

文章编号: 1001-3806(2009)02-0187-04

## 相干组束光纤激光干涉图样分布研究

亓红群<sup>1,2</sup>, 段开棕<sup>2\*</sup>, 蒲继雄<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 电子科学与技术系, 泉州 362021; 2. 中国科学院 西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

**摘要:** 为了研究两相干组束光纤激光的干涉图样的分布特征, 采用数值计算和实验相结合的方法, 对干涉图样进行了理论分析和实验验证, 取得了在不同光束间距及不同傅里叶透镜焦距下的干涉图样分布图。干涉图样的条纹分布和条纹可见度主要受到激光光束间距、傅里叶变换透镜焦距以及光束束腰半径等参量的影响。随着光束间距的增大, 干涉条纹间距减小, 条纹数目增多, 条纹可见度减小; 傅里叶变换透镜焦距增大时, 干涉条纹数目没有明显变化, 条纹间距略有增加, 条纹可见度增大。这一结果对相关实验工作将有一定帮助。

**关键词:** 非线性光学; 光纤激光器; 干涉条纹; 可见度; 高斯光束

**中图分类号:** O436.1 **文献标识码:** A

### Interference fringes of coherent combining fiber lasers

QI Hong-qun<sup>1,2</sup>, DUAN Kai-liang<sup>2</sup>, PU Ji-xiong<sup>1</sup>

(1. Department of Electronic Science & Technology, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China; 2. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** In order to study the characteristics of the interference patterns of two coherently combined fiber lasers, experimental and numerical computing method was used. Based on the theory and experiments the interferent fringes of coherent combining of fiber lasers were obtained. It is shown that the interference strips are mainly affected by the beam separation, focal length of Fourier transform lens and beam waist, etc. With increasing beam separation, the number of interference fringes increases and the fringe separation and visibility decrease. When the focal length of Fourier transform lens increases the fringe separation and number of fringes do not change obviously, but the visibility increases. This work will be useful for relative experiments.

**Key words:** nonlinear optics; fiber lasers; interference fringes; visibility; Gaussian beam

### 引言

光纤激光器与传统的固体激光器相比, 具有光束质量好、体积小、重量轻、转换效率高、散热效果好等优点, 随着高功率半导体激光器抽运技术和双包层光纤制作技术的发展, 光纤激光器的输出功率不断提高, 目前单根光纤激光器的输出功率已经超过千瓦的水平<sup>[1]</sup>, 尤其是近年来发展的光子晶体光纤激光器, 输出功率已达到2kW的水平<sup>[2-3]</sup>。但随着输出功率的不断提高, 光纤非线性效应(如受激喇曼散射和受激布里渊散射等)以及光纤的热光损伤等问题会变得越来越严重<sup>[4]</sup>, 且随着功

率的增加光束质量也变差。为了达到高功率激光输出和好的光束质量, 一种途径就是对多个光纤激光器输出的激光进行光束合成。目前研究较多的是光束的相干合成, 根据相位锁定的机理, 相干合成可分为主动锁相和被动锁相两大类。主动锁相技术的典型代表为主振荡放大系统<sup>[5]</sup>, 它要求对每路光束的相位进行检测、反馈以实现相位的控制, 技术较为复杂。被动锁相技术主要包括自傅里叶腔技术、多芯光纤的倏逝波耦合技术、全光纤耦合技术和自成像腔技术等<sup>[6-10]</sup>。

近年来利用自成像腔技术对两光纤激光器的相干合成已经进行了许多研究<sup>[11-15]</sup>, 实现了两光纤激光器的相位锁定, 并且观测到了清晰稳定的相干图样。作者对这些实验的干涉图样条纹分布及其可见度进行理论分析、解释实验结果, 并研究实验系统各参量对干涉图样的影响。研究表明, 两激光光束的间距和傅里叶变换透镜焦距是影响干涉图样的主要因素。随着激光光束间距的增大, 干涉条纹数目增多, 条纹间距和条纹可见度减小; 傅里叶变换透镜焦距的增大会使条

基金项目: 中国科学院“西部之光”人才培养计划资助项目(2006LH02); 国家自然科学基金资助项目(60537060)

作者简介: 亓红群(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事光束传输与非线性光学的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: kl.duan@163.com

