

文章编号: 0258-7025(2009)08-2099-05

基频倍频光波前面的相位控制技术

雷 亮 陈 丽 胡正发 周金运 胡义华

(广东工业大学物理与光电工程学院, 广东 广州 510006)

摘要 结合数字干涉技术和倍频技术,设计了一种在相干控制中诊断相位波阵面畸变和判断其一致性的实验方案,实现了对基频倍频光波前面相位畸变的诊断。制作了一套自动相位修正系统,成功地应用于相干控制实验中。该系统利用相位畸变诊断算法,根据光强与相位差的关系求出相位差的空间形貌,计算出驱动压电陶瓷伸缩的电压值,使产生畸变的镜面朝相位畸变缩小的方向调整。实验结果表明,该系统可实时地自动纠正基频光与倍频光束波前面的相位差,实现两相位面在全光孔径内保持一致。

关键词 超快光学;飞秒脉冲测量;相位控制技术;相干控制

中图分类号 O437 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093608.2099

A Phase Controlled Technology on Fundamental Frequency and Second-Harmonic Generation Laser Wavefront

Lei Liang Chen Li Hu Zhengfa Zhou Jinyun Hu Yihua

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract Based on digital interference technology and second-harmonic generation (SHG) technology, an experimental method in diagnosing the phase aberration and phase coincidence on fundamental frequency and SHG laser wavefront is designed in coherent control. According to such technology, an effective auto-controlling system is designed and applied successfully in the coherent control photocurrent experiments. The method using retrieval algorithm, bases on the relationship between the beam intensity and phase difference to calculate spatial morphology in order to achieve the voltage of adjusting the piezoceramics, so that the mobile-mirror gets a movement with less aberration. The experimental results show that system can adjust the phase difference between the fundamental laser and its SHG automatically in real time, and realize the both wavefront being parallel in light aperture.

Key words ultrafast optics; femtosecond pulse measurements; phase control technology; coherent control

1 引 言

近年来在超快光学、非线性光学领域的很多实验都涉及到三次立方干涉光场的检测问题,此类光场具有电场三次立方的时间平均值非零的特性^[1~3],典型例子是基频光及其倍频光叠加而成的三次立方光场。尤其在通过改变相干光束的相位差产生电子自旋电流的相干控制实验中,基频光与倍频光的相位控制与稳定是实验成败的关键^[4~6]。本文讨论了传统的迈

克耳孙干涉系统不能测取三次立方干涉光场的原因,提出两次倍频的改进方案^[7]。利用此方案可使相干控制实验中基频光与倍频光的相位面保持平行,而且成功制作了对应的相位差自动纠正系统。

2 实验原理

光电探测器对光场 $E_1 \exp[i\omega_1 t + i\varphi_1]$ 和 $E_2 \exp[i\omega_2 t + i\varphi_2]$ (ω_1, ω_2 均为频率, φ_1, φ_2 均为相位) 的叠

收稿日期: 2008-08-05; 收到修改稿日期: 2008-12-19

作者简介: 雷 亮(1979—),男,讲师,博士研究生,主要从事超快光学中超短飞秒脉冲激光的产生与测量方面的研究。

E-mail: leiliang@gdut.edu.cn

导师简介: 胡义华(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事新型发光材料的合成与信息光学方面的研究。

E-mail: huyh@gdut.edu.cn

加所测量到的干涉信号为

$$I_{\text{int}} = \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} 2\text{Re}(E_1 E_2^*) \cos[(\omega_2 - \omega_1)t + (\varphi_2 - \varphi_1)] dt, \quad (1)$$

式中 τ_0 为光电探测器的瞬态响应时间, * 为复共轭符号。一般的干涉探测系统所探测到的干涉条纹是同频率($\omega_2 = \omega_1$)光波叠加的结果,于是(1)式演化成 $I_{\text{int}} = 2\text{Re}(E_1 E_2^*) \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$, 所以 I_{int} 是 $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ 的函数。但若为两束非同频光波叠加,即 $|\omega_2 - \omega_1| \neq 0$, 因为光电探测器的响应时间 $\tau_0 \gg 2\pi/|\omega_2 - \omega_1|$, (1)式积分得 $I_{\text{int}} = 0$, 探测不到干涉信

