

光纤激光器阵列相干合成中的位相探测 与校正方法研究

肖 瑞[†] 侯 静 姜宗福

(国防科技大学光电科学与工程学院,长沙 410073)

(2005 年 5 月 17 日收到,2005 年 6 月 10 日收到修改稿)

介绍一高速的位相检测与控制方法,可以对高功率光纤激光器阵列中每一路信号光波的位相进行实时探测与控制,从而使整个系统达到锁相输出的目的.以一路信号光为例,给出该方法的实验研究结果,从中可以看出,闭环控制的结果,可以将该信号光的位相稳定在一设定的静态工作点上.

关键词:光纤激光器阵列,锁相,外差探测

PACC: 4225K, 4281P, 4285F

1. 引 言

近年来,随着高功率半导体激光器抽运技术和双包层光纤制作工艺的发展,光纤激光器的输出功率逐步提高,目前采用单根光纤,已经实现了千瓦量级的激光输出.而且,同其他高功率激光系统相比,双包层光纤激光器在体积、效率、重量、亮度和照射面积等方面均有显著的优势,从而使其在军事、国防等领域极具吸引力.然而,由于受到掺杂光纤的非线性效应,光学损伤及热损伤等物理机理的限制,要想大幅度地提高单个激光器的功率是相当困难的.为了在提高总的激光功率的同时,保持光纤激光良好的光束质量,发展提出了高功率光纤激光的相干组束技术^[1,2].目前,高功率光纤激光的相干合成技术已经为国际上研究的热点^[3].

光纤激光器阵列相干合成技术的基本原理就是对许多中等功率的激光器施行一定的相干控制,从而得到高功率的、光束质量接近衍射极限的单模激光输出.它的核心就是要控制激光器的位相,从而使输出光场相干.图 1 是采用并联主振荡-功率放大(MOPA)的实验方案,对光纤激光器阵列相干合成技术进行探索研究的实验示意图.

方案中主振荡器的激光被分为三束进行放大,其中另引出一路作为参考光波,为了对系统的输出光束进行波前控制,需要对每一路光纤放大器的输出光束进行取样,探测各光纤放大器的输出光波与

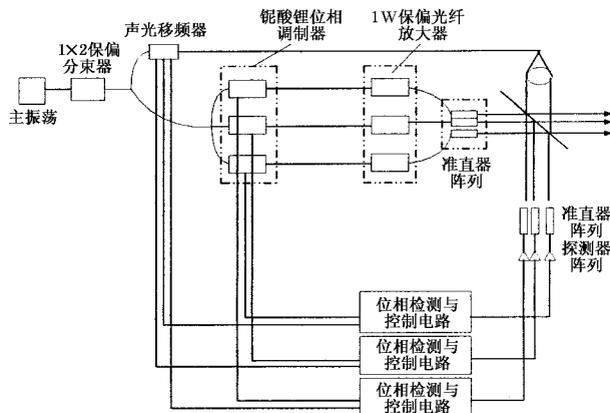


图 1 光纤激光器阵列实验结构图

参考光波的相位差,实时控制相位控制器,形成主动的闭环控制,从而使整个系统达到锁相输出的目的.然而,由于受到其速度和位相测量方面的限制,现有的波前传感器并不能用于探测和控制高功率光纤激光器阵列的波前位相,因此,有必要探讨一种新的高速相位检测与控制方法使其能够对高功率光纤激光器阵列中的每一路光波进行主动的波前取样和位相控制.

2. 实验原理

2.1. 外差法探测原理

外差探测是将待测信号光和相干的单频本地参

[†] E-mail: ruixiao203@163.com

考光同时入射到探测器上,信号光和参考光的频率不相等,从而在光电探测器的光敏面发生光学差拍, 转换成适合于检测的中频信号.