收稿日期: 2008-01-28; 收到修改稿日期: 2008-03-13

纹可见度增大,条纹间距略有增加,干涉条纹数目不发生明显变化。

### 1 干涉图样条纹分布的实验结果

图 1 为两光纤激光相干合成的实验示意图。LD<sub>1</sub>

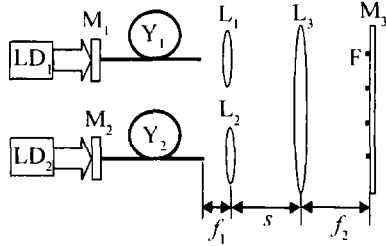


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

和 LD<sub>2</sub> 为两个半导体激光器抽运源。M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 为两个对抽运光高透、对激光高反的双色镜。Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>2</sub> 为两根掺 Yb 双包层光纤,输出激光的光纤端面垂直磨平,保证有 4% 的非涅耳反射率。L<sub>1</sub> 和 L<sub>2</sub> 为两非球面透镜,用于对光纤激光器的输出激光进行准直。L<sub>3</sub> 为傅里叶变换透镜,M<sub>3</sub> 为复合腔的耦合输出镜,位于透镜 L<sub>3</sub> 的后焦平面上,P 为观察面。当激光经过 L<sub>3</sub> 聚焦,M<sub>3</sub> 反射后,再经过 L<sub>3</sub> 准直的过程相当于两次傅里叶变换,通过此过程可实现两光纤激光的相互注入,从而可实现两光纤激光器的相位锁定。两光纤激光器相位锁定后,在透镜 L<sub>3</sub> 的后焦平面上将形成干涉条纹,通过后面的 CCD 来观察。F 为空间滤波器,用于对相干光场进行滤波。

实验结果表明<sup>[11-13]</sup>,在没有空间滤波器时,光斑的干涉条纹的对比度是很低的,并且在受到机械噪声、热噪声等环境因素影响时,光纤长度会随机无规则变化,这会引起干涉条纹的不稳定,条纹的可见度变差,甚至观测不到干涉条纹,如图 2a 所示。当在输出耦合

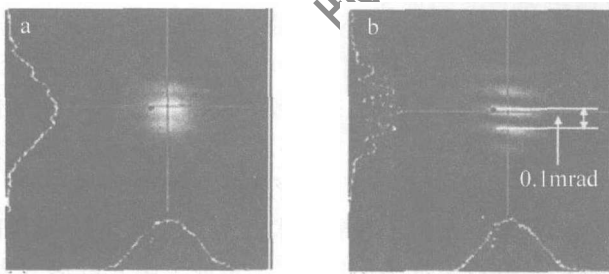


Fig. 2 Experimental beam profiles

a—without a spatial filter b—with a spatial filter

镜 M<sub>3</sub> 前合适位置放置一丝状空间滤波器时,就会观察到对比度较高的干涉条纹,如图 2b 所示,这是由于空间滤波器对异相模或同相模产生不同损耗,从而得到稳定的相干图样。

### 2 干涉图样条纹分布的理论分析

下面对实验结果进行理论分析,模拟实验观测到

的干涉图样,并进一步确定影响干涉图样条纹分布的各种参量。为简单起见,理论分析中假设两光纤激光器输出的均为基模高斯光束,且其束腰正好位于光纤端面上,那么光纤端面的出射光场  $q$  参量可表示为:

$$1/q = -i\lambda/\pi w_0^2 \quad (1)$$

式中, $\lambda$  为激光波长, $w_0$  为光束束腰半径,那么在耦合镜 M<sub>3</sub> 的输出面上,光束的  $q_1$  参量可由近轴光学 ABCD 定律求得:

$$q_1 = (Aq + B)/(Cq + D) \quad (2)$$

式中,A,B,C 和 D 分别为从光纤端面到耦合镜 M<sub>3</sub> 的 ABCD 光学矩阵矩阵元,即:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_2 & 0 \\ f_1 & -f_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $f_1$  为光纤端面到 L<sub>1</sub>,L<sub>2</sub> 的距离, $s$  为 L<sub>1</sub>,L<sub>2</sub> 到 L<sub>3</sub> 的距离, $f_2$  为 L<sub>3</sub> 的焦距。将  $q_1$  表示为如下形式:

$$1/q_1 = 1/R(z) - i\lambda/[\pi w(z)^2] \quad (4)$$

式中, $z$  为传输距离。将(3)式代入(2)式,并分离虚部和实部,对照(4)式,可求得:

$$w(z) = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} \left[ \frac{B^2 + A^2 z_0^2}{(AD - BC)z_0} \right]} \quad (5)$$

$$R(z) = (B^2 + A^2 z_0^2)/(BD + ACz_0^2) \quad (7)$$

$z_0 = \pi w_0^2/\lambda$ ,由(5)式~(6)式,可得激光在输出耦合镜 M<sub>3</sub> 面上的光场为:

$$E_1 = \frac{w_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{r_1^2}{w^2(z)}\right] \exp[-i\Phi_1(r_1, z)] \quad (7)$$

$$E_2 = \frac{w_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{r_2^2}{w^2(z)}\right] \exp[-i\Phi_2(r_2, z)] \quad (8)$$

