

文章编号: 0253-2239(2007)10-1905-4

超连续谱干涉方法测量古依相移*

王之光 曾志男 李儒新 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

摘要: 利用两束超连续光干涉得到的信号, 测量了透镜焦点附近飞秒激光脉冲的古依(Gouy)相移。根据得到的光谱干涉信号, 利用傅里叶变换得到相对相位值。激光光束在聚焦透镜后的束腰半径可以由成像方法测得。根据测量得到的激光光束束腰半径, 用非线性拟合的方法得到了古依相移曲线, 拟合曲线与实验结果符合得非常好。给出了古依相位在焦点前后 1 mm 区域内的移动量。

关键词: 超快光学; 超连续谱; 古依相移; 光谱干涉; 飞秒激光脉冲

中图分类号: O433 文献标识码: A

Measurement of Gouy Phase Shift by Supercontinuum Spectral Interference

Wang Zhiguang Zeng Zhinan Li Ruxin Xu Zhizhan

(State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract: The spectral interference between two white-light continuum beams is adopted to measure the Gouy phase shift of focused femtosecond laser pulses near the lens focus. From the spectral interference signal, the relative phase is extracted by the Fourier transform method. The beam waist of the laser pulses after the focusing lens is measured by imaging method. According to the beam radius, the curves of nonlinear fitting are drawn, and fit the data of experiments very well. The Gouy phase shift at the positions of 1 mm before and after the focal spot is presented.

Key words: ultrafast optics; supercontinuum spectrum; Gouy phase shift; spectral interference; femtosecond laser pulses

1 引 言

会聚光束经过透镜焦点位置时, 相对于平面波将会增加 π 的附加相位, 也称之为古依(Gouy)相移^[1]。在强场激光物理中, 古依相移起着非常重要的作用, 例如它决定着激光谐振腔中横模传输的重复频率^[2]。而在非线性光学中, 利用聚焦光束产生高次谐波的效率同样受到古依相移的影响^[3]。

对于这种相位异常变化的直观理论解释已经给出^[4,5]; 实验上, Jong H. Chow 小组也利用空间模式干涉的方法研究了一阶厄米-高斯空间模式的古

依相位变化^[1]。最近, 有两个实验小组分别采用载波相位稳定的激光放大器系统以及由阈上电离得到的光电子谱^[6]和载波相位稳定的激光振荡系统以及利用 ZnO 晶体实现的开环锁相装置^[7]研究了古依相移对于周期量级激光脉冲载波相位的影响。实验结果表明, 当载波相位稳定的周期量级激光脉冲由 $-\infty$ 经过聚焦焦点 ($z=0$) 处传播到 $+\infty$ 时, 由于光束受到了空间上的不同约束, 载波相位都会有一定的变化。这种变化对于所有超短脉冲激光的应用, 包括高次谐波和阿秒脉冲的产生^[8], 以及所有依赖

* 国家自然科学基金(60578049)资助课题。

作者简介: 王之光(1981-), 男, 山西人, 硕士研究生, 主要从事飞秒激光脉冲载波相位的测量与稳定等方面的研究。

E-mail: classicearth@gmail.com

导师简介: 曾志男(1976-), 男, 安徽人, 副研究员, 主要从事阿秒激光光谱学方面的研究。

E-mail: zhinan_zeng@siom.ac.cn

收稿日期: 2006-12-13; 收到修改稿日期: 2007-03-06

相位的效应都非常重要。

本文利用白宝石片产生的超连续谱的光谱干涉,得到了脉冲传播经过聚焦焦点处时的相位变化,同时,将实验中测得的焦斑大小带入(1)式中,拟合出古依相位变化曲线证明了这种实验技术的可行性和稳定性。

2 实 验

理论上,TEM₀₀模光波的古依相移可以表示为

$$\phi(z, \lambda) = -\arctan\left[\frac{z}{z_R(\lambda)}\right], \quad (1)$$

其中光束传播的方向是+z方向, Z_R 是瑞利长度。一般宽带激光在经过透镜聚焦后,由于透镜色差以及空气中自聚焦等过程的影响,会导致焦点附近的光场分布不太理想,而古依相位变化是这个过程中的重要参量。

