

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0172-05

激光相干合成中的相位与偏振态变化特性

黄智蒙 骆永全 张大勇 刘仓理

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 采用夫琅禾费衍射理论与数值模拟方法计算了光束间距、阵列占空比以及相位变化与相干合成远场光强分布之间的关系;运用外差法和液晶相位调制器,验证了激光偏振态与相位变化对相干合成光强分布的影响,并得到了光束在光纤中传输的相位变化特性。结果表明,相位的随机变化使得合成光强降低,并有本底漂移;偏振态的改变会使合成光束的条纹对比度发生较大变化;在振动、温度变化的环境中,光束相位变化的频率明显高于自然环境下的频率。

关键词 相干光学;高斯光束;光束合成;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/CJL201037s1.0172

Transformation Characteristic of Phase and Polarization in Laser Coherent Combination

Huang Zhimeng Luo Yongquan Zhang Dayong Liu Cangli

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

Abstract By Fraunhofer diffraction theory and numerical analysis method, the relation of beam separation distance, fill factor, phase change and far-field intensity distribution of laser coherent combination is calculated. The influences of transformation characteristic of phase and polarization on intensity distribution of coherent combination are studied by heterodyne method and liquid phase modulator. The characteristics of phase change for beam in fiber transmission is obtained. As a result of the random change of phase, the intensity of laser combination is reduced and the excursion of background comes forth. The contrast of fringes can be changed with the transformation of polarization. In vibrant and temperature changed environment, the frequency for phase change in beam is higher than that in natural environment.

Key words coherent optics; Gaussian beams; beam combination; 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,单台激光器无法获得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]。

光纤放大器的相位噪声主要由抽运功率的变化

引起的。抽运功率的变化将引起光纤温度的变化进而会使光纤的折射率和长度发生变化,导致信号光的相位发生变化。其中温度引起的光纤折射率的变化对相位噪声起主要作用。机械振动、声源、冷却扇、地震波等也会导致相位的随机变化。另外,光纤或固体激光介质中相位变化的同时也会伴随着偏振态的变化,从而使合成光束的相干度和峰值光强出现很大的起伏,影响系统输出功率、能量和可靠性的提高。

收稿日期: 2010-03-18; 收到修改稿日期: 2010-05-10

基金项目: 中国工程物理研究院重点基金(2009A0401024)资助课题。

作者简介: 黄智蒙(1982—),男,博士研究生,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

导师简介: 刘仓理(1962—),男,研究员,主要从事激光相干合成与强激光效应等方面的研究。E-mail: canglililiu@sohu.com

本文采用夫琅禾费衍射理论^[9~14]建立了矩形阵列高斯光束合成模型,计算了相干合成光场各参数之间的关系;实验验证了合成光束的偏振态与相位变化特性。

2 相位变化理论与数值模拟

2.1 阵列孔径的相位完全一致或有恒定的相位差

当阵列孔径的相位完全一致或有恒定的相位差时,由夫琅禾费衍射理论可以得到 3 路光纤激光合成模拟结果。图 1 是 3 路光纤激光合成模拟远场分布图。

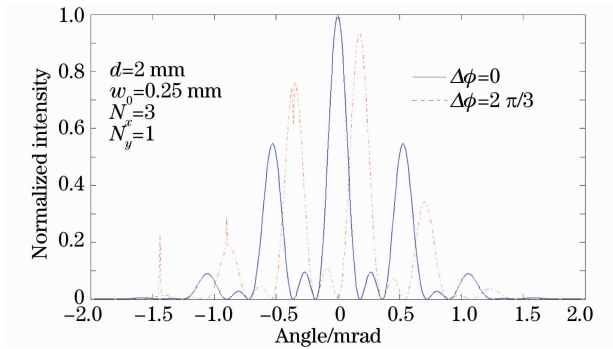


图 1 远场干涉图样

Fig. 1 Far-field interference pattern

图中为激光器各阵元间相位差 $\Delta\phi$ 取 0 和 $2\pi/3$ 两种情况时的远场干涉图样。这里只研究了一维阵列,激光器个数为 $N=3$,阵列周期为 $d=2\text{ mm}$,准直光束半径 $w_0=0.25\text{ mm}$ 。当阵列中各孔径的输出光束有恒定的相位差时,远场干涉图样的形状不会改变,仅有位置上的漂移,也即实现了光束的定向偏转。