其中,  $\Phi_1(r_1, z) = k[z + r_1^2/2R(z)] - \tan^{-1}(z/z_0)$  (9)

$$\Phi_2(r_2, z) = k[z + r_2^2/2R(z)] - \tan^{-1}(z/z_0) \quad (10)$$

式中, $r_1 = [(x - d/2)^2 + y^2]^{1/2}$ ,  $r_2 = [(x + d/2)^2 + y^2]^{1/2}$ ,  $d$  为两光束的间距, $\Phi_1, \Phi_2$  为相位, $x, y$  为某点坐标值, $k$  为波数。在输出耦合面上,总的场分布为  $E = E_1 + E_2$ 。

在实验中,由于外界环境的噪声影响,光纤长度会随机变化,因此,两光纤激光器的输出光束的相位也会随机变化。当  $\Phi_1 = \Phi_2 + 2\pi$  时, $E$  称为同相模,当  $\Phi_1 \neq \Phi_2$  时, $E' = E_1 + E_2$  称为异相模。在没有空间滤波器时,尽管两激光器实现了相位锁定,但同相模和异相模仍同时存在,同相模和异相模会产生非相干叠加,总光场强度为  $|E|^2 + |E'|^2$ ,由于位相的随机变化,就不能产生稳定的干涉条纹。图 3a 和图 3b 分别为同相模和异相模的横向光强分布,图 4a 为同相模与异相模叠加后的光斑图样,图 4b 为同相模产生的干涉光斑图样。计算中参量选取为  $\Phi_1 - \Phi_2 = \pi, f_1 = 6\text{mm}, f_2 =$

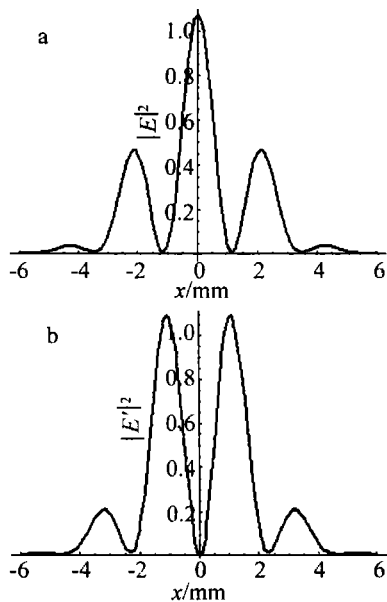


Fig. 3 a—transverse intensity of in-phase mode b—transverse intensity of out-of-phase mode

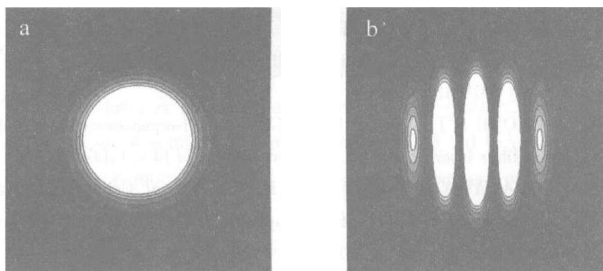


Fig. 4 a—beam profile by superposition of in-phase and out-of-phase mode b—interference pattern produced by in-phase mode

700mm,  $s = 900\text{mm}$ ,  $d = 0.8\text{mm}$ ,  $w_0 = 40\mu\text{m}$ ,  $\lambda = 1.060\mu\text{m}$ 。

