILLE measurement system

JIA Yu-dong, ZHANG Xiao-qing

(School of Instrument Science and opto electronic engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In GRENOUILLE femtosecond pulse measurement system, time delay is a key parameter, which directly determines measurement range of femtosecond pulse width. The relationship among the time delay, Fresnel biprism's base angle, the input pulse's spot diameter was quantitatively analyzed. The research results show that spot radius, the distance between Fresnel biprism and thick SHG crystal and the maximum time delay will become greater when base angle of Fresnel biprism becomes bigger, and thus the measured femtosecond pulse will become wider. The device parameters of the optical system are determined and verified by experiment, the error of the measurement is 4.8%, which provide a reference for the optimization and design of GRENOUILLE measurement system.

Key words: femtosecond pulse measurement; GRENOUILLE; time delay; Fresnel biprism; thick SHG crystal

1 引言

飞秒脉冲在生物学、物理学、化学、医学、光通信等方面的广泛应用依赖于飞秒脉冲测量技术的迅速发展^[1-3]。

GRENOUILLE (grating-eliminated no-nonsense observation of ultrafast incident laser light e-fields) 系

统由于其结构简单、调整方便, 在飞秒脉冲测量中应用广泛^[4-5]。时间延迟量是该系统中一个至关重要的参数。已有的文献仅仅对个别器件对时间延迟参数的影响进行了部分推导, 不够详细和系统, 同时在元器件上仅给出了各个元件的作用和选择, 没有进行详细的理论推导^[6-7]。本文拟从系统角度进行数

基金项目: 北京市青年拔尖人才计划 (No. CIT&TCD20140412); 北京市教委面上项目 (No. KM201411232005) 资助。

作者简介: 贾豫东 (1975 -), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光电检测, 先进光电子器件方面的研究。E-mail: jia-yudong@bistu.edu.cn

收稿日期: 2016-10-08

学模型推导,在此基础上,通过仿真分析和实验验证的方法对时间延迟参数进行优化设计,为提高 GRENOUILLE 飞秒测量系统的精度研究和应用提供依据。

2 时间延迟量理论分析

GRENOUILLE 脉宽测量系统中的时间延迟量是由菲涅尔双棱镜和厚的 SHG 晶体共同实现的。当光束照射到菲涅尔双棱镜上,它将光束分成两束并以一定的角度重合,得到强度条纹。在此光路系统中要使两束光完全重叠在厚的 SHG 晶体上,在厚的 SHG 晶体的不同位置,两束光的延迟不同。

图 1 中,梯形 $ABDE$ 为直角梯形,两束光的光程差 $\Delta C = n \cdot AB - DE$ 。三角形 DBE 中, $DE/\sin\beta = BE/\sin(\alpha - \beta)$, 且 $BE = CF = 2x$, 则光程差为:

$$\Delta C = \frac{2(n\sin\alpha - 1)\sin\beta}{\sin(\alpha - \beta)} \times x \quad (1)$$

时间延迟 $\Delta\tau = \Delta C/c$, c 为光速, 即:

$$\Delta\tau = \frac{1}{3 \times 10^8} \times \frac{2(n\sin\alpha - 1)\sin\beta}{\sin(\alpha - \beta)} \times x \quad (2)$$

菲涅尔双棱镜和厚的 SHG 晶体间的距离 $Z_0 = x/\tan\gamma$, 由几何关系知 $\gamma = 90^\circ - \alpha$, 所以 $x = Z_0 \tan\gamma$, 代入公式(2)可得时间延迟:

$$\Delta\tau = \frac{1}{3 \times 10^8} \times \frac{2Z_0 \tan(\arcsin(n\sin\beta) - \beta)(n\sin\alpha - 1)\sin\beta}{\sin(\alpha - \beta)} \quad (3)$$

光程差最大时,边缘光线与中心光线在厚的 SHG 晶体中的交点距离 o 点最远,此时, $AB = \Phi \tan\beta$, $DE = \Phi \tan\beta / \sin\alpha$, 代入 $\Delta C = n \cdot AB - DE$ 和 $\Delta\tau = \Delta C/c$ 中,得到最大延迟为:

$$\Delta\tau_{\max} = \frac{\Phi \tan\beta}{3 \times 10^8} \left\{ n - \frac{1}{\cos[\arcsin(n\sin\beta) - \beta]} \right\} \quad (4)$$

