

三路光纤放大器相干合成技术的实验研究

肖 瑞 侯 静 姜宗福 刘 明

(国防科学技术大学光电科学与工程学院,长沙 410073)

(2006 年 4 月 14 日收到,2006 年 8 月 7 日收到修改稿)

实验上实现了三路保偏光纤放大器稳定的锁相控制,达到相干合成的输出目的.介绍了实验方案,详细阐述了相位检测与控制的方法并以一路信号光为例给出了相位噪声的测量结果.最后给出了相干合成的远场图样并对其影响因素加以简单分析.实验表明,利用提出的方案增加相干合成的路数是可行的.

关键词:光纤放大器,相干合成,锁相

PACC:4281W,4225K,4281P

1. 引 言

光纤激光器是当今光电子技术研究领域中最前沿的研究课题.特别是近年来,由于大模式面积双包层光纤的出现以及高亮度半导体二极管抽运的进展,使得光纤激光器的输出功率得到了极大的提高,单模光纤输出功率已达到 1.5 kW,就当前的光纤技术而言,理论上的输出功率可接近 10 kW^[1].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制的限制,要想大幅度地提高单个激光器的功率(万瓦级以上)是相当困难的,并且单纯提高单个激光器输出功率的费用也会非常昂贵.随着 Michelson-Vernier 干涉仪的引入,20 世纪 60 年代就有人提出在谐振腔内对激光光束叠加输出,此后人

们提出了许许多多光束叠加的方法和技术^[2-4],把多个相对小功率的激光器功率输出进行叠加,从而获得所需要的高功率、高亮度激光输出.光纤由于本身所具有的特点很容易束缚在一起,形成光纤阵列,通过对光束的精确控制,有望获得高功率相干输出.

光束的叠加有两种方式,一种是相干叠加,另一种是非相干叠加.相干叠加的最大峰值功率是单个光束峰值功率的 N^2 倍,这里 N 为叠加的光束数.而非相干叠加的最大峰值功率只是单个光束峰值功率的 N 倍.本文中,我们报道了 3 个 1 W 的光纤放大器阵列的相干合成实验.

2. 实验原理

实验装置如图 1 所示.