由图3可以得到,同相模和异相模的干涉条纹有不同的空间分布。同相模产生5条干涉条纹,条纹间距  $\Delta x = 2.34\text{mm}$ ;异相模产生4条干涉条纹,条纹间距  $\Delta x = 1.07\text{mm}$ ,另外,同相模中心为亮纹,而异相模中心为暗纹。同相模和异相模所产生的干涉条纹亮暗空间分布对应不同的位置,这样在没有空间滤波器时,同相模与异相模干涉场叠加后,条纹可见度会大大降低,甚至不能观察到清晰的干涉条纹。若使用丝状滤波器对异相模或同相模产生不同的损耗,则可大大提高条纹的可见度。如将间距为  $\Delta x = 1.07\text{mm}$  丝状空间滤波器放置在输出耦合镜  $M_3$  前适当位置,即可以滤掉异相模,这时就可以观察到同相模所产生的干涉条纹,如图4a和图4b所示。图4a和图4b分别与图2a和图2b所示的实验结果是一致的。

下面以同相模为例进一步讨论各参量对干涉条纹分布的影响。图5为不同光束间距时的同相模干涉条纹分布情况。图5a中  $d = 0.8\text{mm}$ ,图5b中  $d = 1.4\text{mm}$ ,其它参量与图3相同。由图5可得,光束间距增大时,条纹间距减小,条纹数目增多。图5a和图5b

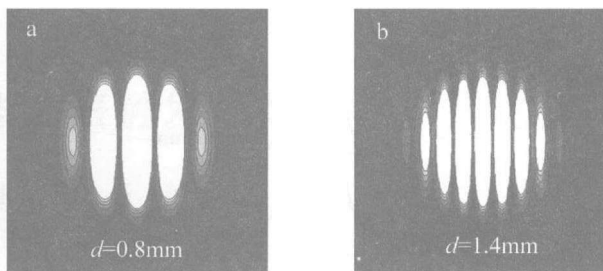


Fig. 5 Interference patterns produced by in-phase mode 中的干涉条纹间距  $\Delta x$  分别为  $2.34\text{mm}$  和  $1.33\text{mm}$ 。

图6为傅里叶变换透镜取不同焦距时同相模干涉条纹的分布情况,图6a和图6b的透镜焦距  $f_2$  分别为

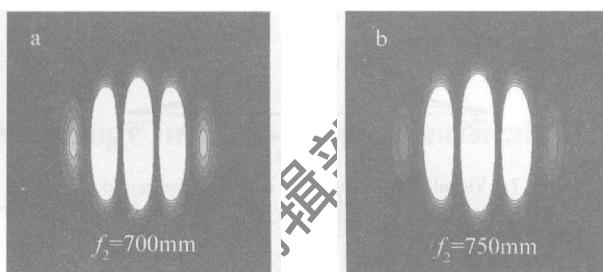


Fig. 6 Interference patterns produced by in-phase mode for different focal lengths of Fourier transform lens

700mm和750mm,其它参量与图3相同。计算可知,傅里叶变换透镜焦距增大时,条纹数目没有明显变化,只是干涉条纹间距略为增大,图6a中  $\Delta x = 2.34\text{mm}$ ,图6b中  $\Delta x = 2.75\text{mm}$ 。

根据(7)式~(10)式,同相模的光强表达式可表示为如下形式:

$$I = |E|^2 = I_0(1 + V\cos\phi) \quad (11)$$

式中,  $V$  为可见度因子:

$$V = \frac{1}{I_0} \left[ \frac{2w_0^2}{w^2(z)} \right] \exp \left[ -\frac{r_1^2 + r_2^2}{w^2(z)} \right] \quad (12)$$

$$I_0 = \frac{w_0^2}{w^2(z)} \left\{ \exp \left[ -\frac{2r_1^2 + r_2^2}{w^2(z)} \right] \right\} \quad (13)$$

$$\cos\phi = k \left[ \frac{r_2^2 - r_1^2}{R(z)} \right] \quad (14)$$

式中,  $\phi$  为相位差。图7为不同条件下同相模干涉条纹可见度的空间分布情况。图7a和图7b对应的计算参量均分别与图3中的计算参量相同。图7a中粗线和细线分别对应的光束间距  $d = 0.8\text{mm}$  和  $d = 1.4\text{mm}$ ,从图7a可以看出,光束间距变大时,条纹可见度变小;图7b中的粗线和细线分别对应的透镜焦距  $f_2 = 750\text{mm}$ ,  $f_2 = 700\text{mm}$ ,从图7b可以看出,傅里叶变换透镜焦距较大时,条纹可见度也较大。

由于实验条件的限制,仅对光束间距对干涉条纹分布图样的影响作了实验验证。实验中光束间距  $d = 0.8\text{mm}$  和  $d = 1.4\text{mm}$ ,实验结果分别如图8a和图8b所示。从图8可以看出,光束间距增大时,条纹数目增