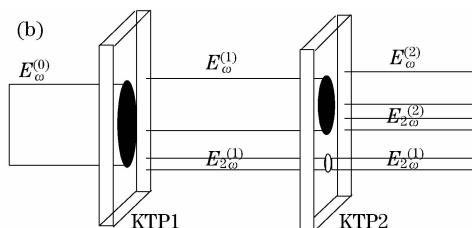
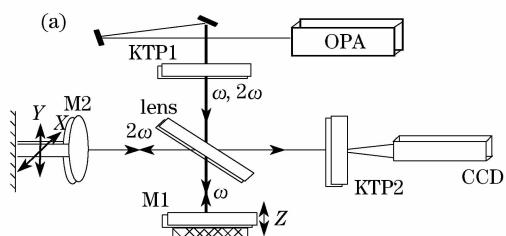


图 1 相位测量的原理图(a)和两次倍频的简化光路原理图(b)

Fig. 1 Geometry for phase measurement (a) and the brief geometry of twice SHG (b)

如图 1(a), 采用本实验室的飞秒脉冲光学参量放大器(OPA)产生 $\lambda = 1.42 \mu\text{m}$ 超快基频脉冲, 脉冲的半峰全宽(FWHM) $\Delta\tau \approx 150 \text{ fs}$, 重复率 1 kHz , 平均功率 60 mW 。基频脉冲通过第一块倍频晶体 KTP1 产生同相倍频光脉冲。使用的倍频晶体的截面为 $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, 厚 2 mm , 切割面与相位匹配方向正交。然后基、倍频混合光经过选通半反半透镜分成只有基频光和只有倍频光的两臂, 两光束分别经两片反射镜反射而原路返回, 其中基频光反射镜 M1 固定在与光路平行的可动延迟线上, 在 Z 方向上改变两光束波前面的整体相位差, 而倍频光反射镜 M2 是一个具有 X, Y 正交方向两个自由度的可动摇镜, 根据测取的干涉条纹信息控制两光束波前面保持动态平行。两路返回光再次通过一块与 KTP1 一样的倍频晶体 KTP2, 最后进入 400 万像素的高精度 CCD 以检测干涉条纹。

图 1(b)是通过两次倍频实现基频光与倍频光相位差可测可控的简化光路原理图。基频光脉冲经过 KTP1 后保留了大部分基频光($E_{\omega}^{(1)}$), 同时产生了小部分倍频光($E_{2\omega}^{(1)}$), 检测它们的波前面相位差需要在 CCD 前放置一块 KTP2 晶体, $E_{\omega}^{(1)}$ 因不满足相位匹配条件而无损耗通过, 而 $E_{\omega}^{(1)}$ 再被分成 $E_{\omega}^{(2)}$ 和 $E_{2\omega}^{(2)}$ 两部分, 其中 $E_{2\omega}^{(2)}$ 由于相位匹配关系而与 $E_{\omega}^{(1)}$ 保持同相位, 可代表 $E_{\omega}^{(1)}$ 波前面, 并且可与 $E_{2\omega}^{(1)}$ 产生干涉效应

$$I_{\text{int}} = E_{2\omega}^{(1)2} + E_{2\omega}^{(2)2} + 2(E_{2\omega}^{(1)} E_{2\omega}^{(2)}) \cdot$$

