

# 高功率激光装置非线性相移测试技术

张波, 孙志红, 赵军普, 李森, 董军, 夏彦文, 彭志涛\*

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

**摘要** 针对非啁啾激光脉冲, 提出了一种基于枚举思想的高功率激光装置非线性相移测试方法。结合脉冲波形和能流变化, 得到不同非线性相移假设值下脉冲放大后展宽光谱的理论分布。然后将展宽光谱的理论分布与实测结果进行比较, 两者残差最小时理论展宽光谱对应的非线性相移假设值即为测量结果。测试技术和方法不受脉冲时间波形的限制, 有效提高了测量结果的置信度。

**关键词** 测量; 非线性相移; 枚举; 光谱

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.1001006

## Nonlinear Phase Shift Test Technique on High Power Laser Facility

Zhang Bo, Sun Zhihong, Zhao Junpu, Li Sen, Dong Jun, Xia Yanwen, Peng Zhitao

Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** A nonlinear phase shift test method of high power laser facility based on enumeration thought is proposed for no-chirp laser pulse. Combined with the pulse waveform and the variation of energy flow, the theoretical distribution of broadening spectrum after pulse amplification is obtained under different nonlinear phase shift hypotheses. The theoretical distributions of the broadening spectra are compared with the measured ones. Then hypothetical values of the nonlinear phase shifts corresponding to the theoretical broadening spectra are the results of the measurements when the residuals are the minimum. This technique and method are not limited by the pulse time waveform, which effectively improve the confidence of the measurement results.

**Key words** measurement; nonlinear phase shift; enumeration; spectrum

**OCIS codes** 120.5050; 190.3270; 140.3295; 300.6420

## 1 引言

高功率激光装置中光束由于非线性传输的影响会出现小尺度自聚焦现象, 这是高功率固体激光驱动器中光束质量变差和激光器输出功率受限的主要因素。根据 Bspalov-Talanov 理论, 光束的非线性相移是小尺度自聚焦强弱程度的重要判据, 对激光装置的安全运行和设计优化具有重要意义<sup>[1-7]</sup>。

非线性相移是激光脉冲经过克尔介质发生自相位调制 (SPM) 所产生的附加相移, 非线性相移随时间变化会产生频率啁啾, 啁啾量是非线性相移对时间的导数, 因此结合脉冲的光谱变化和时间波形可以对非线性相移进行测量<sup>[8-9]</sup>。我国 6 束亚毫微秒钕玻璃激光系统针对高斯型时间分布激光脉冲, 测量了脉冲的最大频率啁啾量和脉冲宽度, 两者相乘得到非线性相移<sup>[10]</sup>; 美国 OMEGA 激光装置采用测量脉冲上升沿与下降沿啁啾, 将脉冲频率啁啾与时间联系反演出非线性相移的方法<sup>[11]</sup>; 法国 ALISE 激光装置采用时间衍射的方法进行高斯型飞秒脉冲的非线性相移测量, 使用光栅对和光谱滤波器将脉冲展宽为皮秒梳状脉冲, 根据梳状脉

收稿日期: 2017-04-19; 收到修改稿日期: 2017-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(61605185)、国家自然科学基金(61377102)、国防基础科研计划(B1520133010)、中物院激光聚变研究中心青年人才成长基金

作者简介: 张波(1988—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事激光参数测量方面的研究。

E-mail: zhangbo19880331@sina.com

\* 通信联系人。E-mail: peng\_zhitao@163.com

冲经过放大器前后的光谱变化计算得到非线性相移<sup>[12-13]</sup>。

国内外关于高功率激光装置非线性相移测试的研究多针对理想状态下的高斯或超高斯脉冲,但激光脉冲的实际波形相对于理想状态会存在畸变及调制,波形的畸变及调制会引入新的频率啁啾,对测量造成干扰,导致测量结果的置信度下降。为克服波形调制对测量的不利影响并实现任意波形激光脉冲的非线性相移的测量,本文提出一种基于枚举思想的高功率激光装置非线性相移测试方法:首先分别测试脉冲进入放大器前和放大器后的时间波形及光谱,使用光传输模拟软件依据脉冲放大前后的能流变化计算出脉冲归一化非线性相移时间分布;然后根据脉冲放大后的光谱对非线性相移时间分辨最大值进行枚举求解,最终得到时间分辨非线性相移测试结果。测试技术和方法不受脉冲时间波形的限制,可有效消除波形畸变及附加调制对测量的干扰。