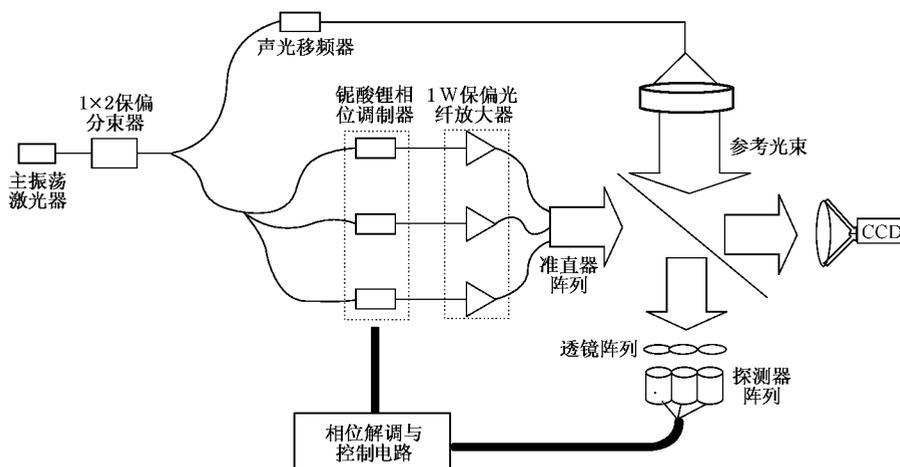


图 1 光纤放大器阵列相干合成的实验装置示意图

实验采用全保偏光路,主振荡激光器是商用的分布反馈式保偏光纤激光器,它的中心波长为 1083 nm 线宽小于 1 MHz.主振荡的光束通过保偏光纤分束器后被分为四路:一路参考臂,三路信号臂.参考臂中的光被所加的保偏光纤声光移频器频移了 40 MHz,三路信号臂中各有一个保偏光纤相位调制器以及一个输出功率为 0—1 W 连续可调的保偏光纤放大器,每一路光纤放大器的输出端各用一保偏光纤准直器对其输出进行准直.准直输出后的光束直径为 0.5 mm.为了测得每一路信号臂与参考臂的相位差,光路中加入了一分光镜,将三路保偏光纤放大器的输出光进行取样,取样所得的每一路信号光分别和参考光干涉产生一外差的拍频信号.系统中的控制电路可以实时探测每一路的相位变化,并将得到的误差电压作用于铌酸锂相位调制器,从而可以将系统中三路信号稳定于同一静态工作点上,达到相干合成的目的.相干合成的远场图样可以通过透镜后面的电荷耦合器件(CCD)来观测.

3. 闭环控制原理

系统相位探测采用的是外差法.它的基本原理是将待测信号光和相干的单频本地参考光同时入射到探测器上,信号光和参考光的频率不相同,从而在光电探测器的光敏面上发生光学差拍,转换成适合于检测的中频信号.

设光电探测器上两光波的电矢量分别为

$$E_1(t) = A_1 \exp[i(\omega t + \varphi_1)], \quad (1)$$

$$E_2(t) = A_2 \exp[i((\omega + \Delta\omega)t + \varphi_2)], \quad (2)$$

式中 A_1, ω, φ_1 和 $A_2, \omega + \Delta\omega, \varphi_2$ 分别为两束光的振幅、频率、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

$$E(t) = A_1 \exp[i(\omega t + \varphi_1)] + A_2 \exp[i((\omega + \Delta\omega)t + \varphi_2)]. \quad (3)$$

合成光强度为

$$\begin{aligned} I &= E \cdot E^* \\ &= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos\{[(\omega + \Delta\omega) - \omega]t + (\varphi_2 - \varphi_1)\} \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos[\Delta\omega t + (\varphi_2 - \varphi_1)]. \end{aligned} \quad (4)$$

式中 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, $\varphi_2 - \varphi_1$ 反映了两束光的相位差.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.

系统相位解调与控制电路的工作原理如图 2 所示.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,然后再对两者做异或处理,得到一新的脉冲序列.当信号臂上的相位发生变化时,该脉冲序列的占空比也将发生周期性的变化,而且与两臂的相位差呈线性关系.将异或处理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

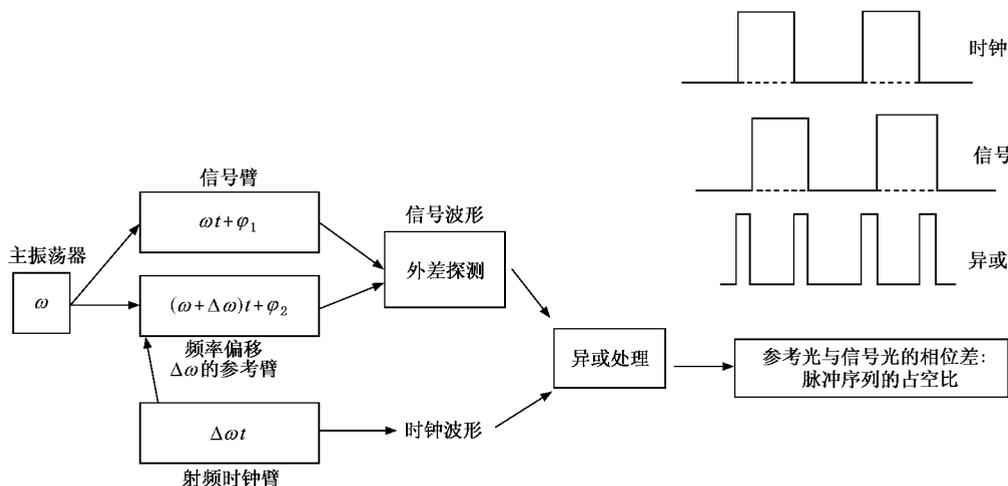


图 2 相位检测与控制电路工作原理示意图

压信号和脉冲序列的占空比成正比关系. 闭环工作时, 将此直流电压信号与一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, 从而可以将两臂的相位差控制在设定的静态工作点处.