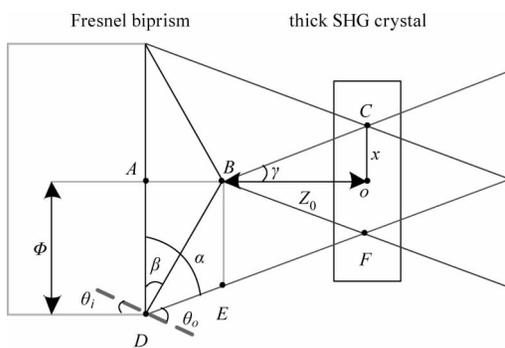


图 1 光在菲涅尔双棱镜和厚的 SHG 晶体中传播的行迹

Fig. 1 The pulse propagation in Fresnel biprism and thick SHG crystal

由公式(4)可得到在一定的最大时间延迟下,菲涅尔双棱镜底角和光斑半径的关系。最大延迟 $\Delta\tau_{\max}$ 取 $4\tau_p$ ^[6], τ_p 为待测飞秒脉宽,菲涅尔双棱镜折射率 n 取 1.5, 进行仿真分析如图 2 所示。

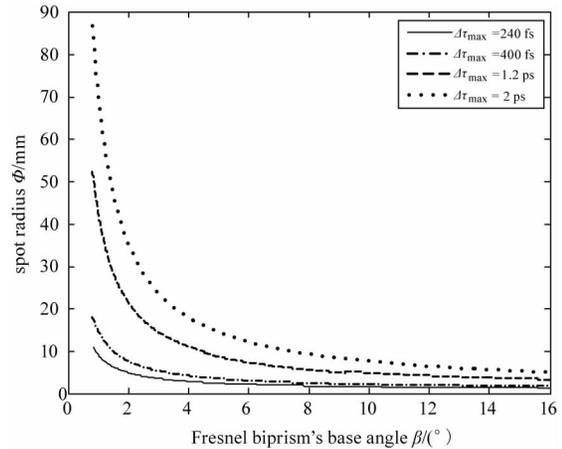


图 2 菲涅尔双棱镜底角和待测光斑半径的关系

Fig. 2 The relationship between Fresnel biprism's base angle and spot radius of the input pulse

由图 2 可知,在一定的最大时间延迟下,菲涅尔双棱镜底角和待测光斑半径成反比例关系。当待测光斑半径一定时,菲涅尔双棱镜底角越大,产生的最大时间延迟越大,可测得的飞秒脉冲越宽;当菲涅尔双棱镜底角一定时,待测光斑半径增大可增大最大时间延迟。一般飞秒脉冲的光斑直径是 2 ~ 3 mm,所以在测量脉宽较宽的飞秒脉冲时需要用扩束镜把光斑直径增大。

3.2 时间延迟和菲涅尔双棱镜与厚 SHG 晶体间距离的关系

延迟除了和菲涅尔底角、光斑半径有关,还和菲涅尔双棱镜与厚的 SHG 晶体间的距离 Z_0 有关。由 α 和 β 间关系,代入公式(3)可得到菲涅尔双棱镜与厚的 SHG 晶体间的距离:

$$Z_0 = \frac{\Delta\tau \times c \times \cos(\arcsin(n\sin\beta))}{2(ncos[\arcsin(n\sin\beta) - \beta] - 1)\sin\beta \tan(\arcsin(n\sin\beta) - \beta)} \quad (5)$$

由公式(5)可知 Z_0 随菲涅尔双棱镜底角 β 变化而变化。如图 3 所示,时间延迟一定时, Z_0 和 β 成反比。当 β 选定后, Z_0 越大,时间延迟越大,可测的飞秒脉宽越大。在实验中为了调整方便及能产生足够的延迟,要选择合适的菲涅尔双棱镜。