## 2 测试原理及方法

激光脉冲经过非线性介质发生自相位调制(SPM)效应所产生的非线性相移:

$$\Phi_{\text{NL}}(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^L \gamma(z) I(z, t) dz, \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为激光波长,  $z$  为激光脉冲传播路径,  $L$  为激光脉冲经过介质的总长度,  $\gamma(z)$  为脉冲传播路径上介质的非线性折射率,  $I(z, t)$  为激光脉冲传播路径上不同时刻的功率密度。根据(1)式,如果能获得激光传输放大过程中的功率密度  $I(z, t)$  及介质的非线性系数  $\gamma(z)$ , 即可求出脉冲不同时刻的非线性相移  $\Phi_{\text{NL}}(t)$ 。

激光脉冲传输放大过程中  $I(z, t)$  的变化可以通过求解 Frantz-Nodivik 速率方程得到,目前中国工程物理研究院激光聚变研究中心基于该速率方程自行开发的光传输模拟软件 SG99 已经能够准确对任意波形的  $I(z, t)$  进行计算,计算结果的不确定度在 7% 以内<sup>[14]</sup>;但由于非线性折射率不同文献所报道的测量结果间存在较大的差异,且测试结果只能反映特定测试脉宽下介质的非线性折射特性<sup>[15-17]</sup>,因此仅根据(1)式难以得出不同波形高功率激光脉冲  $\Phi_{\text{NL}}(t)$  的准确值。

高功率激光脉冲非线性相移随时间变化会产生频率啁啾,导致脉冲频谱的展宽,展宽量是非线性相移对时间的导数:

$$\Delta\nu(t) = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi_{\text{NL}}(t)}{dt} = -\frac{1}{\lambda} \int_0^L \gamma(z) \frac{dI(z, t)}{dt} dz, \quad (2)$$

$\Delta\nu(t)$  为  $\Phi_{\text{NL}}(t)$  对时间的导数,如果记录激光波形的同时,用光谱仪测出不同时刻光谱的加宽量  $\Delta\nu(t)$ ,  $\Delta\nu(t)$  对时间  $t$  积分即可反演出非线性相移  $\Phi_{\text{NL}}(t)$ 。对于只存在单上升沿与单下降沿(高斯型或平顶型)的激光脉冲,根据脉冲频率啁啾的大小及正负可估计其对应的时间波形位置,测量脉冲最后的复合光谱即可反演出非线性相移,这也是 OMEGA 激光装置所采用的方法;但当激光脉冲波形较为复杂或脉冲顶部存在畸变与调制时,要得到准确的测量结果必须测量精确的时间分辨光谱,这在实验上是比较困难的<sup>[18-19]</sup>。

为实现任意波形激光脉冲的非线性相移测量,针对非啁啾激光脉冲,本文提出了一种从实测脉冲经过传输放大后的展宽光谱入手,首先使用光传输软件计算出归一化非线性相移分布,然后通过比较不同非线性相移假设值下展宽光谱理论分布与实测结果的差异对非线性相移真值进行枚举求解的测量方法,该测量方法的算法流程如图 1 所示(流程图中  $\Phi_{\text{max}}$  表示脉冲非线性相移时间分辨最大值)。

实际测试时,主要步骤如下:

