

文章编号: 0258-7025(2010)07-1713-04

基于液晶光调制器的激光相干合成主动相位控制

黄智蒙 骆永全 张大勇 刘海涛

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 在激光器阵列的相干合成技术中, 并联主振荡功率放大器(MOPA)方案最关键的技术是对相干合成中的光路进行相位探测与控制。采用外差法, 通过实时探测和校正光路中相位的变化, 能够确保输出光束相位一致。相位调制器采用液晶相位调制器, 主振荡激光器的波长为 532 nm, 输出功率 0~6 W 连续可调。外差法系统的移频量为 40 MHz, 相位控制精度优于 $\lambda/7$ 。在闭环控制过程中, 液晶相位控制器较好地实现了信号光路的相位控制。

关键词 相干光学; 相位探测与控制; 外差法; 液晶相位调制器

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103707.1713

Active Phase Control in Laser Coherent Combination Based on Liquid Crystal Optical Modulator

Huang Zhimeng Luo Yongquan Zhang Dayong Liu Haitao

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract In laser coherent combination, phase detection and control are most critical to master oscillator power amplifier (MOPA). Using heterodyne method, consistence of output beam phase can be ensured through real-time detection and correction of optical phase. The modulator is a liquid crystal optical phase modulator, the wavelength of the main oscillation laser is 532 nm, and the output power of laser can be adjusted continuously from 0 to 6 W. The shifted frequency of the heterodyne system is 40 MHz, and the accuracy for phase control is superior to $\lambda/7$. In the process of closed-loop control, a good signal phase correction of optical path has been achieved.

Key words coherence optics; phase detection and control; heterodyne method; liquid phase modulator

1 引 言

高光束质量、高功率激光在材料处理、远程遥控监测、目标定位、工业加工等方面具有广泛的应用。由于热效应和非线性效应的限制, 单台激光器无法达到很高的输出能量或功率, 并同时保持高的光束质量。而多台激光器阵列的相干合成技术, 能够实现高功率、高光束质量激光输出, 因此成为国际上研究的热点^[1~8]。

在固体激光及光纤激光相干合成中, 并联主振荡功率放大(MOPA)方案由于其相位控制的精确性和主动性, 适用于大阵列的激光相干合成。该方案最关键的是对光路相位进行探测与控制。目前,

其相位控制方法主要有 3 种: 1) 爬山法控制速度、精度相对较低。2) 外差法, 变化频率远低于移频量的相位变化, 都可以被探测和校正, 控制精度相对较高。3) 快速傅里叶变换法(FFT), 算法复杂, 并且能量泄露易引入检相误差。因此, 外差法适用于高精度高频率相位变化检测与控制^[9,10]。实现激光相位控制的阵列及元器件主要有: 微光学元件阵列、压电陶瓷阵列、光纤与波导相位控制阵列和液晶相位控制阵列。液晶相位控制阵列相比其他几种光学相控阵驱动电压较低, 可编程实时控制, 能够实现高性能的波束控制和优良的操作灵活性, 另外体积、重量、功耗和占用空间能得到明显改善, 是重要的技术创

收稿日期: 2009-09-27; 收到修改稿日期: 2009-12-06

基金项目: 中国工程物理研究院重点基金(2007A01003)资助课题。

作者简介: 黄智蒙(1982—), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事激光相干合成与强激光效应等方面的研究。

E-mail: huangzhimeng@yahoo.com.cn

新。2004年美国雷声公司开发出“自适应光相控阵锁定单元”(APPLE)的激光束控制技术,利用液晶阵列控制激光器,实现了高功率激光束的全电组合^[11]。2008年哈尔滨工业大学利用BNS公司的液晶空间光调制器产品制作了含1024个控制电极的液晶光学相控阵器件,由现场可编程门阵列(FPGA)对电极驱动电压进行可编程控制^[12]。另外电子科技大学等也开展了相关领域的研究。

本文利用液晶空间相位调制器可编程实时控制,低电压可获得较大的相位变化等特点,通过外差法,实时探测和控制光路中相位的变化,确保输出光束的相位一致。实验系统中主振荡激光器的波长为532 nm,输出功率0~6 W连续可调。外差法系统的移频量为40 MHz,精度优于 $\lambda/7$ 。在闭环控制过程中,液晶相位控制器较好地实现了对光束大范围的相位调节与控制。

2 实验装置及原理

图1为相位检测与控制光路,实验用相干公司的532 nm Verdi-V6激光器作为主光源,其发出的激光经过透射率 $T=50\%$ 的 M_1 镜分为两路。一路经过声光移频器形成1级衍射光,经过全反镜 M_3 到达 M_4 ,作为参考光。另一路经过全反镜 M_2 ,液晶相位调制器到达耦合输出镜 M_4 ,作为信号光。 M_4 的 $T=50\%$,两路光在此处合束,形成的光拍信号被光电二极管探测接收。AOM为声光调制器,光电二极管为中国电子科技集团公司44所GT102管,响应时间为5 ns。液晶相位调制器厚度 $d=10\ \mu\text{m}$,调相范围1.5~17.2 rad,驱动信号为500 Hz,0~10 V的交流电。