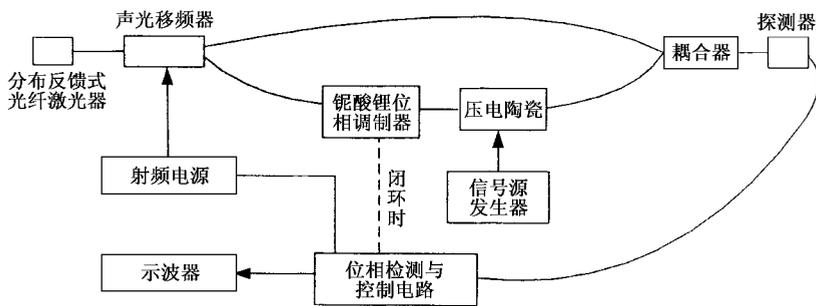


图2 外差法探测器系统原理图

图2中,DFB激光器输出的频率为 ω 的激光经声光移频器分为0级衍射和1级衍射两束光,其中,0级衍射光的频率保持不变,1级衍射光的频率偏移了 $\Delta\omega$, $\Delta\omega$ 是声光移频器的工作频率,它和射频电源的频率保持一致,大小由光路中位相变化的实际情况决定,只要比光纤中位相变化频率高的任一固定频率都是可以的.我们定义0级衍射为信号臂,1级衍射为参考臂,信号臂上的位相调制器用于实现闭环时的位相纠正.实验中为了方便起见,我们用带有主动调制的压电陶瓷代替光纤放大器.两束光经光纤耦合器后在光电探测器上实现外差探测,光电探测器上两光波的电矢量分别为

$$E_1(t) = A_1 e^{j(\omega t + \varphi_1)}, \quad (1)$$

$$E_2(t) = A_2 e^{j[(\omega + \Delta\omega)t + \varphi_2]}, \quad (2)$$

式中 A_1 、 ω 、 φ_1 和 A_2 、 $\omega + \Delta\omega$ 、 φ_2 分别为两束光的振幅、频率和初位相,在光电探测器上两束光叠加后的合成光波电矢量为

$$E(t) = A_1 e^{j(\omega t + \varphi_1)} + A_2 e^{j[(\omega + \Delta\omega)t + \varphi_2]}. \quad (3)$$

合成光强度为

$$I = E \cdot E = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \times \cos\{[(\omega + \Delta\omega) - \omega]t + (\varphi_2 - \varphi_1)\} \\ = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[\Delta\omega t + (\varphi_2 - \varphi_1)] \quad (4)$$

其中, I_1 和 I_2 为常数项,经光电探测器输出的信号实际上是由第三项形成的外差信号电流,它是频率为 $\Delta\omega$ 的正弦信号, $\varphi_2 - \varphi_1$ 反映了两束光的位相差.接下来就是要通过电路的方法检测出该相位差,并将其控制在设定的静态工作点上.

2.2. 位相解调电路原理^[4-7]

将射频电源输出的参考电信号整形、分频之后作为时钟脉冲,对外差法探测得到的拍频信号也做同样的整形及分频,之后再对两者做异或处理,得到一新的脉冲序列,当信号臂上的位相发生变化时,该脉冲序列的占空比也将周期性的发生变化,而且和