- 1) 测量种子脉冲进入放大器前的能量、时间波形及光谱分布。
- 2) 测量种子脉冲经过传输放大链路后的能量、时间波形及光谱分布。
- 3) 根据测试得到的脉冲时间波形及能流分布,使用光传输模拟软件 SG99 计算出归一化非线性相移分布。
- 4) 设定非线性相移时间分辨最大值  $\Phi_{\text{max}}$  的枚举范围及枚举步长。
- 5) 以一定间隔  $\Delta t$  对脉冲进行时间切片(ns 级高功率激光脉冲时间间隔  $\Delta t$  通常应小于等于 40 ps),根据

$\Delta\nu = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  ( $\Delta\Phi$  为任一时间切片时间起点与时间终点的非线性相移差),计算  $\Phi_{\text{max}}$  取最大可能值时脉冲时间切片的最大/最小啁啾可能值。

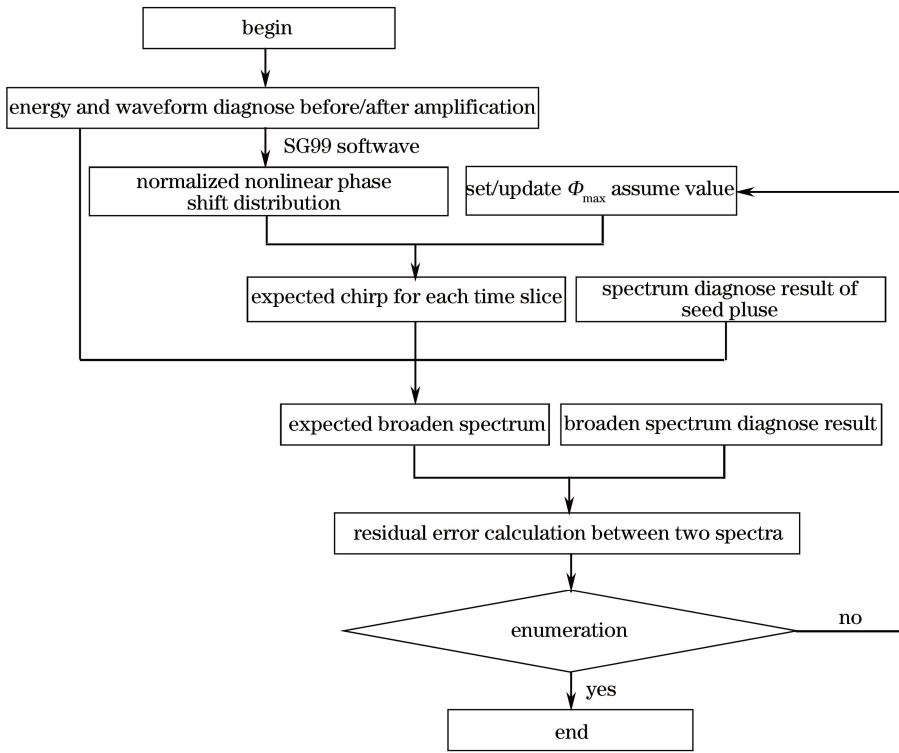


图 1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow chart

6) 设定光谱坐标的取值区间及取值间隔,光谱坐标取值上限应略大于种子脉冲光谱中心波长、正啁啾最大可能值的绝对值、种子脉冲光谱半底宽之和;下限应略小于种子脉冲光谱中心波长和负啁啾最大可能值的绝对值与种子脉冲光谱半底宽之和的差;光谱坐标取值间隔应综合考虑计算精度与计算负荷决定,在计算负荷不大的情况下可将实测数据光谱坐标分辨率取 1~2 位有效数字后作为取值间隔。

7) 根据  $\Delta\nu = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ ,从枚举初值开始计算出当前  $\Phi_{\max}$  下各时间切片的啁啾量  $\Delta\nu$  及能量值  $P\Delta t$ (由脉冲波形得到)。