号^[8]。

相干控制实验的基本原理是用迈克耳孙干涉系统^[9]将基频光和倍频光分成两臂, 以控制不同频率的光束之间的相位差, 两光束最后注入样品产生自旋光电流。实验证明产生明显的自旋光电流要保证基频光与倍频光束波前面在全光孔径内基本平行, 依赖于一套实时的动态检测-纠正装置^[10]。检测办法是传统的用电荷耦合器件(CCD)测量两臂光束干涉条纹的方法。但由上述讨论可见, 不经过特殊处理, 基频光、倍频光由于频率不同是不存在干涉信号的。

$$\cos(\varphi'_2 - \varphi'_1), \quad (2)$$

式中 φ'_1 为 $E_{\omega}^{(1)}$ 光束初相位, φ'_2 为 $E_{2\omega}^{(1)}$ 光束初相位。

3 控制系统分析

由上述的相位控制光路可见, 原路返回的基频光、倍频光, 由于受到 M1 和 M2 的反射, 其光束波前面难以保证平行, 甚至它们各自的波前面已经不再是平面波。这可能由多种因素导致。由激光器输出的超快激光光场在近场呈空间高斯分布, 只能在远场看作为近似平面波; 超快脉冲经过的多个光学元件, 尤其可能是平面反射镜的平面度不足, 导致光束波前面出现畸变。然而出于对问题的简化, 假设入射 CCD 前的倍频光 $E_{2\omega}^{(1)}$ 与“代理”基频光 $E_{2\omega}^{(2)}$ 的波前等相面皆为近似平面, 此近似在相干控制实验中并不影响实验结果^[5]。于是通过改变摇镜 M2 [图 1(a)] 两个方向上的压电陶瓷的伸缩量可控制倍频光波前平面空间倾斜度, 结合干涉条纹所提供的信息使得两光束波前面保持平行状态。

图 2(a)为有 X, Y 两个正交自由度的可动摇镜实物示意图。平面反射镜中心点受控于两片压电陶瓷的伸缩量, 使得此中心点的移动轨迹是以摇镜杆长 r 为半径的球面 S , 如图 2(b)所示。设 $S1$ 为基频光波相位面, $S2$ 为压电陶瓷伸缩量在初始值时反射镜所导致的倍频光波波前面, 则光束孔径为 R 的柱体由于基频光的等相面不平行而产生如图 2(c)所

示的干涉图像。利用图像识别技术可以从 CCD 拍摄到的干涉图像中取得两项信息: 条纹的空间斜率 k 和条纹的数目 n 。可计算出控制压电陶瓷伸缩量的当量值 $\Delta x, \Delta y$

$$\begin{cases} -\frac{\Delta x}{\Delta y} = k \\ \frac{R}{r} \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = Kn\lambda_{2\omega} \end{cases}, \quad (3)$$

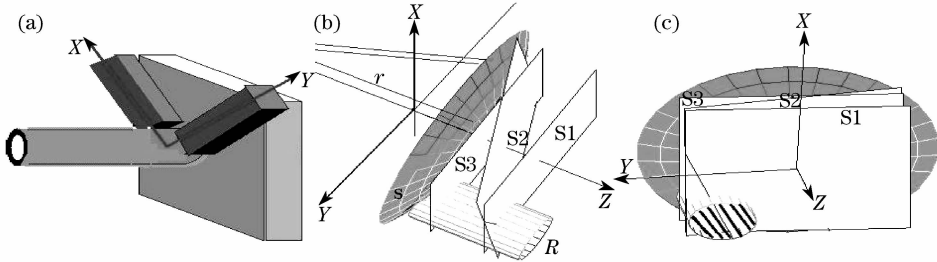


图 2 (a)控制倍频光波前面的摇镜模型;控制系统的侧视(b)和正视图(c)

Fig. 2 (a) Mobile-mirror model to control SHG phase-front and the side view (b) and front view (c) of the controlling system

在相干控制实验中基频光和倍频光会由于各种相位畸变的形状导致干涉光强图呈非均匀分布^[7], 最常见的畸变情况是飞秒脉冲经过光学元件时, 由于平面反射镜的平面度和平行度不良而导致相位面倾斜形成干涉条纹, 纠正的目标是使干涉光场为一均匀亮斑。此目标可通过相位差动态校正流程图实现, 如图 3。流程图大体分成 3 个主要过程: 图像特征信息提取、图像判定与控制量调节。