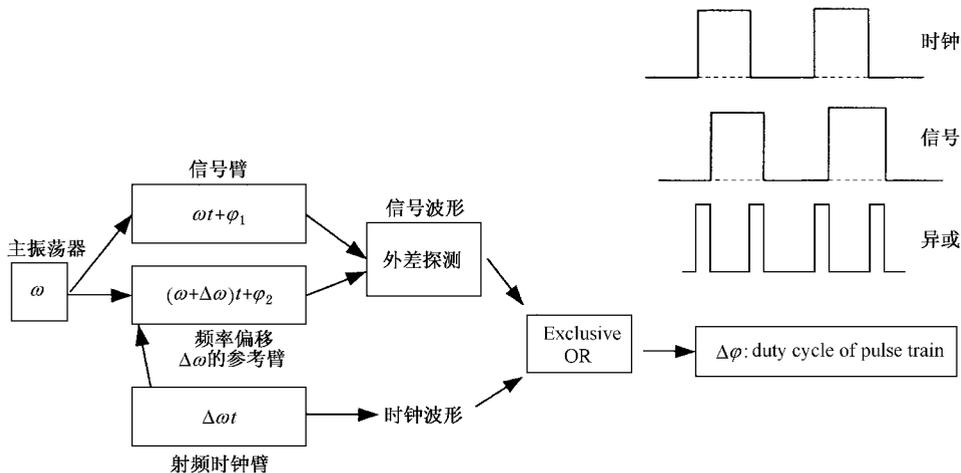


图3 位相检测与控制电路工作原理示意图

两臂的位相差成线性关系,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一设定的静态工作点相比较得到一补偿电压,送入位相调制器,从而可以将两臂的位相差控制在设定的静态工作点处.

如果有多路信号,每一路都和参考信号相比较,就可以平衡各路信号臂的位相差,使其被控制在同一静态工作点处,达到锁相的目的.

3. 实验结果

本实验中,声光移频器的频率为 40MHz,因此,任何低于 40MHz 的位相变化都可以被探测到并得到相应的补偿.探测器探测到一频率为 40MHz 的拍频信号,如图 4 所示.

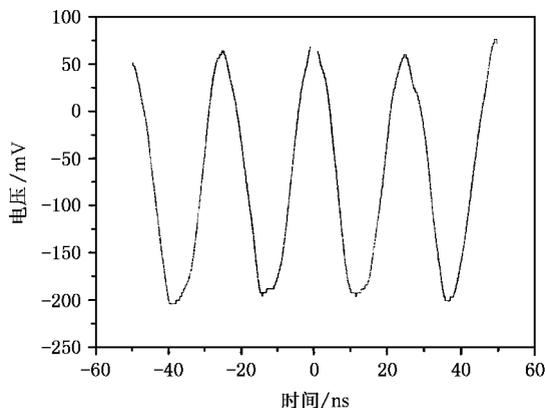


图 4 探测器探测到的 40MHz 的正弦信号

整个控制过程如下,图 2 中,用信号源发生器在压电陶瓷上加一主动的位相调制(图 5),则系统中的位相检测与控制电路可实时的检测出开环时系统

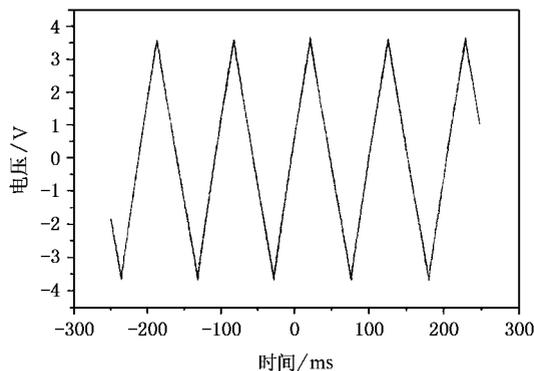


图 5 加在压电陶瓷上的调制信号

的位相变化(图 6),并得到闭环时的补偿信号(图 7).将补偿信号送给铌酸锂位相调制器,则可将整个系统的位相锁定在某一设定的静态工作点上(图 8).

