

文章编号:1001-9014(2009)04-0303-04

相干控制中基倍频光等相面的测控方法

雷亮¹, 陈丽¹, 徐初东², 赖天树², 林位株²

(1. 广东工业大学 物理与光电工程学院, 广东 广州 510006;

2. 中山大学 光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要:在超快光学领域中的相干控制实验中,往往由于基频及其倍频激光脉冲波前面的位相面畸变与相位不一致性的存在而无法达到预期的实验结果.本文设计了一种诊断此畸变的实验方法,制作得一台效果显著的自动位相修正系统,成功地使用在相干控制光电流实验中.该系统利用位相畸变修复算法,根据光强与位相差的关系求出位相差的空间表面结构,由此计算压电陶瓷的调节电压与方向,使得可移动反射镜朝畸变减少的方向移动.实验结果表明该系统可实时自动地调节两光束的波前面保持平行.

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:TN241 **文献标识码:**A

PHASE MEASURED AND CONTROLLED TECHNOLOGY BASED ON ITS BASIC AND HARMONIC LASER BEAM IN COHERENT CONTROL

LEI Liang¹, CHEN Li¹, XU Chu-Dong², LAI Tian-Shu², LIN Wei-Zhu²

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: In ultrafast optical coherent control, the existence of the phase distortion and phase inconsistency on fundamental frequency and its second harmonic generation laser wavefront leads to fail to achieve the desired experiment results in most cases. An experimental method in diagnosing such distortion situation was designed to make an effective auto-control system applied successfully in the coherent control photocurrent experiments. The retrieval algorithm was used, and the spatial surface structure was calculated based on the relationship between the beam intensity and phase difference, thus the voltage or direction was achieved. In this way, the mobile-mirror moves to less aberration. The mentioned experimental result proves that the system can adjust the two wavefronts being parallel automatically in real time.

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

引言

利用超短激光脉冲的相干效应来控制电子、原子以及分子中的物理、化学过程的研究已有数十年,已引起人们越来越多的关注.通过不同跃迁路径的干涉来控制系统某些量子态的相长或相消,从而得到常规方法所无法实现的量子状态,这一技术常被人们称为“相干控制”.在相干控制的实验研究中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,即 $\langle E^3 \rangle$

$\neq 0$ ($\langle E \rangle = 0$)^[1,2],典型例子是基频光及其倍频光叠加而成的三次立方光场 $E_{\omega}^2 E_{2\omega}^*$.尤其在通过改变相干光束的位相差产生电子自旋电流的相干控制实验中^[3],基频光与倍频光的位相控制与稳定是实验成败的关键^[4-6].本文首先讨论了传统的迈克尔逊干涉系统不能测取三次立方干涉光场的原因,然后提出两次倍频的改进方案,该方案参考了 Chudinov 提出的针对三次立方光场相位测量技术^[7],实现了对基频倍频光波前面位相畸变的诊断,并以此技术制作了一个自动位相修正仪,成功地应用于相干控制实验中.该方案利用的是位相畸变诊断算法,根据光

收稿日期:2008-08-11,修回日期:2009-02-14

Received date: 2008-08-11, revised date: 2009-02-14

基金项目:国家自然科学基金(60178020,10274107)、广东省自然科学基金(011204,07001789)和广东省教育厅育苗工程(402082819)资助项目

作者简介:雷亮(1979-),男,广东台山人,讲师,博士,主要从事超快光学中的超短飞秒脉冲激光的产生与测量研究, E-mail: leiliang@gdut.edu.cn.

强与位相差的关系求出位相差的空间形貌,再用最小二乘法拟合得畸变波面的函数表达式,由此计算驱动压电陶瓷伸缩的电压值,使得产生畸变的镜面朝位相畸变缩小的方向调整.

1 实验原理

光电探测器对光场 $E_1 \exp [i\omega_1 t + i\varphi_1]$ 和 $E_2 \exp [i\omega_2 t + i\varphi_2]$ 的叠加所测量到的干涉信号为

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

其中, τ_0 是光电探测器的瞬态响应时间. 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, 于是式 (1) 演化成 $I_{int} = 2\text{Re}(E_1 E_2^*) \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$, 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 $\tau_0 \gg 2\pi/|\omega_2 - \omega_1|$, 式 (1) 积分得 $I_{int} = 0$, 探测不到干涉信号^[8].

