

# 光学相干控制中脉冲光束等相面的实时测控\*

雷 亮 林春梅 刘鲁宁 林位株

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

**摘 要** 描述了飞秒脉冲基频光、倍频光光束位相差对相干控制光电流注入的控制作用, 提出一种控制基频光、倍频光在全光孔径干涉光场内的等相面保持一致的实验方案, 制作了一套相位差稳定自动控制系统, 并应用于光学相干控制光电流实验中, 获得较好的实时控制结果.

**关键词** 相干控制光电流; 位相畸变; 二次倍频; 飞秒脉冲

**中图分类号** TN241 **文献标识码** A

## 0 引言

通过量子干涉效应, 光束的位相可以用来控制半导体中的载流子布居、光电流、化学反应等动力学过程, 即所谓相干控制(QUIC)<sup>[1~3]</sup>. 相干控制光电流的上升时间与激发光脉冲的上升时间相当, 无须外加电场加速就可以实现快速的光电转换, 并且相干控制光电流的速度快, 光电转换效率高, 这使得激光相干控制光电流技术成为发展新型高速半导体光电器件的一条有效途径<sup>[4,5]</sup>. 在相干控制实验中, 对光束波阵面的控制至关重要. 同频率光束之间等相面的校正已有很多研究, 不同频率的光束之间的波阵面校正却少见报道<sup>[6,7]</sup>. 本文发展了两次倍频的改进方案. 利用此方案成功制作了对应的位相差自动纠正系统, 实现了在相干控制实验中基频光与倍频光的位相面控制, 有效地应用于产生注入光电流的相干控制实验中.

## 1 飞秒脉冲光相位差控制半导体注入光电流原理

飞秒脉冲的基频光和倍频光分别在半导体材料中诱发单光子和双光子吸收. 相干电流的产生源于单光子和双光子跃迁几率幅相互干涉所致的光生载流子在  $k$  空间的不对称分布. 由费米黄金定则理论<sup>[8]</sup>, 电流的注入速率可以表示为

$$\frac{d\langle \hat{j} \rangle}{dt} = \frac{d\langle \hat{j} \rangle_1}{dt} + \frac{d\langle \hat{j} \rangle_2}{dt} + \frac{d\langle \hat{j} \rangle_I}{dt} \quad (1)$$

式(1)右边第一项对应于单光子吸收, 第二项对应于双光子吸收, 第三项则对应于单光子跃迁和双光子跃迁的量子干涉项. 式(1)中的前两项对相干电流的贡献很小, 可以忽略他们而只考虑量子干涉项的

贡献<sup>[9]</sup>. 电流的注入速率具体写为

$$\dot{j} = \text{Im}(\eta^{xxxx} + \eta^{xyyx} + 2\eta^{xyxy}) |E(\omega)|^2 \cdot |E(2\omega)| \sin(\Delta\varphi) \hat{y} \quad (2)$$

式中  $\eta^{abcd}$  为电流注入张量,  $E(\omega)$  和  $E(2\omega)$  为包含相位因子  $\exp(i\varphi_\omega)$  和  $\exp(i\varphi_{2\omega})$  的光场复振幅, 光子能量满足以下关系<sup>[10]</sup>:  $\hbar\omega < E_g < \hbar 2\omega < E_b$ , 其中  $E_g$  为势阱层(GaAs)的带隙宽度,  $\Delta\varphi = 2\varphi_\omega - \varphi_{2\omega}$  为两束之间的相位差. 则由式(2)可以看出, 能够直接用上面定义的位相参量  $\Delta\varphi$  来控制注入电流的方向和大小.

在产生相干电流的实验中, 保持光束的等相面, 即波阵面质量非常重要. 相干光束在经过各种光学器件入射样品前, 波阵面会发生畸变, 使样品受激发区内的相位在整个光束截面上产生畸变, 严重影响相干电流的产生. 所以, 有必要建立波阵面质量的监控系统, 校正基频光和倍频光之间的波阵面畸变. 一般的干涉测量法若用于测量频率不同的两束光, 会因为由显著频率差所导致干涉项的变动, 而无法求解位相差的三维波阵面. 本文提出的两次倍频方法能够诊断基频光、倍频光两光束的相对相位是否在光束全口径内一致, 并进行优化调整, 显著提高相干光电流的效率.