8) 根据每个时间切片的  $\Delta\nu$ 、 $P\Delta t$  及种子脉冲光谱分布,对各时间切片在发生频率啁啾后的光谱分布进行插值运算,计算各时间切片发生频率啁啾后在各指定光谱坐标位置的强度值。

9) 根据给定的光谱位置,将所有时间切片在同一光谱指定位置上的强度相加之和作为理论预期光谱,分布在该光谱坐标位置的强度,计算当前  $\Phi_{\max}$  下展宽光谱的归一化理论预期分布。

10) 对实测光谱分布进行插值,计算实测光谱在各指定光谱坐标位置的归一化强度值。

11) 计算当前  $\Phi_{\max}$  下展宽光谱理论预期分布与实测分布的残差(归一化强度)。

12) 根据枚举步长更新  $\Phi_{\max}$ ,重复步骤 7)~11),得到所有  $\Phi_{\max}$  假设值下展宽光谱理论预期分布与实测分布的残差。

13) 展宽光谱理论预期分布与实测分布残差最小时对应的  $\Phi_{\max}$  假设值即为测量结果, $\Phi_{\max}$  结合归一化非线性相移分布即可得到时间分辨的非线性相移测试结果。

### 3 实验与分析

实验光路布局如图 2 所示,首先在激光装置预放诊断包处放置一 1.7 pm 高分辨光谱仪(采样间隔 0.157284 pm),测量预放系统输出种子脉冲的光谱,随后将该光谱仪布置到主放诊断包处,测量种子脉冲经过传输放大链路后展宽光谱的分布,结合预放和主放诊断包测量得到的能量及时间波形数据对脉冲的非线性相移进行测量分析<sup>[20-21]</sup>。脉冲时间波形测试所用的真空光电管(R1328,滨松,日本),其上升沿阶跃响应

时间  $\tau_1 \leq 60$  ps, 下降沿阶跃响应时间  $\tau_2 \leq 90$  ps; 脉冲波形记录所用实时数字示波器模拟带宽 8 GHz, 最大采样率 40 GS/s; 激光脉冲能量测量使用自研热释电型(预放诊断包)及热电堆型(主放诊断包)能量计, 能量测量不确定度为 2%。

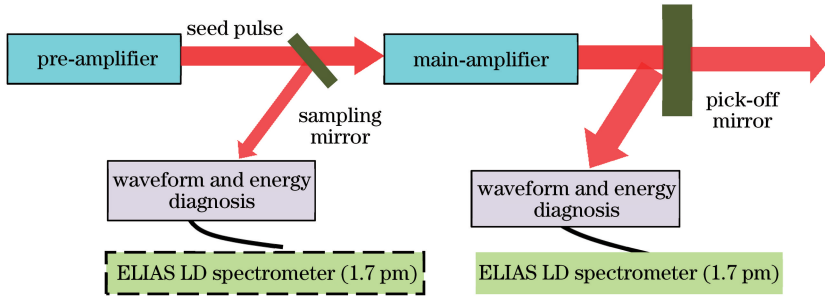


图 2 实验光路布置图

Fig. 2 Assignment diagram of experiment optical path

实验中在预放诊断包处测量得到的种子脉冲光谱如图 3(a) 所示, 脉冲经过传输放大链路后的展宽光谱分布及时间波形分别如图 3(b) 及图 3(c) 所示, 种子脉冲注入能量为 46 mJ, 经主放系统传输放大后的能量为 5716 J。