如图 1(a) 所示, 采用本实验室的飞秒脉冲光学参量放大器 OPA (Optical Parameter Amplifier) 产生 $\lambda = 1.42\mu\text{m}$ 超快基频脉冲, 脉冲的半高全宽 $\Delta\tau \approx 150\text{fs}$, 重复率 1kHz , 平均功率 60mW . 基频脉冲通过第一块倍频晶体 KTP1 以产生同相倍频光脉冲. 使

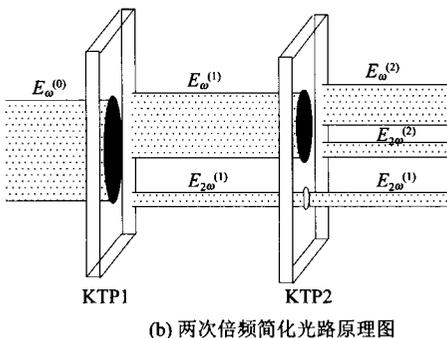
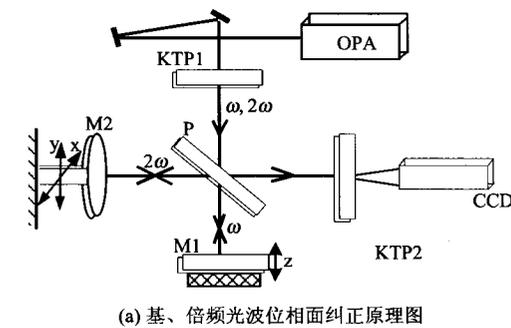


图 1 (a) 基、倍频光波位相面纠正原理图 (b) 两次倍频简化光路原理图
Fig. 1 (a) The principle for correcting the fundamental and second harmonic generation frequencies laser wavefront (b) the brief principle of twice SHG

用的倍频晶体的截面为 $8\text{mm} \times 8\text{mm}$, 厚 2mm , 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 P 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位相差, 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^[9]. 两路返回光再次通过一块与 KTP1 一样的倍频晶体 KTP2, 最后射入 400 万象素的高精度 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位相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 ($E_{2\omega}^{(1)}$), 检测它们的波前面位相差需要在 CCD 前放置一块 KTP2 晶体, $E_{2\omega}^{(1)}$ 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 $E_\omega^{(1)}$ 保持同位相, 可代表 $E_\omega^{(1)}$ 波前面, 并且可与 $E_{2\omega}^{(1)}$ 产生干涉效应:

$$I_{int} = E_{2\omega}^{(1)2} + E_{2\omega}^{(2)2} + 2(E_{2\omega}^{(1)} E_{2\omega}^{(2)}) \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (2)$$

式中, φ 为 $E_\omega^{(1)}$ 光束初位相, φ_2 为 $E_{2\omega}^{(1)}$ 光束初位相.

2 控制系统分析

由上述的位相控制光路可见, 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

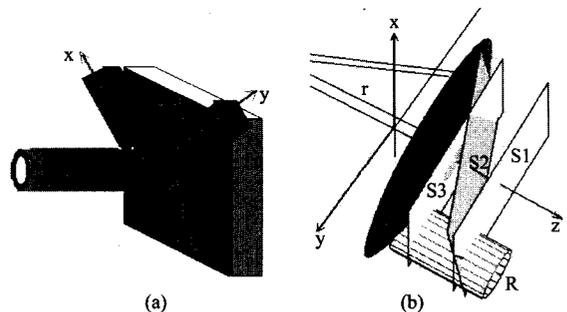


图 2 (a) 控制倍频光波前面的摇镜模型 (b) 控制系统抽象图 (侧视)
Fig. 2 (a) The mobile-mirror model (b) the abstract chat of the controlling system

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^[10].于是通过改变摇镜 M2(见图 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.

如图 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 为基频光波位相面,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 .经计算,可利用下式计算出控制压电陶瓷伸缩量的当量值 $\Delta x, \Delta y$

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

其中, $\lambda_{2\omega}$ 为倍频光波长, K 是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,使得倍频光波位相面由原来的 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位相面保持一致的控制.

如上述,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的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.此目标可通过以下的位相差动态校正流程图实现(如图 3).流程图大体分成三个主要过程:图像特征信息提取、图像判定与控制量调节.

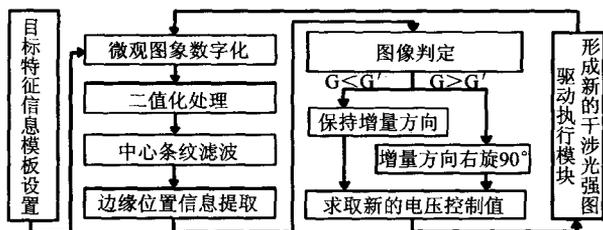


图 3 校正系统的闭环流程图

Fig. 3 The closed-loop flow chart of the correcting system

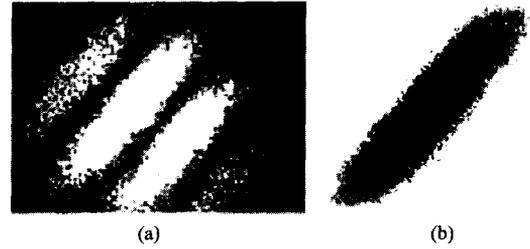


图 4 (a)系统启用前的干涉光强图 (b)经过二值化处理和中心条纹滤波后的图像

Fig. 4 (a) The interferogram without the adjusting system (b) the image of binary-conversion

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.图 4(b)是经过二值化处理和中心条纹滤波后的图像,由图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 , 得到两个数据组 I_{LCUR} 与 I_{RCUR} , 作为当前时刻的干涉光强图的特征信息模板.由于位相控制系统的校正目标是使干涉光场为一均匀亮斑,我们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} . 此时利用如下的误差函数进行图像判定

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

将当前的判定值 G 与上一循环的判定值 G' 进行比较.若前者小于后者,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.