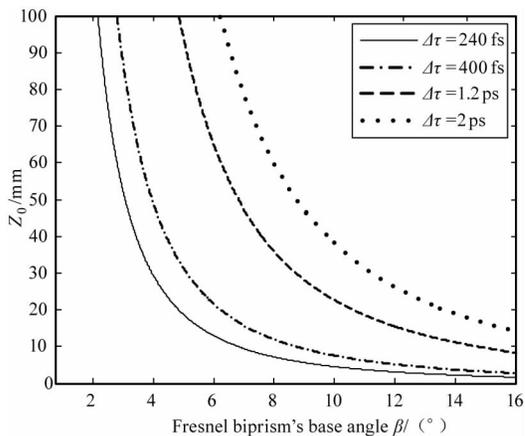


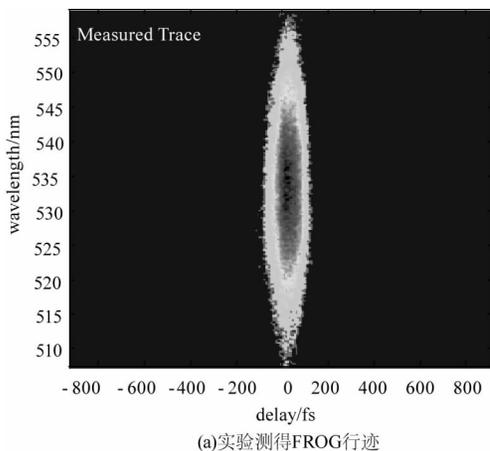
图3 菲涅尔双棱镜与厚的 SHG 晶体间的距离和菲涅尔双棱镜底角的关系

Fig. 3 The relationship between the distance that Fresnel biprism to thick SHG crystal and Fresnel biprism's base angle

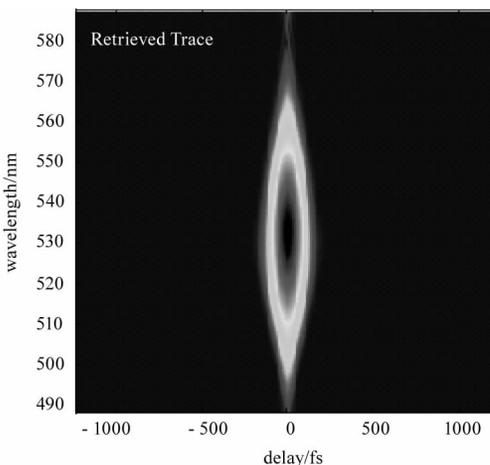
4 实验结果分析

通过对时间延迟的推导仿真和分析,最终选择菲涅尔双棱镜底角为 10°,扩束镜选择 5 倍,菲涅尔双棱镜与厚 SHG 晶体间的距离约为 40 cm,能产生的时间延迟约为 2.4 ps,可测的脉冲范围为 60 ~ 700 fs。