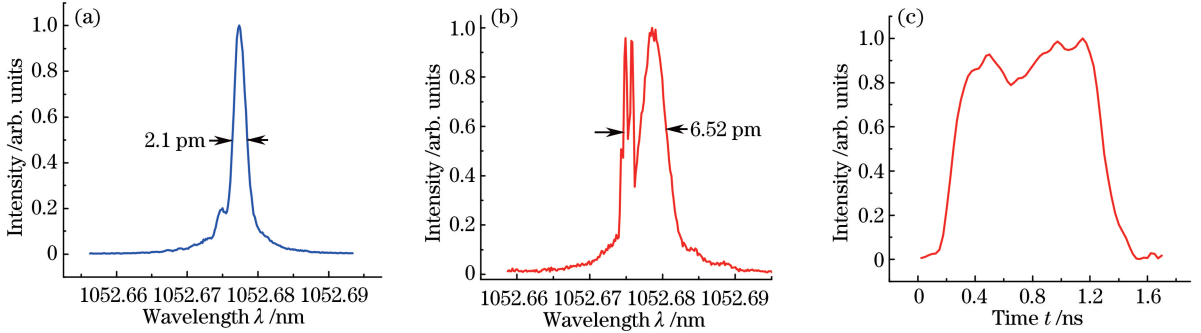


图 3 实验数据。(a) 种子脉冲光谱; (b) 脉冲放大后的光谱; (c) 脉冲放大后波形

Fig. 3 Experimental data. (a) Spectrum of seed pulse; (b) spectrum after pulse amplification; (c) waveform after pulse amplification

高功率激光装置中存在明显的增益饱和效应, 脉冲在传输放大过程中时间波形会发生变化, 其非线性相移时间分布与脉冲波形时间分布存在一定差异, 为便于对实验结果进行分析处理, 首先通过光传输软件 SG99 根据实验获得的脉冲放大前后时间波形和能流情况, 模拟出非线性相移随时间的归一化分布, 如图 4 所示。

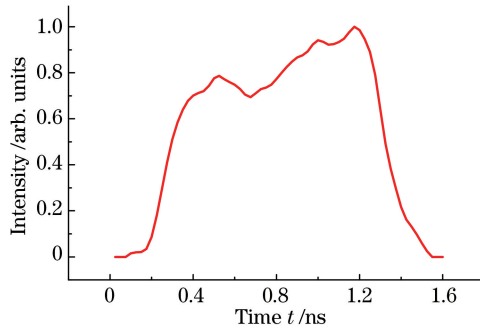


图 4 SG99 软件模拟的归一化时间分辨非线性相移分布

Fig. 4 Normalized time resolution nonlinear phase shift distribution simulated by SG99 software

根据图 4 所示的归一化非线性相移时间分布, 结合测量得到的时间波形, 以  $\Delta t = 25$  ps 的间隔对脉冲进行时间切片, 在非线性相移时间分辨最大值  $\Phi_{\max}$  的可能取值范围  $0 \sim 10$  内, 推导不同  $\Phi_{\max}$  取值(取值间隔 0.01)下脉冲放大后展宽光谱的预期分布, 计算各预期光谱归一化分布与实际光谱归一化分布的残差  $\delta$  (计

算时光谱坐标取值范围为 1052.63135~1052.71535 nm,光谱坐标取值间隔 0.2 pm)。图 5 为计算得到的  $\Phi_{\max}$ - $\delta$  分布曲线。图 6 展示了  $\Phi_{\max}$  取值分别为 0,2,4.63,6,8,10 时推导出的脉冲展宽光谱分布。