3 实验结果

将此系统应用于相干控制实验,控制系统启动前,基频脉冲与倍频脉冲拍摄得到如图 5(b)所示的干涉条纹.由上述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位相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 值越大两束倍频光位相面的平行度越高,当它们绝对平行时 $D = \infty$. 在压电陶瓷的可动范围

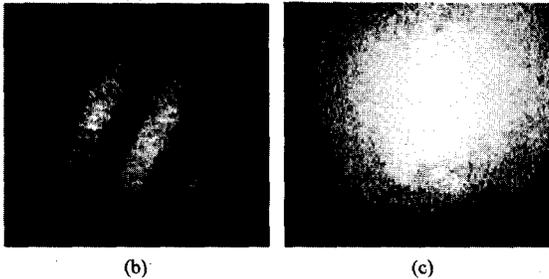
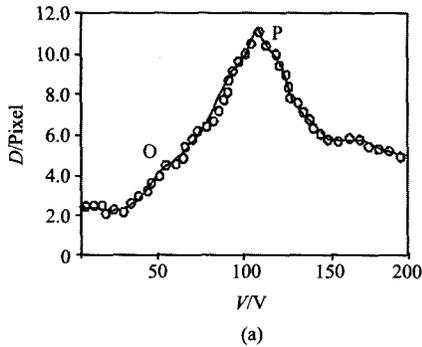


图5 实验结果
Fig. 5 Experimental results

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 的变化对应上述的参量 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(a) 是根据实验数据作出的 $D-V$ 曲线, 图中的空心圆点是离散采样点, 实线是空心原点的拟合曲线, 曲线中的 O 点是控制系统未工作时 ($x = 50V$, $y = 50V$) 摇镜所处的“非平行状态”, 对应如图 5(b) 所示的干涉图像; P 点是系统经过式 (3) 计算得到的调制量 $\Delta x, \Delta y$ 后调节摇镜所得的“平行”状态, 对应如图 5(c) 所示的干涉图像。干涉图像从图 5(b) 到图 5(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位相差, 实现两位相面在全光孔径内保持一致。该系统使用于相干控制实验后得到了明显的相干控制光电流信号。

4 结语

本文详细讨论了一种诊断光学相干控制中基频光及其倍频光相对位相面畸变的方案。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位相差畸变情况。同时还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位相畸变的情况, 这在位相控制方面有重要意义和广阔的应用前景。

REFERENCES

- [1] Lupke G, Marowsky G, Steinhoff R. Phase-controlled nonlinear interferometry[J]. *Applied Physics B*, 1989, **49**(2): 283—289.
- [2] Osterberg U, Margulis W. Dye laser pumped by Nd:YAG laser pulses frequency doubled in a glass optical fiber[J]. *Optics Letters*, 1986, **11**(4): 516—518.
- [3] LAI Tian-Shu, LIU Lu-Ning, SHOU Qian, et al. Spintronics, spintronic devices and electron-spin relaxation in GaAs[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (赖天树, 刘鲁宁, 寿倩, 等. 自旋电子学、自旋电子器件及 GaAs 中电子自旋弛豫研究. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(3): 189—192.
- [4] Stevens M J, Smirl A L, Bhat R D R, et al. Coherent control of an optically injected ballistic spin-polarized current in bulk GaAs[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, **91**(11): 4382—4392.
- [5] Hache A, Sipe J E, van Driel H M. Quantum interference control of electrical currents in GaAs[J]. *IEEE Journal of Quantum Electron*, 1998, **34**(4): 1144—1154.
- [6] HUANG Shi-Hua, LI Xi, LIN Yan, et al. Study of ultrafast process in semiconductor[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (黄仕华, 李汐, 凌严, 等. 半导体中超快过程的研究. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(3): 179—181.
- [7] Chudinov N, Kapitsky Yu E, Shulginov A A, et al. Interferometric Phase measurements of average field cube $E_{\omega}^2 E_{2\omega}^*$ [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1991, **23**(8): 1055—1060.
- [8] Ou Z Y, Gage E C, Magill B E, et al. Observation of beating between blue and green light[J]. *Optics Communication*, 1988, **69**(1): 1—5.
- [9] Dupont E, Corkum P B, Liu H C, et al. Phase controlled currents in semiconductors[J]. *Physical Review Letters*, 1995, **74**(12): 3596—3599.
- [10] Hache A, Sipe J E, van Driel H M. Quantum interference control of electrical currents in GaAs[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, **34**(4): 1144—1154.
- [11] WANG Qiang, MA Li-Zhuang. Binary-conversion of image with feature preserving[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics* (王强, 马利庄. 图像二值化时图像特征的保留. *计算机辅助设计与图形学学报*), 2000, **12**(10): 746—750.