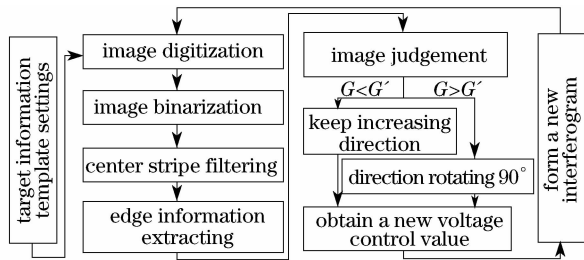


图 3 循环修复算法示意图

Fig. 3 Schematic of the retrieval algorithm

由图 4(a)可见, CCD 拍摄到的两束倍频光干涉光强图中干涉条纹的边缘或内部特征呈现一种随机性质, 然而这种随机性质在一定时间段内表现出一种稳态分布, 可以进行图像特征信息提取。图像特征提取流程为: 干涉光强图的光学放大、微观图像数字化、二值化处理^[11]、中心条纹滤波、边缘位置信息提取^[12]。用图像采集设备对经过放大后的干涉光强图转换为灰度数字图像; 将该灰度数字图像输入到计算机中, 根据预先确定的一个阈值对其进行二值化处理, 变为黑白二值(0,1)图像。图 4(b)是

式中 $\lambda_{2\omega}$ 为倍频光波长, K 为与压电陶瓷电压伸缩比有关的比例系数。由此可见, 根据动态拍摄到的干涉条纹图像, 可实时高效地计算出摇镜的调整量, 使得倍频光波相位面由原来的 S2 面调制成 S3 面, 与 S1 面平行, 实现基频光、倍频光在全光孔径干涉光场内相位面保持一致的控制。

经过二值化处理和中心条纹滤波后的图像, 可见中心干涉条纹的边缘轮廓已清晰可见。然后针对二值化图像按行扫描的方法记录下各行的两个边缘点位置信息 xl_i 与 xr_i , 得两个数据组 I_{LCUR} 与 I_{RCUR} 作为当前时刻的干涉光强图的特征信息模板。由于相位控制系统的校正目标是使干涉光场为一均匀亮斑, 把目标特征信息模板设置成一个接近图像框边缘的大圆环 I_{LTAR} 与 I_{RTAR} , 对应于如图 4(c)的二值化处理图像。利用误差函数 G 进行图像判定

$$G = \sqrt{\frac{1}{4N^2} \sum_{i=1}^N [(I_{LCUR} - I_{LTAR})^2 + (I_{RCUR} - I_{RTAR})^2]}, \quad (4)$$

将当前的判定值 G 与上一循环的判定值 G' 进行比较。若 $G < G'$, 则保持调节电压增量的增压方向, 否则增压方向右旋 90° 。利用此原则所确定的增压方向即可求得新一轮的控制电压 Δx 与 Δy 的大小。最后在执行模块上施行所谓的“控制量调节过程”, 执行模块指的是一个安装在基频光反射镜上的、由压电陶瓷控制的、具有 X, Y 正交方向两个自由度的可动摇镜驱动电路, 施加求得的控制电压以调节基频光波相位面的相对平行度, 形成一个进一步接近目标特征信息模板的干涉光强图。