实验装置如图1所示。由1 kHz激光器产生的波长为800 nm,脉冲宽度为50 fs的激光首先通过由半波片与偏振片组成的能量调节器,将脉冲能量调整为10 μJ。通过800 nm半透半反镜将原光束分为A路(图中虚线)和B路(图中实线)。A、B两路光分别通过两个焦距 $f=200$ mm的透镜,聚焦在3 mm厚的白宝石片上。由于聚焦后光斑的能量密度大于白宝石片产生自相位调制的能量密度阈值,由白宝石片出射的光具有超连续谱,如图2所示,光谱宽度为450~900 nm。出射光由焦距 $f=100$ mm的透镜收集,A路光由金镜反射到半透半反镜上与B路光发生光谱干涉,干涉信号被光谱仪(Acton Research 300i)接收。

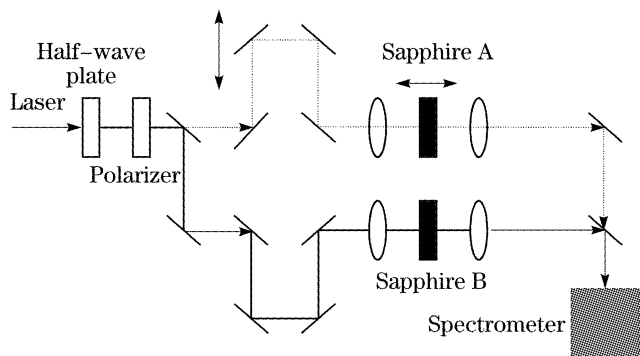


图1 古依相移测量装置示意图

Fig. 1 Experimental setup of measurement of Gouy phase shift

A路中的白宝石片固定在一个二维精密调整架上,调整精度为1 μm。通过调节调整架在z轴方向上的平移量,可以使白宝石片的位置由焦点前连续

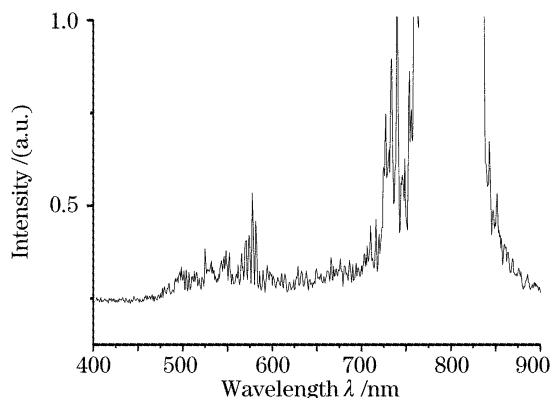


图2 激光脉冲聚焦在白宝石上产生的白光连续谱
Fig. 2 Spectra of the supercontinuum generated by nonlinear propagation in the sapphire crystal 变化到焦点后。

3 实验结果及分析

A路激光脉冲在聚焦到白宝石片之后某一频率(ω_1)的光场可以表示为

$$E_1(t) = A_1(t) \cos[\omega_1 t - kz_1 + \Delta\phi_1 + \phi(z, \lambda)], \quad (2)$$

B路激光脉冲在聚集到白宝石片之后该频率的光场可以表示为

$$E_2(t) = A_2(t) \cos(\omega_1 t - kz_2 + \Delta\phi_2), \quad (3)$$

(1)式、(2)式中, $A_1(t)$ 、 $A_2(t)$ 为A、B两路激光的光场振幅, k 为波矢值, z_1 、 z_2 为A、B两路激光的光程, $\phi(z, \lambda)$ 为古依相位。古依相位的变化主要是由于激光光束在光轴以外的另外两个尺度上受到束缚所引起的^[5]。在本实验中, A样品由激光焦点前移动到焦点后,在移动过程当中,激光光束由于尺度束缚引起的相位变化也就相应地附加在了白光连续谱中了。(1)式、(2)式中, $\Delta\phi_1$ 、 $\Delta\phi_2$ 是由其他传播效应引起的相位变化。样品A只是在激光焦点前后的瑞利长度范围内移动,而在瑞利长度范围内,聚焦光斑的半径是变化不大,从而激光光强也不会有很大的变化。所以 $\Delta\phi_1$ 、 $\Delta\phi_2$ 可以作为常量处理。A、B两路在光谱干涉后由光谱仪接收到的相同频率的强度信号可以表示为

$$I = |E_1(t) + E_2(t)|^2 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[k(z_2 - z_1) + \Delta\phi_1 - \Delta\phi_2 + \phi(z, \lambda)]. \quad (4)$$

当白宝石片距离焦距 $f=200$ mm透镜焦点位置一定时, $\phi(z, \lambda)$ 为一个定值。调节延时光路,可以在光谱仪上得到强度干涉信号,如图3所示。