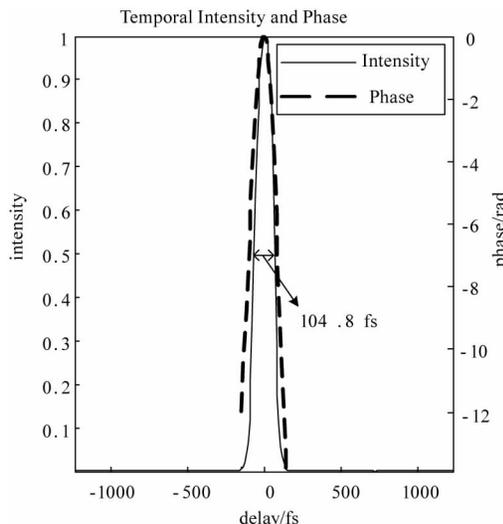
图 4 是实验是用上面所设计的光路系统对一



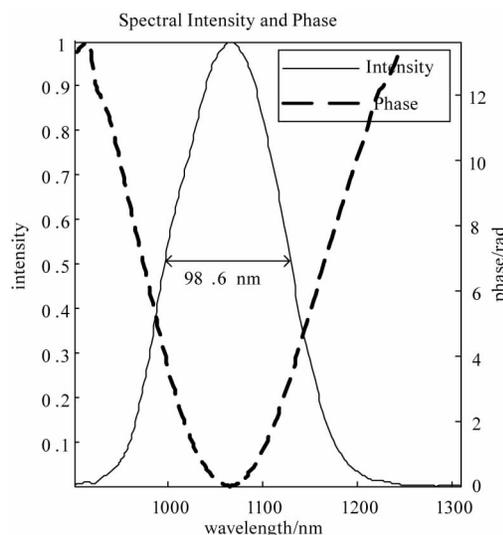
(a)实验测得FROG行迹



(b)重建后的FROG行迹



(c)重建后时域飞秒脉冲的强度和相位



(d)重建后频域飞秒脉冲的强度和相位

图4 Experimental results

Fig. 4 实验结果

个锁模飞秒激光器输出进行测量,得到 FROG 行迹,用主分量广义投影法进行脉冲的重建得到重建的 FROG 行迹、时域飞秒脉冲的强度和相位、频域飞秒脉冲的强度和相位^[8-9]。用脉宽测试仪 FR - 103 kHz 测量该飞秒激光器得到脉宽是 100 fs,而经脉冲重建得到的飞秒脉宽是 104.8 fs,即误差为 4.8%。

5 结论

给出了 GRENOUILLE 光路系统中光在菲涅尔双棱镜和厚 SHG 晶体中的传播行迹,并对其进行了详细的几何分析和理论推导,得到了时间延迟和菲涅尔双棱镜底角,待测光斑直径、菲涅尔双棱镜与厚 SHG 晶体间的距离的关系。利用关系式进行仿真

分析可得:待测光斑直径一定时,菲涅尔双棱镜底角越大,产生的时间延迟越大,可测得的飞秒脉冲越宽;菲涅尔双棱镜底角一定时,菲涅尔双棱镜与BBO晶体间的距离越大可测得的飞秒脉冲越宽,但要有足够的时间延迟,需要光斑直径增大。利用所设计的系统进行测量实验,实验误差为4.8%,验证了实验系统中参数的选择是合适的。文章中有关光学系统的参数设计结论,对GRENOUILLE系统测量不同范围的脉冲宽度时,光学器件的参数设计有重要的参考意义。

参考文献:

- [1] LIN Zunqi, CHEN Weibiao, LOU Qihong, et al. Review on the recent progress of laser frontiers in China[J]. *Sci China Tech Sci*, 2013, 43(9): 961-978. (in Chinese)
林尊琪, 陈卫标, 楼祺洪, 等. 我国近期激光前沿若干重要进展评述[J]. *中国科学:技术科学*, 2013, 43(9): 961-978.
- [2] YANG Qing, DU Guangqing, CHEN Feng, et al. Ultrafast thermal relaxation characteristics in gold film excited by shaped femtosecond laser pulses[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 29-34. (in Chinese)
杨青, 杜广庆, 陈烽, 等. 飞秒激光整形脉冲激发金膜的超快热弛豫特性[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 29-34.
- [3] YAO Yunhua, LU Chenhui, XU Shuwu, et al. Femtosecond pulse shaping technology and its applications[J]. *Acta Phys. Sin*, 2014, 63(18): 5-19. (in Chinese)
姚云华, 卢晨晖, 徐淑武, 等. 飞秒激光脉冲整形技术及其应用[J]. *物理学报*, 2014, 63(18): 5-19.
- [4] P O'Shea, Mark Kimmel, Xun Gu, et al. Highly simplified device for ultrashort-pulse measurement[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(12): 932-934.
- [5] Selcuk Akturk, Mark Kimmel, Rick Trebino. Extremely simple device for measuring 1.5 μm ultrashort laser pulses[J]. *Optical Society of America*, 2004, 12(19): 4483-4489.
- [6] 刘承香, 刘春平, 龙井华, 等. 光脉冲测量系统中菲涅尔双棱镜参数设计[J]. *深圳大学学报*, 2009, 26(01): 9-11.
- [7] Byung-Kwan YANG, HeeSeok RHO, Jae Myung SEO, et al. Design, Construction and Calibration of a GRENOUILLE, Single-Shot, Ultrashort-Pulse Measurement System[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2008, 52(2): 269-274.
- [8] Kane D J, Rodriguez G, Taylor A J. Simultaneous measurement of two ultrashort laser pulses from a single spectrogram[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, 14(4): 935-943.
- [9] Daniel J Kane. Recent progress toward real-time measurement of ultrashort laser pulses[J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1999, 35(4): 421-431.