4 实验结果

使用控制系统的相干控制实验光路图如图 5 所示。控制系统启动前, 基频脉冲与倍频脉冲拍摄得

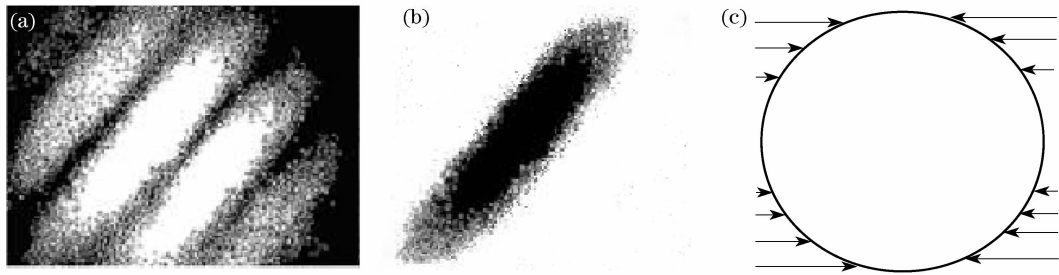


图 4 (a)未启用调节系统的干涉图;(b)经过二值化和中心条纹滤波后的图像;(c)目标特征模板

Fig. 4 (a) Interferogram without adjusting system; (b) the image after binarization and center stripe filtering; (c) the target template

到如图 6(b)所示的干涉条纹。对控制系统的分析可见,干涉图像中明暗条纹间距是基频光波相位面平行度的重要表征参量。为提高实验精度,设相邻亮条纹间的垂直距离为参量 D ,单位为 CCD 的像素点个数,该值与 CCD 像敏元间距的乘积即为干涉图像亮条纹的实际间距。 D 值越大两束倍频光相位面的平行度越高,当它们绝对平行时 $D = \infty$ 。在压电陶瓷的可动范围内驱动电压 V 是一个渐变的参量,由于每个 V 值都对应一个光束波前面的倾斜度,从而改变 CCD 拍摄得到的干涉条纹的亮纹间距,于是 V 的变化对应参量 D 值的变化,通过该变化关系,找出 D - V 曲线的峰值点 P , P 点即为控制系统能实

现的两束倍频光最平行的状态,由此可确定基频光束波前面。

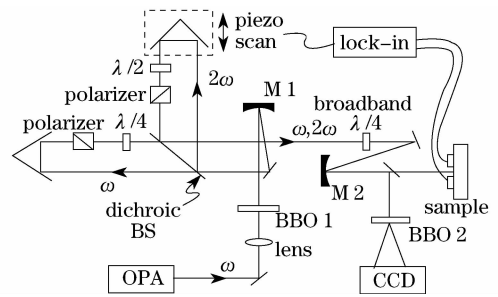


图 5 相干控制实验光路图

Fig. 5 Experimental geometry of coherent control system

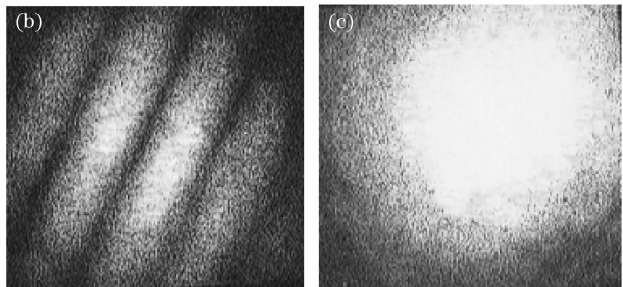
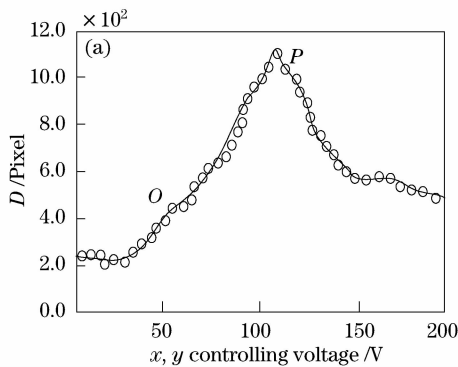


图 6 实验结果。(a)驱动电压与垂直距离的关系曲线;(b)对应“O”点的干涉图;(c)对应“P”点的干涉图

Fig. 6 Experimental results. (a) vertical distance versus controlling voltage; (b) interference pattern, corresponding point “O”; (c) interference patten corresponding point “P”