2.2 阵列孔径的相位随机变化

阵列中各孔径的相位变化是随机的,引入相位的均方根 σ_ϕ 来表示这种变化,可得相位随机变化时,远场干涉图样的分布,如图 2 所示。

当相位的均方根 σ_ϕ 不为 0,相位随机变化时,激光器阵列平均远场光强分布的形状保持不变,但光强将会在原有基础上衰减 $\exp(-\sigma_\phi^2)$,而且光强分布还会有本底漂移。

3 偏振态变化对相位、干涉图样的影响

采用向列相液晶相位调制器对光路进行相位调制,盒厚为 $a=10\ \mu\text{m}$,双折射为 $\Delta n=0.152$ 。图 3 为实验装置图,入射激光为 532 nm 垂直线偏振光,经

过透射率 $T=50\%$ 的 M1 分为 3 路光。一路经过移频器成为参考光,另外两路为信号光。两路信号光经过输出镜 M5, M6 合成,所得的合成光斑图样由 CCD 观测。液晶相位调制器置于其中一路信号光路上,进行相位调制,改变该路光的偏振态。

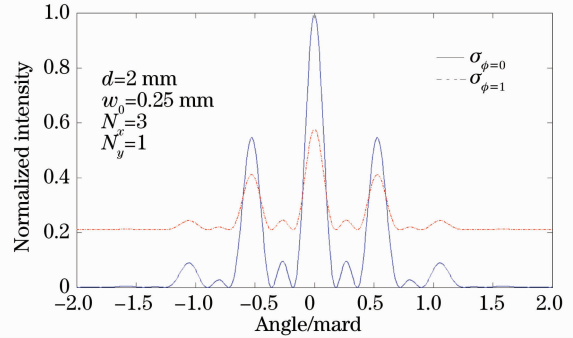


图 2 相位随机变化对远场干涉图样的影响

Fig. 2 Effects of phase change randomly on far-field

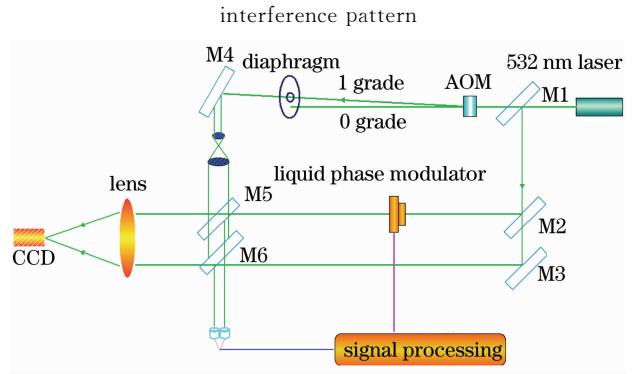


图 3 干涉光路图

Fig. 3 Schematic diagram of interference optical path

将液晶相位调制器与入射光的偏振方向成 45° 角放置,由于液晶的电控双折射效应,经过它的激光在两个感应主轴上的分量的相位差不断随电压的变化而改变,从而使得激光的偏振态不断发生周期性变化。如图 4 所示,线偏振光经过液晶相位调制器,相继变为椭圆、圆、椭圆、线偏振光状态。

图 5 为用偏振态测试仪测得的经过液晶相位调制器的激光偏振态的变化情况。可以看出,液晶所加电压为 $0\sim 5\text{ V}$ 的 500 Hz 交流控制信号时,偏振光方位角在 $-89.9^\circ\sim 90^\circ$ 之间变化,椭圆度在 $-43.7^\circ\sim 40.6^\circ$ 之间变化。

图 6 为液晶成 45° 角放置,改变其电压大小,由于液晶电控双折射作用,垂直入射的线偏振光变为椭圆、圆、线偏振光等状态,所获得的干涉条纹对比度也发生了很大变化。