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

值得注意的是, 相位检测与控制电路可以输出占空比与输入信号相位差成正比的脉冲信号, 这个脉冲信号的占空比与输入信号的相位差之间是一个三角波关系(如图 3 所示, M 为数字分频因子). 这

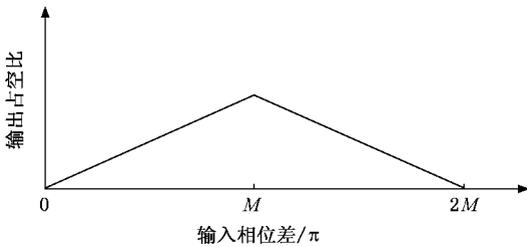


图 3 异或门输出信号的占空比与输入相位差的关系

对光纤放大器阵列的相位控制是不适用的, 因为光

纤的相位变化虽然可以超过很多波数, 但只有 2π 内的相位变化需要得到纠正, 因此任何相位纠正都应该是在 2π 的周期内进行. 这就要求输出脉冲信号的占空比与输入信号相位差之间是一种锯齿波关系(如图 4 所示). 为了实现这个目的, 我们在相位检测与控制电路中利用一个 D 触发器来判断光电转换

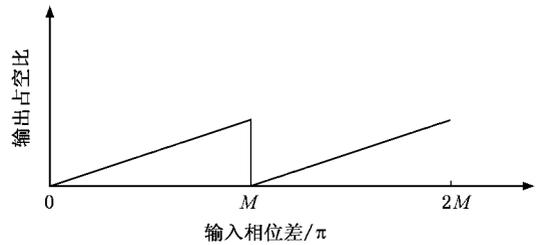


图 4 相位检测与控制电路输出信号的占空比与输入相位差的关系

信号与参考信号之间的相位超前/滞后关系(如图 5 所示, Q, \bar{Q} 分别表示输出端的状态). 根据超前/滞后关系决定直接输出异或后的信号还是对其反相后再进行输出, 这样就可以保证相位检测与控制电路的相位响应是在 2π 的周期内.

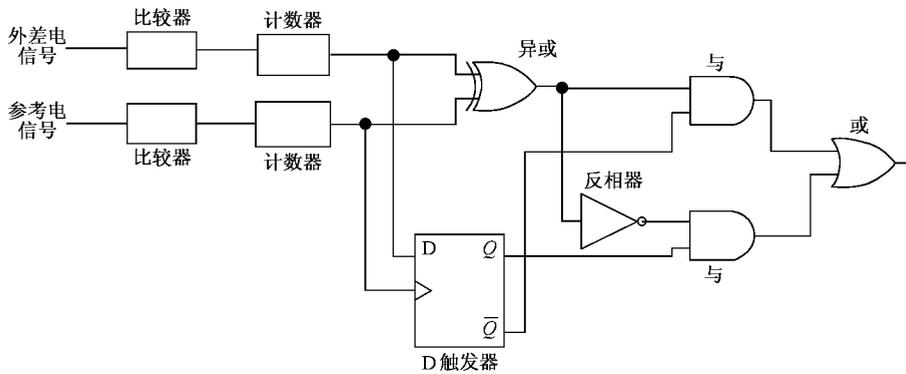


图 5 相位检测与控制电路

4. 实验结果及分析

在光纤放大器阵列的相干合成技术中, 对系统相位噪声的成功探测与解调是整个锁相系统中最为关键的部分之一, 它直接决定着相干合成的成败与否. 产生相位噪声的机制非常复杂. 总而言之, 光纤放大器的热效应是相位噪声的主要来源, 热效应主要导致光纤折射率变化, 也会引起光纤长度的变化,

从而导致相位的随机变化. 图 6 是光纤放大器处于稳态时, 取一路信号, 测量得到开环时该路信号的相位变化情况(断开处是示波器显示的原因, 与相位变化本身无关). 从图 6 可以看出, 光纤放大器稳态工作时, 系统相位变化相当缓慢. 在实验过程中, 我们不断增加光纤放大器的输出功率, 相位变化的频率成分会逐渐丰富, 高频相位噪声的幅值将增强, 但只要相位变化的频率处于我们的相位检测与控制电路的工作带宽之内, 我们就可以