调节A路中固定白宝石片的二维精密调整架

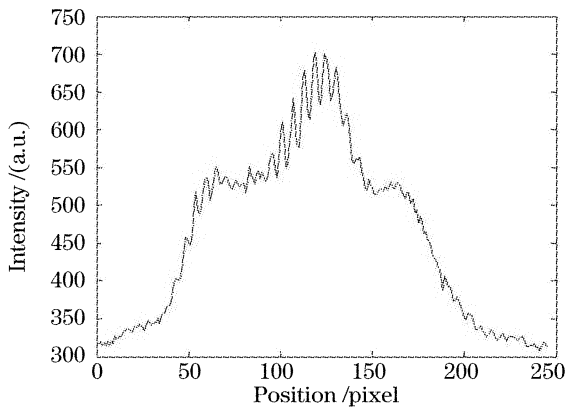


图 3 光谱仪上得到的 A、B 两路激光脉冲的干涉图

Fig. 3 Interference signal of the supercontinuum spectra of beam A and B on the spectrometer

在 z 轴(光轴)方向的位置,使高斯光束束腰处前后不同位置与白宝石片相互作用,由白宝石片出射的白光连续谱就会附加上古依相移。图 4 所示为固

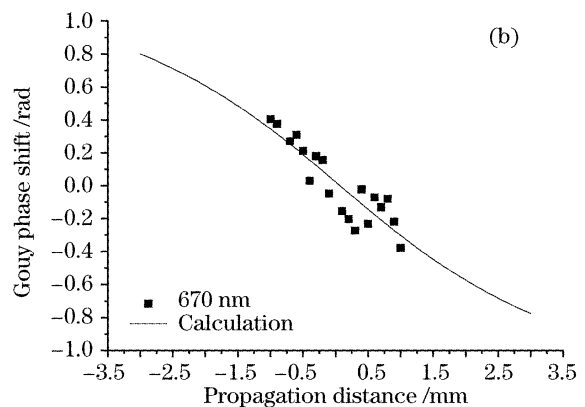
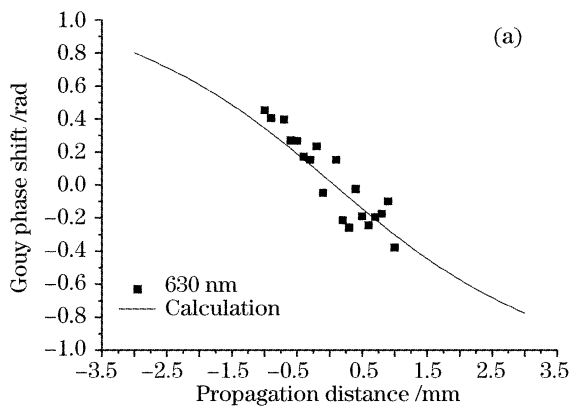


图 5 (a) 630 nm,(b) 670 nm 的古依相移的实验值对比图

Fig. 5 Comparison of Gouy phase shift at the wavelength of 630 nm (a) and 670 nm (b)

图 5 中曲线由(1)式得出。实验中利用成像原理测量了 $f=200$ mm 的聚焦透镜聚焦后的光斑大小,CCD 上得到了聚焦光斑放大 20 倍的像,如图 6 所示。

CCD 上得到的光斑大小为 0.994 mm,则实际光

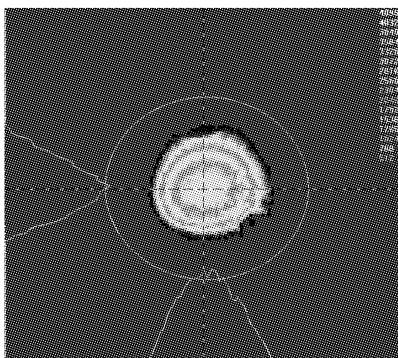


图 6 CCD 上得到的聚焦光斑的像

Fig. 6 Image of the laser beam at the focal point on the CCD

定在焦点附近某一点处,A、B 两路干涉的在 650 nm 附近的光谱图像。

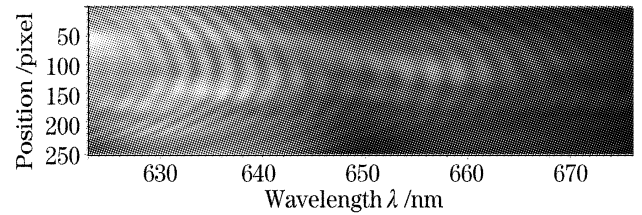


图 4 光谱干涉信号中 650 nm 附近的光谱的图像

Fig. 4 Spectrum of spectral interference signals round the wavelength 650 nm

连续调节二维调整架 z 轴的位置,使白宝石片由焦点前连续移动至焦点后,每隔 0.1 mm 测量一次 650 nm 波长附近的干涉信号,由光谱干涉信号可以得到相应的相对相位值。焦点前、后各移动 1 mm,实验中分别在 630 nm 和 670 nm 的连续谱附近测量了古依相移,如图 5 所示。