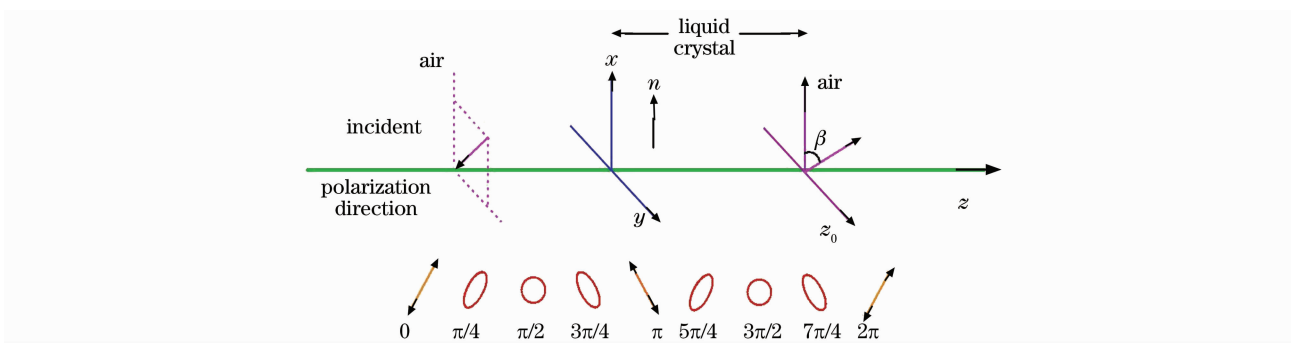


图 4 偏振光经过液晶相位调制器变化示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the change for polarization light through liquid phase modulator

4 光纤中相位变化特性

图 7 中光源为 532 nm 激光二极管抽运的 Nd³⁺:YAG 单纵模连续激光器, 该激光器的光谱线宽为 5 MHz, 使得相干长度达到几十米, 从而降低了实验中参考光束与光纤光束光程的匹配难度。种子光出射后经过透射率 $T=50\%$ 的 M1 分成两束光。一路经过光纤作为信号光, 另一路作为参考光。信号光经过 45° 全反镜后, 通过光纤耦合器, 进入 532 nm 单模光纤。因为光束从光纤出射后发散角变大, 所以用望远镜在光纤出射端将出射光准直, 并用格兰棱镜将出射光束起偏, 使从光纤出射光束的偏振态与参考光束一致, 最后用透射率 $T=50\%$ 的