光电探测器上两光波的电矢量分别为

$$\mathbf{E}_1(t) = \mathbf{A}_1 \exp[j(\omega t + \phi_1)], \quad (1)$$

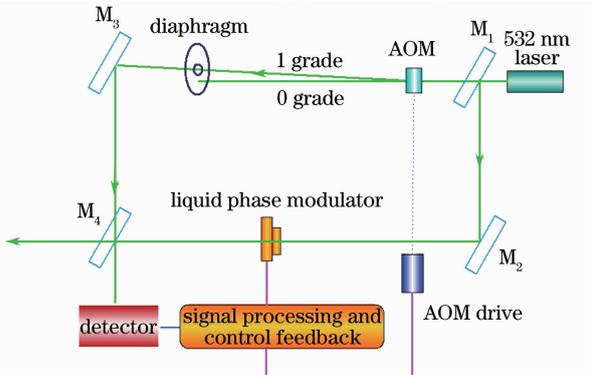


图1 相位检测与控制光路

Fig. 1 Phase detection and control of optical path

$$\mathbf{E}_2(t) = \mathbf{A}_2 \exp\{j[(\omega + \Delta\omega)t + \phi_2]\}, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{A}_1, \omega, \phi_1$ 和 $\mathbf{A}_2, \omega + \Delta\omega, \phi_2$ 分别为两束光的振幅、频率和初相位,在光电探测器上两束光叠加后的合成光波电矢量为

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{A}_1 \exp[j(\omega t + \phi_1)] + \mathbf{A}_2 \exp\{j[(\omega + \Delta\omega)t + \phi_2]\}, \quad (3)$$

两束光合成强度(拍频信号)为

$$I = I_1 + I_2 + 2\cos[\Delta\omega t + (\phi_2 - \phi_1)], \quad (4)$$

式中 $\phi_2 - \phi_1$ 反映了两束光的相位差。

将声光移频器输出的参考信号整形、分频之后作为时钟脉冲,对外差法探测的拍频信号也做整形和分频,再对两者作异或处理,得到一新的脉冲序列,当信号臂上的相位发生变化时,该脉冲序列的占空比也将周期性地发生变化,而且和两臂相位差成线性关系,将异或之后的脉冲序列送入一低通滤波器得到一直流电压信号,该直流电压信号和脉冲序列的占空比成正比关系。闭环工作时,将此直流电压信号和设定的静态工作点相比较得到一补偿电压,送入相位调制器,从而将两臂相位差控制在设定的静态工作点上,达到锁相的目的。

图2为液晶加电偏转示意图。液晶在介电常数、折射率及电导率等各方面具有各向异性的特点。将液晶注入两层氧化铟锡(ITO)透明电极的玻璃基片之间,就形成了液晶光调制器。对液晶光调制器的两层透明电极之间施加电场后,液晶分子会发生旋转,从而改变液晶分子对入射光的折射率。

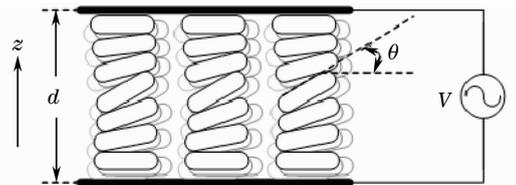


图2 液晶加电偏转示意图

Fig. 2 Schematic diagram of liquid crystal display power-deflection

假设以分子中心为圆心,液晶分子旋转角度为 θ ,则该液晶对入射光的折射率为

$$n(\theta) = \frac{n_o n_e}{(n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta)}, \quad (5)$$

若该液晶材料厚度为 d ,入射光穿过该液晶所对应的相位延迟为^[13~15]

$$\Delta\phi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \int_0^d n(\theta) dz. \quad (6)$$

在液晶光调制器上加载不同大小的电压 V ,液晶光调制器内部的液晶分子轴的排列方式就会不

同,入射光产生的相位延迟 $\Delta\phi$ 也不同。这种电压 V 与相位延迟 $\Delta\phi$ 的关系可以用 $V-\Delta\phi$ 曲线描述, $V-\Delta\phi$ 曲线称为液晶特性曲线。

如图 3 所示,利用 AT3010 信号发生器对液晶施加 500 Hz 交流电压,可得出相位延迟随电压变化关系,液晶相位变化范围大(1.5~17.2 rad),电压阈值为 0.6 V,在 0.6~4 V 之间,相位变化曲线在 $5\pi\sim 3\pi$ 范围内随电压下降较快,且连续变化,适用于相位型液晶光调制器。