斑大小为 $2\omega_0=49.7 \mu\text{m}$ 。如图 5 所示,计算结果实验数据点都吻合的相当好。在将白宝石片从焦点前 1 mm 移动到焦点后 1 mm,相位变化 $\Delta\phi=0.646$ rad。

4 结 论

在目前超短激光与物质的相互作用过程中,焦点附近的古依相移是一个重要参量。观测到了古依相移使得激光脉冲在通过光束焦点处与聚焦区参量有关的相位值。结果显示超短飞秒激光脉冲与物质相互作用中的古依相位效应,并提供了一种测量古依相位的简单方法。

参 考 文 献

- 1 Jong H. Chow, Glenn de Vine, Malcolm B. Gray *et al.*. Measurement of Gouy phase evolution by use of spatial mode interference[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(20): 2339~2341
- 2 Anthony E. Siegman. *Lasers* [M]. California: University Science

Books, 1986

- 3 Robert W. Boyd. *Nonlinear Optics* [M]. 2nd ed., New York: Academic, 2003
- 4 Simin Feng, Herbert G. Winful. Physical origin of the Gouy phase shift[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(8): 485~487
- 5 Robert W. Boyd. Intuitive explanation of the phase anomaly of focused light beams[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1980, **70**(7): 877~880
- 6 F. Lindner, G. G. Paulus, H. Walther *et al.*. Gouy phase shift for few-cycle laser pulses[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(11):

113001

- 7 T. Tritschler, K. D. Hof, M. W. Klein *et al.*. Variation of the carrier-envelope phase of few-cycle laser pulses owing to the Gouy phase: a solid-state-based measurement[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(7): 753~755
- 8 Zeng Zhinan, Li Ruxin, Xie Xinhua *et al.*. High-order harmonic attosecond pulses driven by a two-pulse laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(7): 2316~2319 (in Chinese)
曾志男,李儒新,谢新华等. 采用双脉冲驱动产生高次谐波阿秒脉冲[J]. *物理学报*, 2004, **53**(7): 2316~2319

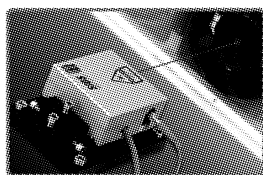
· 广 告 ·



天津微纳制造技术有限公司

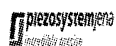
Tianjin MicroNano Manufacturing Tech Co., Ltd.

天津微纳制造技术有限公司, 2005年11月成立于天津经济技术开发区, 公司将先进制造技术中前沿的光学非球面与自由曲面、脆性材料复杂曲面、超精密及微纳元器件的制造技术的研究与开发作为发展方向, 以生产光学仪器、生物医疗仪器、日用及计算机外围设备中微小精密关键器件为发展目标。同时公司将引进微纳领域的海外先进仪器设备作为主要业务之一, 目前是德国SIOS Messtechnik GmbH (SIOS) 和Piezosystem Jena GmbH (PSJ) 公司的中国总代理, 为国内引进了SIOS公司的纳米级精度激光干涉仪和PSJ公司的纳米级压电致动与定位系统。这两类产品为微纳技术领域提供了纳米级测量与驱动的手段。



- 特点: 1. 纳米级精度激光干涉仪;
2. 分辨率优于0.01 nm;
3. 干涉头与电器箱分离;
4. 采用氦-氖稳频激光光源。

- 应用: 1. 超高精度长度、角度测量;
2. 构建多维工作台, 应用于显微、定位、坐标测量系统及精密机床装备;
3. 振动模态分析。



- 特点: 1. 压电陶瓷多维微纳致动系统;
2. 行程高达1500 μm;
3. 分辨率优于0.01 nm;
4. 具有高谐振频率、高稳定性、高负载能力。

- 应用: 1. 微电子、分子生物领域显微定位系统;
2. 超精密加工领域微纳定位系统;
3. 激光加工领域光束方向精密调节系统。

地址: 天津经济技术开发区第四大街
80号A2座二层 (300457)

电话: 022-59813868

传真: 022-59813870

E-mail: chenjinping@tju.edu.cn