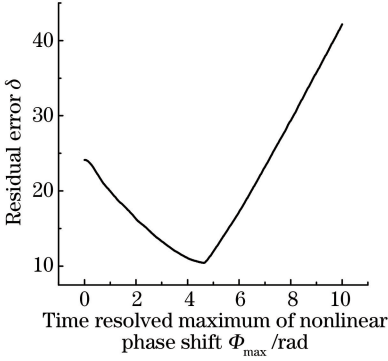


图 5 枚举得到的  $\Phi_{\max}$ - $\delta$  分布曲线

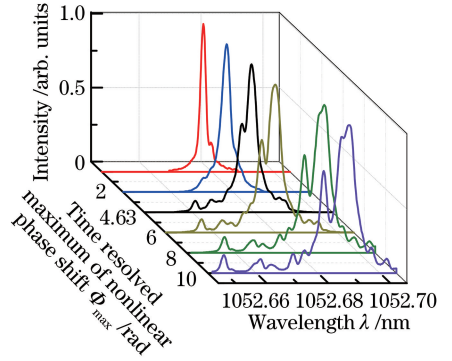


图 6  $\Phi_{\max}$  取不同值时的理论光谱分布

Fig. 5 Distribution curve of  $\Phi_{\max}$ - $\delta$  obtained by enumeration

Fig. 6 Theoretical spectra distribution with different  $\Phi_{\max}$

根据图 5,  $\Phi_{\max}$  的测量结果为 4.63(此时  $\delta$  最小), 相应的时间分辨非线性相移枚举测量结果如图 7 中的红线所示; 图 7 中的黑线为 SG99 软件直接根据(1)式模拟得到的非线性相移分布, 模拟时  $\gamma$  的取值为多篇文献[15-16]报道非线性系数的的平均值。  $\Phi_{\max}=4.63$  时, 计算得到的脉冲各时间切片啁啾分布及合成展宽光谱如图 8 所示, 展宽光谱模拟计算结果与实测结果的差异如图 9 所示。

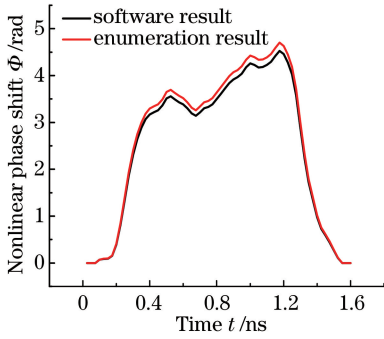


图 7 非线性相移时间分布枚举计算结果与 SG99 模拟结果比较

Fig. 7 Enumeration result of nonlinear phase shift time distribution compared with the result of SG99 simulation

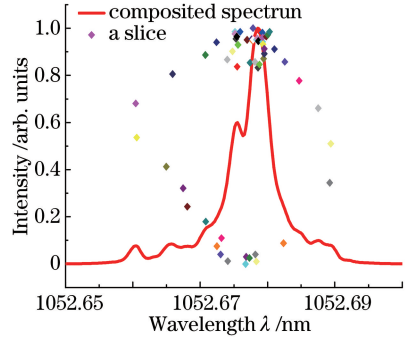


图 8 时间切片啁啾分布及合成展宽光谱( $\Phi_{\max}=4.63$ )

Fig. 8 Chip distribution of every slice and composed broadening spectrum ( $\Phi_{\max}=4.63$ )

图 7 中, 非线性相移枚举计算结果与光传输软件计算结果基本一致, 说明所提出的方法和计算结果是有效可信的。

图 9 中, 以 1052.67735 nm 为中心(种子脉冲光谱中心波长), 根据非线性相移枚举结果得到的展宽光谱预期分布及实测分布在红移部分(1052.677~1052.683 nm)符合得很好; 在蓝移部分(1052.675~