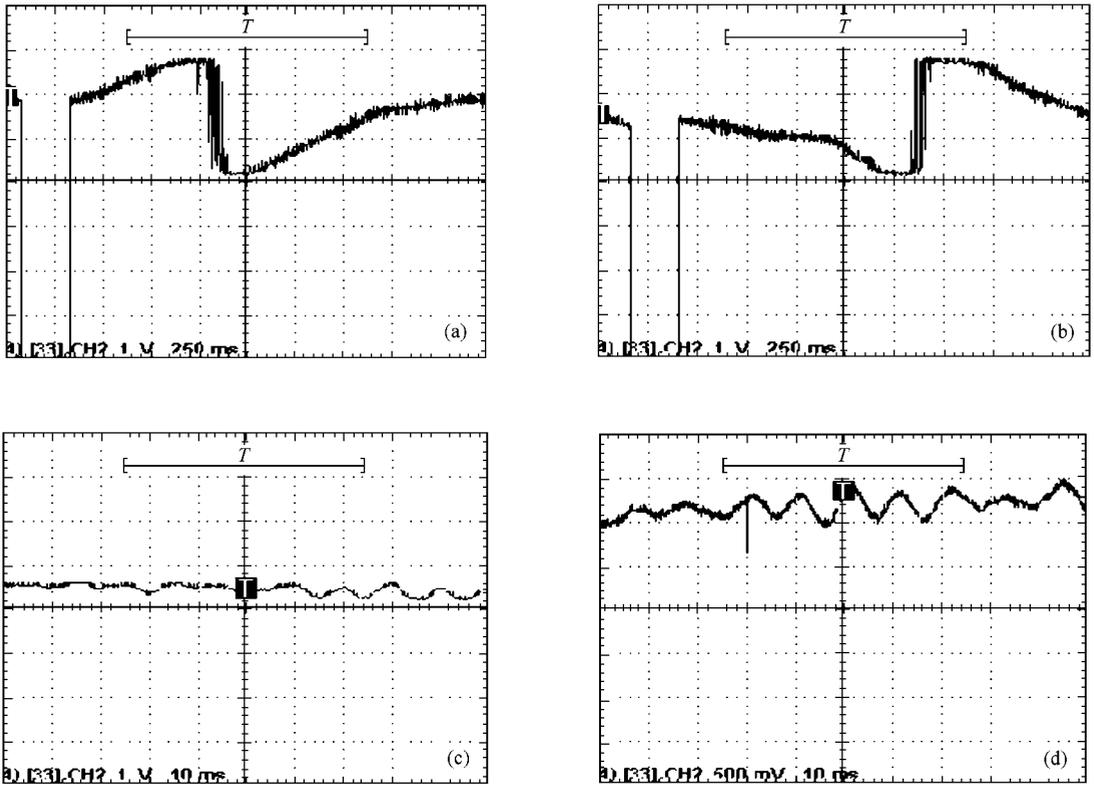


图 6 不同时刻单路信号臂的相位变化 (a)和(b)是示波器的分辨率为每格 250 ms 时测得的相位噪声变化 (c)和(d)是示波器的分辨率为每格 10 ms 时测得的相位噪声变化细节

将其探测并解调出来. 相位探测精度大约可以达到 $\lambda/1000$, 闭环工作的相位控制误差可以达到 $\lambda/20$.

图 7、图 8 分别是实验采得的系统相干、非相干合成时的远场分布图. 系统从开环到闭环的时间延迟仅为毫秒量级, 而且系统相干合成的长期稳定性相当好.