分束镜 M4 使光纤光束与参考光束实现同轴、同偏振态干涉。

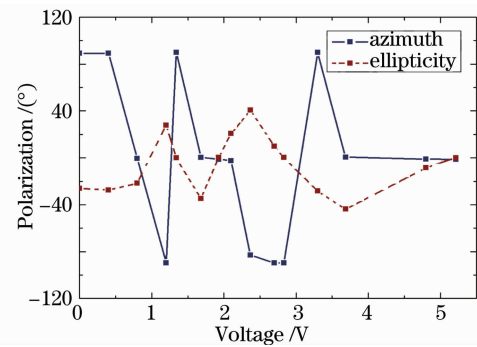


图 5 偏振态随电压变化曲线

Fig. 5 Curves of polarization versus voltage

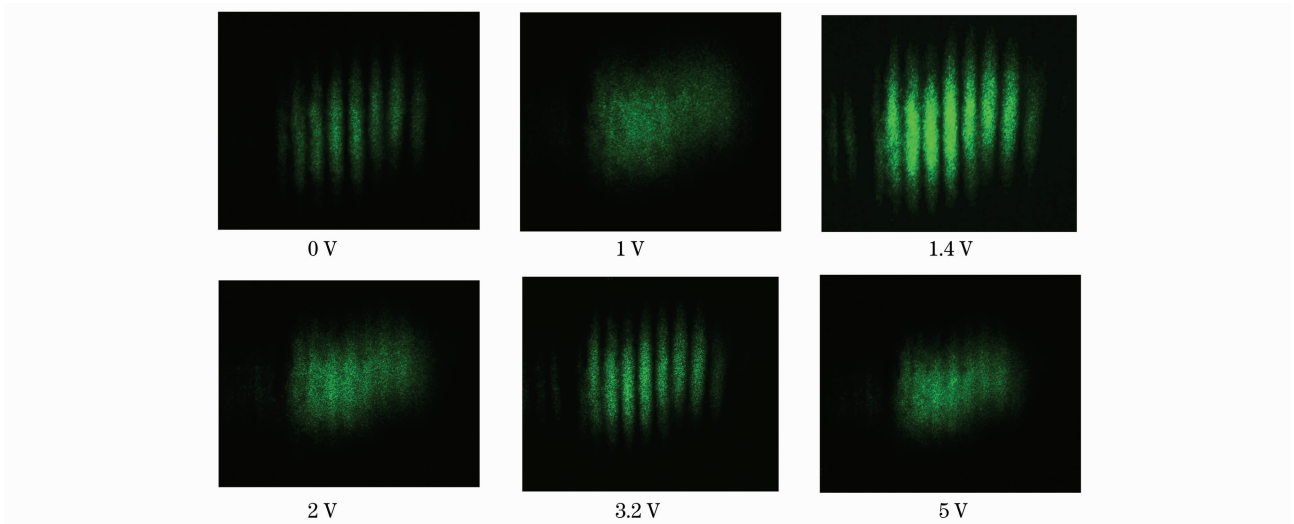


图 6 干涉条纹对比度随偏振态变化示意图

Fig. 6 Curves of interference fringe contrast versus polarization

干涉光经小孔光阑选出干涉主极大后, 由硅光电二极管探测干涉光束光强变化, 由示波器显示输出。当相位发生变化时将导致这一点的光强随之变

化, 而这一变化即反映了光纤中光束相对于参考光束的相位变化速率。这样就得到了光纤光束相对于参考光束的相位变化速率的波形图。

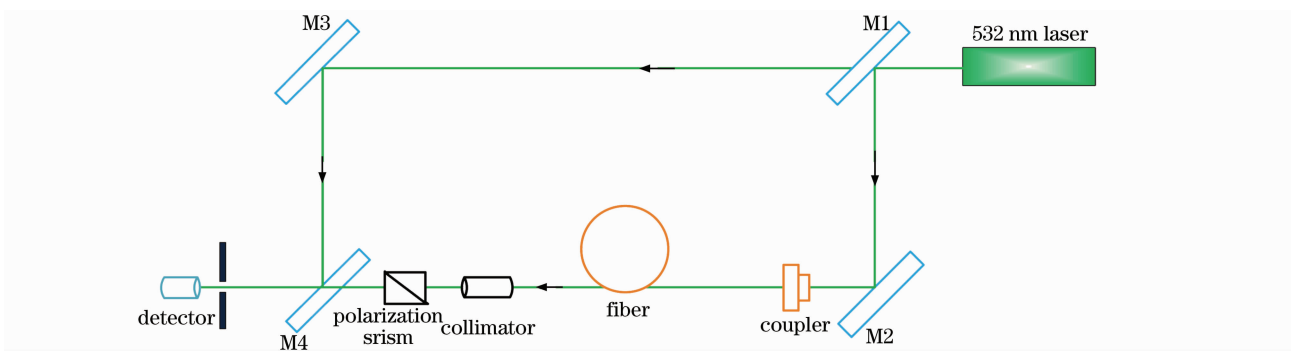


图 7 光纤光束相位变化实验装置图

Fig. 7 Schematic diagram of phase change for the beam in fiber

图 8 为在实验室环境下两路光干涉后的光强波形情况,从图中可以看出干涉光束光强有明显波动,这种波动表明了光纤中光束相对于参考光束的相位变化的情况。图中时间轴(横轴)每格为 10 ms,波形的频率集中在 100~300 Hz,波形中的毛刺是高频噪声。

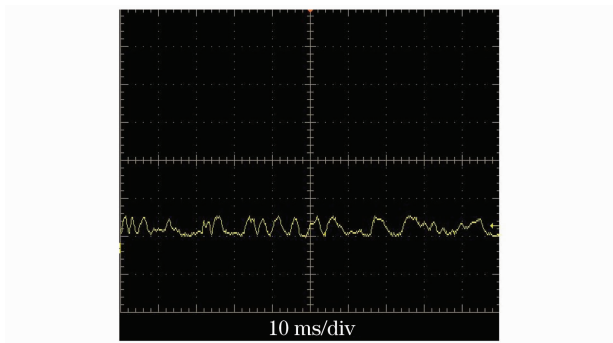


图 8 合成光束光强的波形

Fig. 8 Wave form of the intensity for combining beams

图 9~11 分别是 532 nm 单模光纤在固定压力、振动、温度变化的环境中干涉光束光强变化的波形图。从图中可以看出,在这几种环境下,单模光纤光束相位变化的频率分别在 100~300, 100~600 和 100~1000 Hz,与图 8 相比,存在固定压力的情况与实验室的环境下的波形频率基本相同;而在振动、温度变化的环境中,干涉光强波动的频率明显高于自