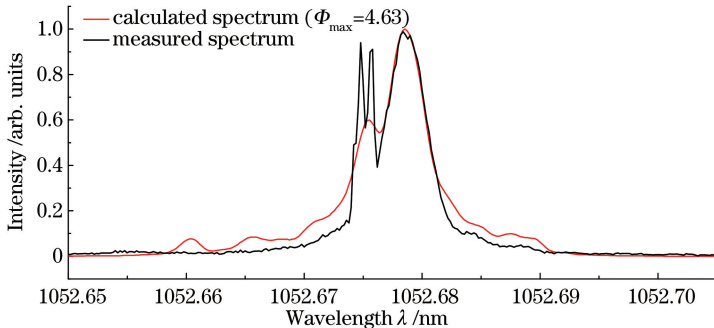


图 9 展宽光谱计算结果与实测结果比较

Fig. 9 Comparison of calculated result and measured result of broadening spectra



1052.677 nm), 实测光谱有两个峰而理论预测光谱只有一个峰, 但实测光谱没有较平坦的弱强度蓝移部分(1052.66~1052.675 nm)。根据图 3(c)与图 8, 理论预期结果的弱强度蓝移部分是脉冲尾部的下降沿(后沿)产生的, 因此造成理论计算结果与实际测量结果在蓝移部分存在差异的原因可能是测量时间波形所用光电管的下降沿响应特性不佳, 测量得到的脉冲后沿不准确(实际脉冲波形后沿应比测量结果陡), 导致依据测量波形计算所得到的脉冲后沿频率啁啾形成了较平坦的前沿部分, 而没有形成第一个蓝移峰。若光电管具有较快的下降沿响应特性, 展宽光谱的理论计算结果与测量结果在蓝移部分将符合得更好。

## 4 结 论

提出一种高功率激光装置脉冲非线性相移测试方法, 通过比较不同非线性相移假设值下脉冲放大后展宽光谱的理论预期分布与实测结果之间的差异, 对非线性相移真值进行枚举求解, 以非线性相移枚举值所对应理论光谱分布与实测光谱分布残差达到最小作为最优解判据。采用该方法进行激光脉冲的实际非线性相移测量, 测量结果与光传输软件模拟计算结果基本一致, 说明测量方法及结果是有效可信的。该方法使用实测波形计算归一化非线性相移分布并使用实测光谱作为枚举依据, 充分考虑了波形畸变和调制对测量的干扰, 提高了测量结果的可信度; 能够实现任意波形非啁啾激光脉冲的非线性相移测量。

## 参 考 文 献

- [1] Bespalov V I, Talanov V I. Filamentary structure of light beams in nonlinear liquids[J]. JETP Lett, 1966, 3(12): 307-311.
- [2] Li Xiaoyan, Zhang Yanli, Ouyang Xiaoping, *et al.* Effect of reflection on high power small-scale self-focusing. [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(11): 2844-2848.  
李小燕, 张艳丽, 欧阳小平, 等. 寄生反射对高功率激光小尺度自聚焦的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2844-2848.
- [3] Perry M D, Ditmire T, Stuart B C. Self-phase modulation in chirped-pulse amplification[J]. Opt Lett, 1994, 19(24): 2149-2151.
- [4] Lin Xiaodong, Wang Xiao, Li Dayi, *et al.* Analysis of small-scale self-focusing effects in nonlinear media with gain[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(5): 418-420.  
林晓东, 王道, 李大义, 等. 非线性增益介质中的小尺度自聚焦特性分析[J]. 中国激光, 2002, 29(5): 418-420.
- [5] Peng Zhitao, Jing Feng, Liu Lanqin, *et al.* Power spectra density estimation of quality of the laser beam passing through a self-focusing media[J]. Acta Phys Sin, 2003, 52(1): 87-90.  
彭志涛, 景峰, 刘兰琴, 等. 自聚焦激光束光束质量评价的功率谱密度方法[J]. 物理学报, 2003, 52(1): 87-90.
- [6] Rozanov N N, Smirnov V A. Small-scale self-focusing of laser radiation in amplifier systems[J]. Sov J Quantum Electron, 1980, 10(2): 232-234.
- [7] You Kewei, Zhang Yanli, Zhang Xuejie, *et al.* Analysis of near-field modulations caused by defects in high power laser system[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(3): 0302002.  
尤科伟, 张艳丽, 张雪洁, 等. 高功率激光系统中缺陷引起的近场调制分析[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0302002.
- [8] Wang Q Z, Liu Q D, Liu Disa, *et al.* High-resolution spectra of self-phase modulation in optical fibers[J]. J Opt Soc Am B, 1994, 11(6): 1084-1089.
- [9] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics and applications of nonlinear fiber optics[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2002: 63-84.  
Agrawal G P. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002: 63-84.
- [10] Yu Wenyan, Zheng Yuxia, Xie Zimin, *et al.* A method of directly measuring B-integral in a high power laser system [J]. Acta Optica Sinica, 1985, 5(1): 19-23.  
余文炎, 郑玉霞, 谢梓铭, 等. 一种直接测定高功率激光系统“B积分”的方法[J]. 光学学报, 1985, 5(1): 19-23.
- [11] Donaldson W R, Maywar D N, Kelly J H, *et al.* Measurement of the self-phase modulation-induced bandwidth in a 30 kJ class laser amplifier chain[J]. J Opt Soc Am B, 2011, 28(3): 445-449.
- [12] Villate D, Blanchot N, Rouyer C. Beam breakup integral measurement on high-power laser chains[J]. Opt Lett, 2007, 32(5): 524-526.
- [13] Bagnoud V, Zimmer D, Ecker B, *et al.* A technique for measuring B-integral in chirped-pulse amplifiers[C]. Lasers