图 9 是三路光纤放大器相干合成时远场图样的



图 7 三路相干合成时长期曝光远场图样

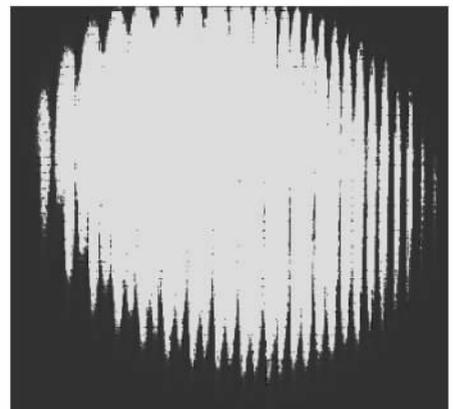


图 8 三路非相干合成时长期曝光远场图样

切向剖视图. 实验中光纤准直器的准直光束直径为 0.5 mm, 它们的中心间距为 4 mm(图 10). 利用公式

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

可得出远场条纹可见度为 0.7. 这里 I_{\max} 和 I_{\min} 分别是远场干涉中心亮条纹的相邻光强极大值和极小值.

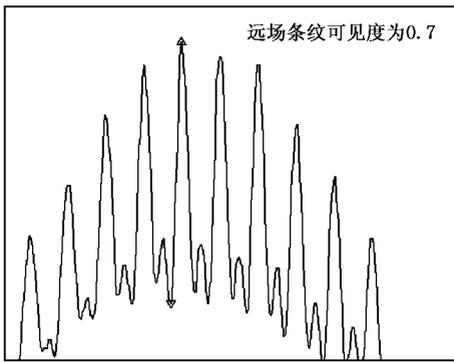


图9 三路相干合成时远场图样切向剖视图

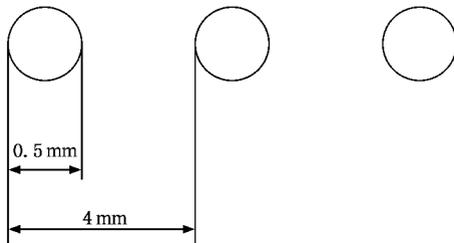


图10 三路输出光光束尺寸示意图

应该说明的是,光纤激光器的相干合成除了要求控制各路相位尽可能一致之外,它的远场特性还将受到占空比、偏振、振幅等因素的制约.对于这些问题,作者将另文讨论.

5. 结 论

本文针对光纤放大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.利用该电路可以对高功率光纤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,从而使各路的相位都被稳定在同一设定的静态工作点上.从实验上实现了三路光纤放大器稳定的闭环控制,达到相干合成的输出目的,且相干合成的长期稳定性相当好.相位检测与控制的方法也可以用于研究大功率的光纤放大器的相位探测与控制.而且,在光纤放大器阵列的相干合成实验中,对三路信号的相位控制是独立进行的,每一路的相位变化都是相对参考信号而言,因此,增加相干合成的路数是可行的.

[1] Carter A , Samson B 2005 *Mil. Aerospace Electron.* **16** 16

[2] Xiao R , Hou J , Jiang Z F 2005 *Laser Technol.* **29** 516 (in Chinese)

[肖 瑞、侯 静、姜宗福 2005 激光技术 **29** 516]

[3] Xiao R , Hou J , Jiang Z F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 184 (in

Chinese) [肖 瑞、侯 静、姜宗福 2006 物理学报 **55** 184]

[4] Fu S G , Fan W D , Zhang Q *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4262

(in Chinese) [付圣贵、范万德、张 强等 2004 物理学报 **53**

4262]



Experimental research of coherent combining of three fiber amplifiers

Xiao Rui Hou Jing Jiang Zong-Fu Liu Ming

(School of Optoelectric Science and Engineering , National University of Defense Technology , Changsha 410073 , China)

(Received 14 April 2006 ; revised manuscript received 7 August 2006)

Abstract

Combining coherent laser beams is an important and challenging area of laser science and is now still in a state of laboratory. We have succeeded in the coherent combination of three-element fiber-laser array based on ytterbium-doped polarization-maintaining single-mode power amplifiers with good experimental results. In this paper , we introduce the experimental setup and detailedly describe the method of measurement and control of phase noise. A single signal arm is taken as example , the measured phase noise are presented. At last , we give the results of coherent combination in the far field and briefly discuss a few factors having effect on the far field properties. We conclude that the combining method can be scaled to a large number of lasers.

Keywords : fiber amplifier , coherent combining , phased-locked

PACC : 4281W , 4225K , 4281P