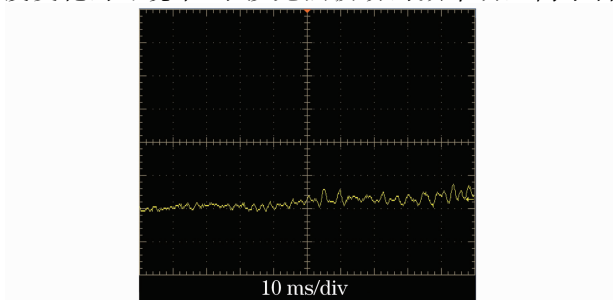


图 9 固定压力下干涉光束的光强波形

Fig. 9 Wave form of the intensity for combining beams in certain press

然实验室环境下的运动频率。

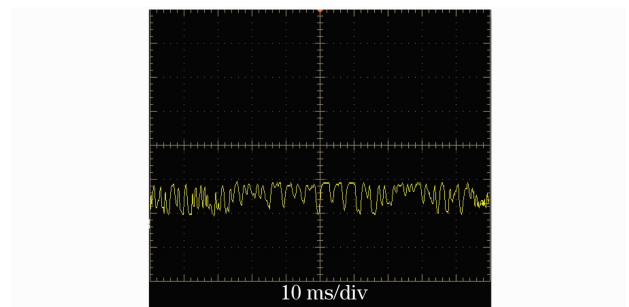


图 10 振动环境下干涉光束的光强波形

Fig. 10 Wave form of the intensity for combining beams in vibration

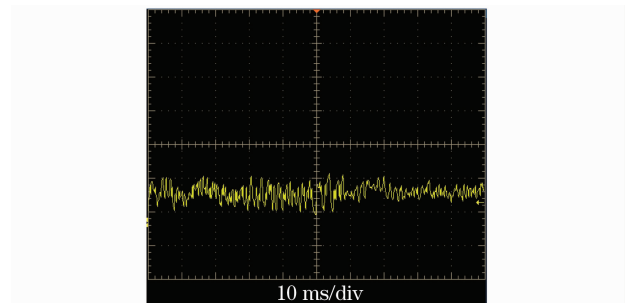


图 11 温度变化环境下干涉光束的光强波形

Fig. 11 Wave form of the intensity for combining beams in temperature changed environment

5 结 论

采用夫琅禾费衍射理论计算了光束间距、阵列占空比以及相位变化与相干合成远场光强分布之间的关系;并运用外差法得出了合成光束相位与偏振态的变化对合成远场光强分布的影响,得到了光束在光纤中传输的相位变化特性,即在振动、温度变化的环境中,干涉光强波动的频率明显高于自然实验室环境下的运动频率。结果表明上述分析和实验方法是可行的。

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. Sevian, 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 Qian Kemao. Windowed fourier transform for fringe pattern analysis [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(13): 2695~2702
- 10 J. Harriman, S. Serati, J. Stockley. Comparison of transmissive and reflective spatial light [C]. *SPIE*, 2005, **5930**: 59302D
- 11 Zhang Jian, Xu Lin, Wu Liying *et al.*. Programmable beam steering based on liquid crystal optical phased array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1497~1502
张 健, 徐 林, 吴丽莹等. 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
- 12 Zhou Pu, Ma Yanxing, Wang Xiaolin *et al.*. Experimental study on linewidth requirement for coherent beam combination of fiber amplifiers in MOPA configuration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2027~2031
周 朴, 马阎星, 王小林等. 主振荡功率放大器结构光纤激光相干合成系统对谱线需求的实验研究 [J]. 光学学报, 2010, **30**(7): 2027~2031
- 13 Huang Zhimeng, Luo Yongquan, Zhang Dayong *et al.*. Active phase control in laser coherent combination based on liquid crystal optical modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1713~1716
黄智蒙, 骆永全, 张大勇等. 基于液晶光调制器的激光相干合成主动相位控制 [J]. 中国激光, 2010, **37**(7): 1713~1716
- 14 Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin *et al.*. Mutual-injection phase-locking fiber laser with corner-cube cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 77~81
程 勇, 刘 洋, 许立新等. 角锥腔互注入锁相光纤激光器 [J]. 中国激光, 2009, **36**(1): 77~81