- and Electro-Optics, Quantum Electronics and Laser Science Conference, 2009.
- [14] Wang Wenyi. Validity of code SG99 by TIL experiment[C]. China Defense Science and Technology Reports, 2005 GF-A0091086: 3-5.  
王文义. 光传输软件 SG99 的实验考核[C]. 中国国防科技报告, 2005, GF-A0091086: 3-5.
- [15] Cui Chuanpeng, Zhang Yudong, Zhuang Xinxin, *et al.* Z scan measurement of nonlinear refractive indexes of  $\text{YVO}_4$  crystal[J]. Chinese J Lasers, 1999, 26(2): 50-52  
崔传鹏, 张雨东, 庄欣欣, 等. 用“Z-scan”方法测钽酸钇的三阶非线性折射率[J]. 中国激光, 1999, 26(2): 50-52.
- [16] Milam D. Review and assessment of measured values of the nonlinear refractive-index coefficient of fused silica[J]. Appl Optics, 1998, 37(3): 546-550.
- [17] Kurnit N K, Shimada T, Sorem M S, *et al.* Measurement and control of optical nonlinearities of importance to glass laser fusion systems[C]. SPIE, 1997, 3047(649): 387-395.
- [18] Xie Xudong, Wang Xiao, Zhu Qihua, *et al.* High energy chirped pulse characteristics observed by spectral-resolved streak camera[J]. Acta Phys Sin, 2007, 56(11): 6463-6467.  
谢旭东, 王道, 朱启华, 等. 光谱分辨条纹相机测量高能啁啾脉冲特性[J]. 物理学报, 2007, 56(11): 6463-6467.
- [19] Wang Jianguang, Yang Lisong, Wang Guiying, *et al.* Study on the characteristics of spectra and time of ultrafast fluorescence[J]. Chinese J Lasers, 2000, 27(7): 597-600.  
王建岗, 杨莉松, 王桂英, 等. 超快荧光光谱的光谱特性和时间特性的研究[J]. 中国激光, 2000, 27(7): 597-600.
- [20] Sun Zhihong, Dong Jun, Xia Yanwen, *et al.* Temporal profile measurement of frequency modulation beams for high power laser facility[J]. Chinese J Lasers. 2013, 40(11): 1102009.  
孙志红, 董军, 夏彦文, 等. 高功率激光装置调频脉冲时间波形测试技术研究[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102009.
- [21] Li Lei, Zhang Bo, Xia Yanwen, *et al.* Pulse temporal profile measurement technology of frequency modulation based on self-focusing lens coupling optical fiber sampling for high power laser facility[J]. Chinese J Lasers. 2017, 44(5): 0504002.  
李磊, 张波, 夏彦文, 等. 基于自聚焦透镜耦合光纤取样的高功率激光装置调频脉冲时间波形测试技术研究[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0504002.