## 2 位相差控制方法

激光光束位相畸变诊断装置如图 1. KLM 钛宝石飞秒激光器发出的  $\omega$  基频脉冲光束, 经过倍频晶体 KDP1 后产生倍频光  $2\omega$ ; 分束镜  $BS_1$  将基频光和倍频光分开, 作为等臂干涉仪的两光路, 其中基频光通过可变光学延迟线 PZT; 然后两光束汇聚在一起, 通过分束镜  $BS_2$  和会聚透镜射入样品, 产生相干光电流. 由  $BS_2$  分出的一部分光束作为基、倍频光等相面检测光路; 它通过倍频晶体 KDP2,  $\omega$  光束再发生一次倍频, 经分束镜  $BS_2$  将基频光和倍频光分开, 前后两次产生的倍频光产生干涉. 用 CCD 探测从  $BS_2$  输出的倍频光的干涉光强, 再输往计算机

\*国家自然科学基金(60178020, 10274107)及广东省自然科学基金(011204)资助

Tel: 020-84110042 Email: stslwz@zsu.edu.cn

收稿日期: 2004-11-15

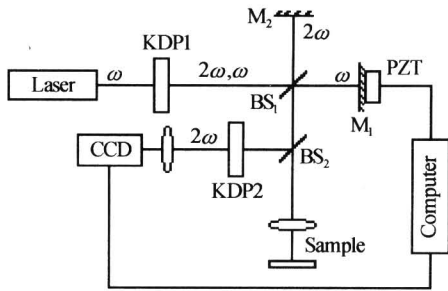


图 1 基频光与倍频光的干涉装置  
Fig. 1 Schematic of interference between the fundamental and the second harmonic beams

处理并控制基频光反射镜  $M_1$ . 此反射镜是一个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, 可对畸变波面进行纠正.

如上所述, 在相干控制实验中基频光和倍频光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<sup>[11]</sup>, 需要快速调节控制量  $\Delta X$  与  $\Delta Y$  以实现实时位相差校正. 而纠正的目标是使干涉光场为一均匀亮斑. 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, 那么只要调整基频光反射镜的倾角便可实现纠正. 本实验室的相干控制实验使用如图 2 所示流程图实现位相差的动态校正: 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.

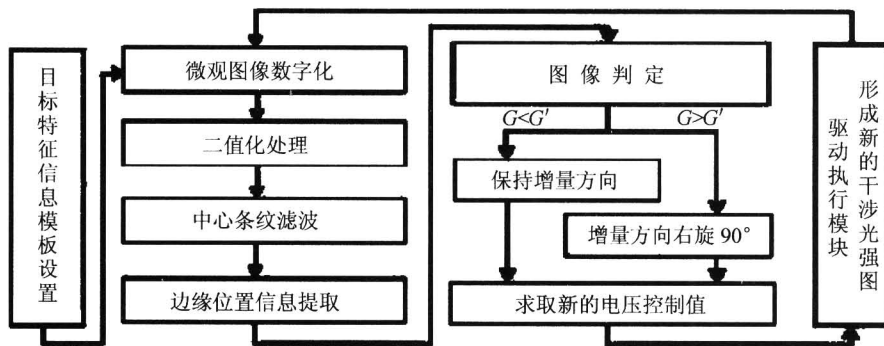


图 2 校正系统迭代闭环循环流程  
Fig. 2 Schematic of the retrieval algorithm

由图 3 可见, CCD 拍摄到的基、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<sup>[12]</sup>、中心条纹滤波、边缘位置信息提取.

刻的干涉光强图的特征信息模板.

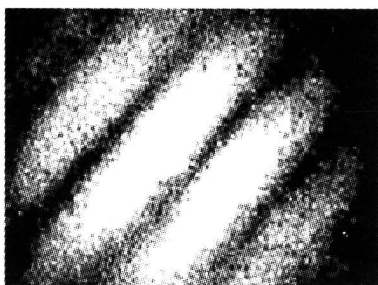


图 3 系统启动前的干涉光强图  
Fig. 3 The interferogram without the adjusting system

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 和 1)图像. 图 4 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  $x_{L_i}$  与  $x_{R_i}$ , 得两个数据组  $I_{LCUR}$  与  $I_{RCUR}$  作为当前时

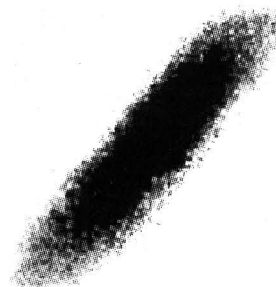


图 4 经过二值化处理和中心条纹滤波后的图像  
Fig. 4 The image of binary-conversion

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, 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与, 对应于如图 5 的二值化处

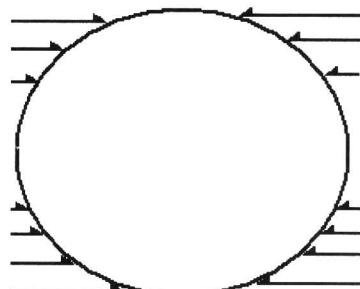


图 5 目标特征信息模板  
Fig. 5 The target template with feature preserving

理图像. 此时利用如下的误差函数进行图像判定.

$$G = \sqrt{\frac{1}{4N^2} \sum_{i=1}^N [(I_{LCUR} - I_{LTAR})^2 + (I_{RCUR} - I_{RTAR})^2]} \quad (3)$$

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  $90^\circ$ . 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  $\Delta X$  与  $\Delta Y$  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、由压电陶瓷控制、具有  $X$ 、 $Y$  正交方向两个自由度的可动摇镜驱动电路, 施加上述求得的控制电压, 以调节基频光波位相面的相对平行度, 形成一个进一步接近目标特征信息模板的干涉光强图.