图 6(a)是根据实验数据做出的 D - V 曲线,空心圆点是离散采样点,实线是空心原点的拟合曲线, O 点是控制系统未工作时($x=50$ V, $y=50$ V) 摇镜所处的“非平行状态”,对应于如图 6(b)所示的干涉图像; P 点是系统经过(3)式计算得调制量 Δx , Δy 后调节摇镜所得的“平行”状态,对应于如图 6(c)所示的干涉图像。干涉图像从图 6(b)到图 6(c)转变的实验结果表明,本系统可实时地自动纠正基频光与倍频光光束波前面的相位差,实现两相位面在全光

孔径内保持一致。

5 结 论

讨论了一种诊断光学相干控制中基频光及其倍频光相对相位面畸变的方案。由第一个倍频晶体产生的非线性光学信号与经过第二次倍频晶体产生的信号形成一个干涉场,结合数字干涉技术,诊断出基频光及其倍频光相干涉的相位差畸变情况。提出了一种相位差稳定自动控制系统的设计方案,应用该

系统成功地完成了超快信息光学中的相干控制实验。此系统不但适用于光束为理想平面波的情况, 且能应用到光束波阵面存在相位畸变的情况。

参 考 文 献

- 1 G. Lupke, G. Marowsky, R. Steinhoff. Phase-controlled nonlinear interferometry[J]. *Appl. Phys. B*, 1989, **49**(3):283~289
- 2 U. Osterberg, W. Margulis. Dye laser pumped by Nd : YAG laser pulses frequency doubled in a glass optical fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(8):516~518
- 3 Wen Shuangchun, Dai Xiaoyu, Xiang Yuanjiang *et al.*. Research advances in nonlinear optics of metamaterials[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6):803~810
文双春,戴小玉,项元江等. 超常介质非线性光学研究进展[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6):803~810
- 4 M. J. Stevens, A. L. Smirl, R. D. R. Bhat *et al.* Coherent control of an optically injected ballistic spin-polarized current in bulk GaAs[J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **91**(7):4382
- 5 A. Hache, J. E. Sipe, H. M. van Driel. Quantum interference control of electrical currents in GaAs[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(7):1144~1154
- 6 Zheng Liunian, Zhu Jiangqiang. Second-harmonic generation errors in characterizing ultrashort pulses with spectral phase interferometry for direct electrical reconstruction[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2):254~258
- 郑留念,朱健强. 光谱相位相干技术测量飞秒脉冲的倍频误差[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2):254~258
- 7 N. Chudinov, Yu. E. Kapitsky, A. A. Shulginov *et al.* Interferometric phase measurements of average field cube $E_x^3 E_z^3$ [J]. *Opt. and Quant. Electr.*, 1991, **23**(8):1055~1060
- 8 Z. Y. Ou, E. C. Gage, B. E. Magill *et al.* Observation of beating between blue and green light[J]. *Opt. Commun.*, 1988, **69**:1~5
- 9 Ren Hongliang, Wang Jiuyang, Lou Liren *et al.* Measuring phase retardation and fast axis azimuth of a wave plate using Michelson interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2):249~253
任洪亮,王久扬,楼立人等. 利用迈克耳孙干涉仪测量波片相位延迟量和快轴方向[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2):249~253
- 10 E. Dupont, P. B. Corkum, H. C. Liu *et al.* Phase controlled currents in semiconductors[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**:3596~3599
- 11 Wang Qiang, Ma Lizhuang. Binary-conversion of image with feature preserving[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2000, **12**(10):746~750
王 强,马利庄. 图像二值化时图像特征的保留[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2000, **12**(10):746~750
- 12 Ding Xiaohua, Li You, Yu Qifeng *et al.* CCD noise calibration and its application in edge location [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1):99~104
丁晓华,李 由,于起峰等. CCD 噪声标定及其在边缘定位中的应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1):99~104