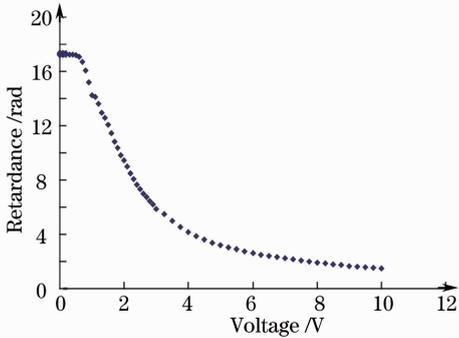


图 3 相位延迟随电压变化的关系

Fig. 3 Curves of phase retardance versus voltage

3 实验结果与分析

利用液晶分子的电控双折射效应^[16,17]可以改变入射激光偏振态或相位。旋转液晶相位调制器到一定的角度,使得加电压时,激光的垂直线偏振态基本保持不变,但是相位发生变化。图 4 为入射垂直线偏光偏振态随电压的变化关系。

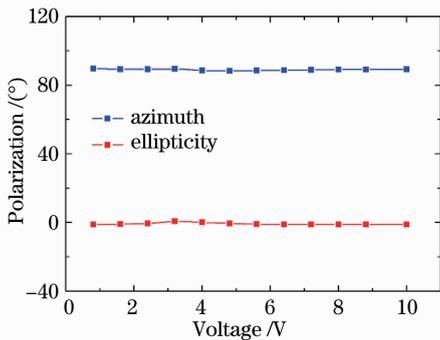


图 4 偏振态随电压的变化曲线

Fig. 4 Curves of polarization versus voltage

从图 4 可以看出,方位角在 $88.3^\circ\sim 89.9^\circ$ 的范围内变化,平均值为 89.070° ,椭圆度在 $-1.106^\circ\sim -0.824^\circ$ 的范围内变化,平均值为 -0.684° ,激光的垂直线偏振态基本保持不变。

图 5 为 40 MHz 的拍频信号,包含了信号光的相位信息,初相位为 $\phi_2 - \phi_1$,从而转换成适合于检测的中频信号。光电探测器输出的信号实际上就是外

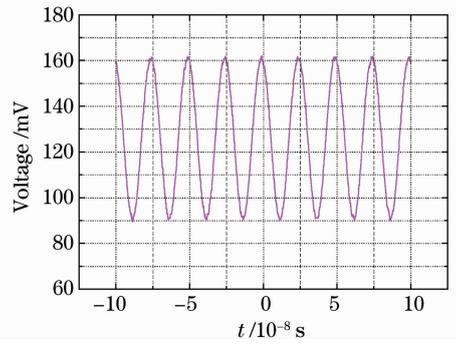


图 5 40 MHz 的外差信号

Fig. 5 40 MHz heterodyne signals

差信号电流,反映了两束光的相位差。

将光电探测器接收到的 40 MHz 光拍信号与移频器驱动源的信号接入高速相位检测与控制电路,得到开环时系统的相位变化,如图 6 所示。

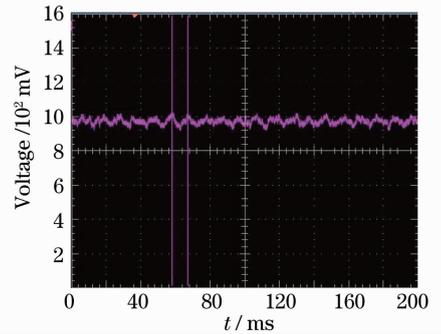


图 6 检测与控制电路检测到的系统开环相位变化

Fig. 6 Phase change in open-loop detected by detecting and control circuit

根据液晶相位控制器的相位电压变化关系,得到闭环时的补偿信号,并送给液晶相位调制器。图 7 为 500 Hz 的交流信号图,其幅值大小变化对应于液晶相位特性曲线上的相位差变化。从而使整个系统的相位锁定在预先设定的静态工作点上,实现锁相闭环控制,如图 8 所示。