### 3 实验结果

将上述实验设计光路与控制算法所建立的基、倍频光位相差自纠正系统应用于相干控制实验中. 在未加系统前, 干涉光强如图 3. 但在启动系统后的 3~5 s 内, 光强图逐渐向目标光强图(图 6)靠拢, 证明了闭环循环过程在发挥作用. 最后干涉光强图稳定在如图 6 的平衡状态. 比较图 3 与图 6 可见, 采用系统后的干涉光强图实现了预期的自调制目标. 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.

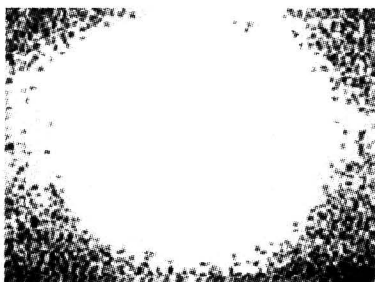


图 6 系统启用后的干涉光强图

Fig. 6 The interferogram with the adjusting system

### 4 结论

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产生的信号产生一个干涉场, 结合数字干涉仪技术诊断出基频光和其倍频光相干涉的位相差空间畸变情

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. 此稳定系统不但适用于光束为理想平面波的情况, 且能适用于光束波阵面存在位相畸变的情况, 这在位相控制方面有着广阔的应用前景和重要意义.

### 参考文献

- 1 Rabitz H, Vivie-Riedle, Motzkus M, *et al.* Whether the future of controlling Quantum Phenomena? *Science*, 2000, **288**(5): 824~828
- 2 Atanasov R, Haché A, Sipe J E, *et al.* Coherent control of photocurrent generation in bulk semiconductors. *Phys Rev Lett*, 1996, **76**(10): 1703~1706
- 3 Shou Q, Zhang H C, Liu L N, *et al.* The density matrix picture of laser coherent control current. *Science in China*, 2004, **47**(2): 231~243
- 4 Haché A, Sipe J E, Dierl H M, *et al.* Quantum interference control of electrical current in GaAs. *IEEE JQE*, 1998, **34**(7): 1144~1154
- 5 王国文. 强激光场中离子  $HD^+$  光解离的相干控制. *光子学报*, 1998, **27**(8): 673~678  
Wang G W. *Acta Photonic Sinica*, 1998, **27**(8): 673~678
- 6 Haché A, Kostoulas Y, Atanasov R, *et al.* Observation of coherently controlled photocurrent in unbiased, bulk GaAs. *Phys Rev Lett*, 1996, **78**(2): 306~309
- 7 张彬, 李强, 等. 高强度三次谐波转换对光束质量的影响. *光子学报*, 2004, **33**(5): 553~556  
Zhang B, Li Q, *et al.* *Acta Photonic Sinica*, 2004, **33**(5): 553~556
- 8 Hillery M. Fermi's golden rule and exponential decay in two-level systems. *Phys Rev A*, 1981, **24**: 933~949
- 9 Fraser J M, Dierl H M, *et al.* Quantum interference control of free-carrier density in GaAs. *Phys Rev B*, 2003, **68**(8): 085208-1~14
- 10 Sheik-Bahae M. Quantum interference control of current in semiconductors: Universal scaling and polarization effects. *Phys Rev B*, 1999, **60**(16): R11-257~260
- 11 Chudinov A N, Kapitzy Y E, Shulginov A A. Interferometric phase measurements of average field cube. *Optical and Quantum Electronics*, 1991, **23**: 1055~1060
- 12 Wang Q, Ma L. Binary-conversion of image with feature preserving. *J of Compt Aided Design and Comput Graphics*, 2000, **12**(10): 746~750

## Diagnosis and Optimization of Phase Aberrance in Optical Coherent Control

Lei Liang, Lin Chunmei, Liu Luning, Lin Weizhu

*State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Physics Science and Engineering College,  
Sun Yat-Sen (Zhongshan) University, Guangzhou 510275*

Received date: 2004-11-15

**Abstract** The principle of Quantum interference control photocurrent in bulk semiconductors using ejected photo current theory is discussed. A nonlinear interferometric method for diagnosis of phase aberrance of a laser radiation and its second harmonic is described. A scheme of the auto-control system to stabilize the phases of two relative ultrashort laser pulses is presented, playing a key role in the coherent control photocurrent experiments. The experiment result is given to prove the validity of the system, which is fitted either in coherent control or phase aberrance adjusting surrounding.

**Keywords** Coherent control photocurrent; Phase aberrance; Second harmonic generation; Femtosecond pulse



**Lei Liang** was born in September 1979 in GuangZhou City of Guangdong Province. He received his Bachelor Degree from the Department of Physics, Sun Yat-sen (Zhongshan) University in 2002. He is now working for his doctor degree in the State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technology of Sun Yat-sen (Zhongshan) University. His research interests are ultrafast optics including phase retrieve, pulses characterizing and coherent controlling.