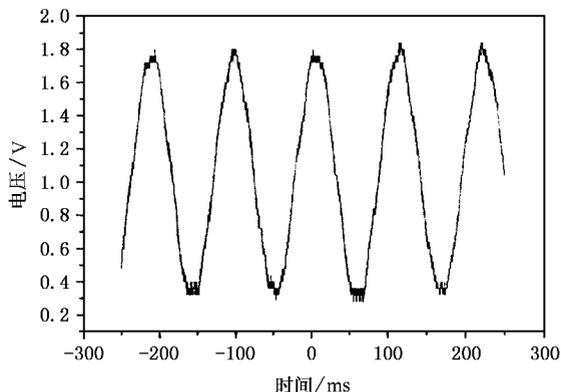


图 6 光电探测器检测到的信号臂上的位相变化

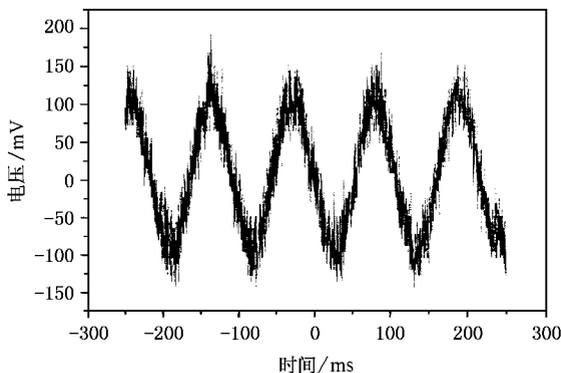


图 7 加在位相调制器上的补偿电压

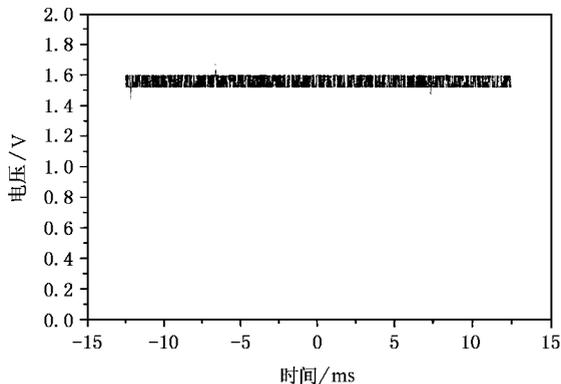


图 8 系统波前位相被锁定在一设定的静态工作点上

4. 结 论

针对高功率光纤激光器阵列相干合成技术的发展,实验设计了一高速的相位检测与控制电路,文章详细介绍了其工作原理.该高速的相位检测与控制电路可以对高功率光纤激光器阵列中每一路光波进

行独立的位相探测与锁定,实验效果理想.但是应该看到,实验中我们只是用了一路参考光波和信号光波作外差,接下来的工作,就是要将该高速相位检测与控制电路用于光纤激光器阵列的相干合成技术中,使阵列中多路信号光波同时和参考光波作外差,实验工作正在调试中.

[1] Hou Jing ,Xiao Rui ,Jiang Zongfu *et al* 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 2273

[2] Xiao Rui , Hou Jing , Jiang Zongfu *Laser technology* (employed) (in Chinese) [肖 瑞、侯 静、姜宗福 激光技术 已录用]

[3] Stephen J B ,San P ,Donald G H *et al* 2002 *U. S. Patent* 6366356

[4] Stephen J B ,San P ,Donald G H *et al* 2002 *U. S. Patent* 6229616

[5] Donald G H ,Lee O H 2000 *U. S. Patent* 6147755

[6] Donald G H ,Lee O H 2001 *U. S. Patent* 6243168

Experimental investigation of phase detection and compensation in coherent combining of fiber laser array

Xiao Rui , Hou Jing , Jiang Zong-Fu

(*Optoelectric Science and Engineering School , National Univ. of Defense Technology , Changsha 410073 , China*)

(Received 17 May 2005 ; revised manuscript received 10 June 2005)

Abstract

Recently , the coherent combining of high power fiber laser array has become a hotspot of research internationally , and the phase control electronics contributed greatly to the success of the coherent combining. A high-speed wavefront sensor is introduced to sample the wavefront and actively control the phase state of each individual optical fiber in a high average power fiber laser array , and accordingly the phase-locked output of the whole system is achieved. A single signal lightwave is taken as example in the paper , the research results are presented. We conclude from the research results that when closing the phase control feedback loop the phasefront can be locked to the quiescent state of phase.

Keywords : fiber laser array , phased-locked , heterodyne detector

PACC : 4225K , 4281P , 4285F