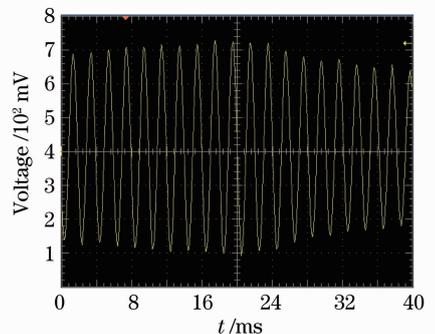


图 7 加在液晶相位调制器上的补偿电压

Fig. 7 Compensating voltage added to the liquid crystal phase modulator

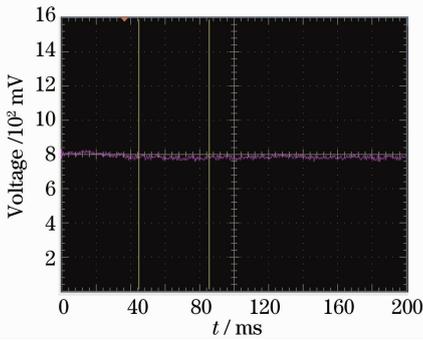


图 8 系统波前相位被锁定在一设定的静态工作点

Fig. 8 Phase for wavefront locked at a static work point

4 结 论

针对激光器相干合成相位控制的要求,设计了一套高速相位检测与控制电路。采用外差法并利用液晶相位调制器,对高功率激光器阵列中每一路信号光波的相位进行实时探测与控制,从而使各路相位都被稳定在同一设定的静态工作点上。从实验上实现了参考光与信号光稳定的闭环锁相控制。因此,此方案的设计用于相干合成技术研究是可行的。

参 考 文 献

- 1 S. J. Agust, T. Y. Fan, A. Sanchez. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(5): 474~476
- 2 J. Hou, R. Xiao, Z. F. Jiang *et al.*. Coherent beam combination of two polarization maintaining ytterbium fiber amplifiers [J]. *Chinese Phys. Lett.*, 2005, **22**(9): 2273~2275
- 3 A. Sevia, O. Andrusyak, I. Ciapurin *et al.*. Efficient power scaling of laser radiation by spectral beam combining [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4): 354~356
- 4 J. Anderegg, S. Brosnan, E. Cheung *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays [C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020U
- 5 Liu Zejin, Hou Jing, Xu Xiaojun *et al.*. Research progress of laser beam combining. [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2773~2779
刘泽金, 侯 静, 许晓军 等. 激光相干合成的研究进展 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2773~2779
- 6 Liu Zejin, Zhou Pu, Hou Jing *et al.*. Research of coherent beam combining using actively phase-controlling [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 518~524

- 刘泽金, 周 朴, 侯 静 等. 主动相位控制光纤激光相干合成的研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 518~524
- 7 Li Jianfeng, Duan Kailiang, Wang Jianming *et al.*. Experiment of coherence-locking of two photonic crystal fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 923~926
李剑峰, 段开棕, 王建明 等. 两光子晶体光纤激光器相干锁定的实验研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 923~926
- 8 Qu Ronghui, Ye Qing, Dong Zuoren *et al.*. Progress of optical phased array technology based on electro-optic material [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1861~1867
瞿荣辉, 叶 青, 董作人 等. 基于电光材料的光学相控阵技术研究进展 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1861~1867
- 9 Hou Jing, Xiao Rui, Liu Zejin *et al.*. Two methods to realize phase controlling of ytterbium fiber amplifiers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(11): 1779~1782
侯 静, 肖 瑞, 刘泽金 等. 两种方法实现对掺镱光纤放大器的相位校正 [J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(11): 1779~1782
- 10 Qian Kemao. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(13): 2695~2702
- 11 J. Harriman, S. Serati, J. Stockley. Comparison of transmissive and reflective spatial light [C]. *SPIE*, 2005, **5930**: 59302D
- 12 Zhang Jian, Xu Lin, Wu Liying. Programmable beam steering based on liquid crystal optical phased array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1497~1502
张 健, 徐 林, 吴丽莹. 液晶光学相控阵可编程光束偏转研究 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(8): 1497~1502
- 13 Liu Yongjun, Hu Lifa, Cao Zhaoliang *et al.*. A novel liquid crystal phase modulator for the optical imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 527~530
刘永军, 胡立发, 曹召良 等. 一种用于光学成像系统的新型液晶相位调制器 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 527~530
- 14 Liu Yongjun, Xuan Li, Hu Lifa *et al.*. Investigation on the liquid crystal spatial light modulator with high precision and pure-phase [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1682~1686
刘永军, 宣 丽, 胡立发 等. 高精度纯相位液晶空间光调制器的研究 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1682~1686
- 15 Yun Maojin, Li Guohua, Wang Ning. Study of tunable liquid crystal filter by voltage [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1119~1122
云茂金, 李国华, 王 宁. 电压调谐液晶滤光片的研究 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1119~1122
- 16 Wang Wei, Li Guohua, Xue Dong. A study of voltage-dependent electric-control birefringence of liquid crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 970~972
王 伟, 李国华, 薛 冬. 液晶电控双折射率与电压关系的研究 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 970~972
- 17 Li Dahai, Chen Huaixin, Chen Zhenpei. Utilizing LCTV's modulation characteristics to compensate distorted wavefront [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7): 614~618
李大海, 陈怀新, 陈祯培. 利用液晶电视的相位调制特性补偿畸变波前 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(7): 614~618