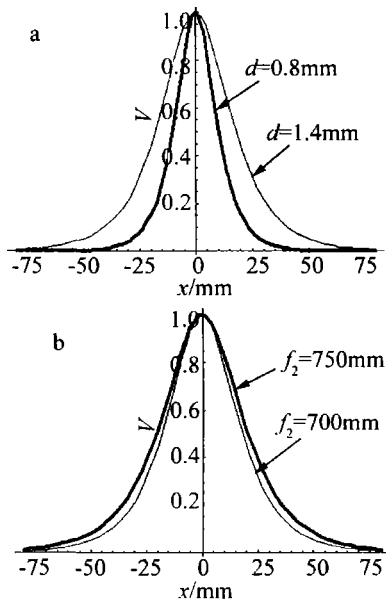


Fig. 7 Visibility of the in-phase mode interference fringes

多,条纹间距变小,这与理论分析是一致的。

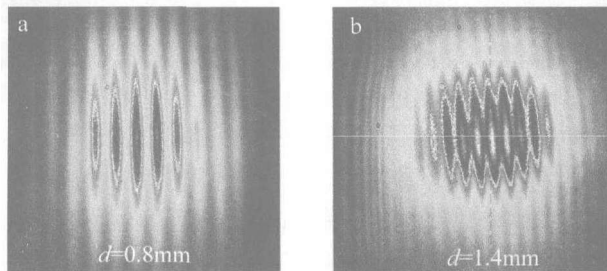


Fig. 8 Experimental results of interference patterns

### 3 结论

理论分析了两光纤激光器相干合成所得的干涉图样,对已有的实验结果进行了理论模拟,对空间滤波器改善条纹可见度的机理进行了理论分析。研究了光束间距、傅里叶变换透镜焦距实验参量对干涉图样条纹分布及可见度的影响。由于实验条件限制,作者仅对光束间距对干涉条纹分布的影响作了实验验证。其工作对相关实验工作将有一定的参考和指导意义。

### 参考文献

- [1] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N, *et al.* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36kW continuous-wave output power [J]. *Optics Express*, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [2] LIMPET J, LIEM A, ZELLMER H, *et al.* 500W continuous-wave fiber laser with excellent beam quality [J]. *Electron Lett*, 2003, 39(8): 645-647.
- [3] GAPONTI D. Quasi-single-mode fiber laser nears 2kW output with high-quality beam [J]. *Laser Focus World*, 2005, 41(6): 9-11.
- [4] BONATI G, VOELCKEL H, GABLER T, *et al.* 1.53 kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser [C]// *Photonics West, San Jose, Late Breaking Developments*. CA: Optics Info Base, 2005; Session 5709-2a.
- [5] CIAPURIN I V, GLEBOV L B, SIMIRNOV V I. Spectral combining of high-power fiber laser beams using Bragg grating in PTR glass [J]. *Proc SPIE*, 2004, 5335: 116-123.
- [6] WICKHAM M, ANDEREGG J, BROSNAN S, *et al.* Coherently coupled high power fiber arrays [J]. *Proc SPIE*, 2006, 6102: 455-457.
- [7] HE B, LOU Q H, ZHOU J, *et al.* High power coherent beam combination from two fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2006, 14(7): 2721-2726.
- [8] CORCORAN C J, DURVILLE F. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity [J]. *A P L*, 2005, 86(20): 201118.
- [9] BOCHOVE E J, CHEO P K, KING G G. Self-organization in a multicore fiber laser array [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(14): 1200-1202.
- [10] SHIRAKAWA A, SAITOU T, SEKIGUCHI T, *et al.* Coherent addition of fiber lasers by use of a fiber coupler [J]. *Optics Express*, 2002, 10(21): 1167-1172.
- [11] PENG Q, ZHOU Y, CHEN Y, *et al.* Phase locking of fiber lasers by self-imaging resonator [J]. *Electron Lett*, 2005, 41(4): 171-173.
- [12] LIU L P, ZHOU Y, KONG F T, *et al.* Phase locking in a fiber laser array with varying path lengths [J]. *A P L*, 2004, 85(21): 4837-4839.
- [13] HE B, LOU Q H, ZHOU J, *et al.* High power coherent beam combination from two fiber lasers [J]. *J O S A*, 2006, 14(7): 2721-2726.
- [14] MENARD S, VAMPOUILLE M, COLOMBEAU B, *et al.* Highly efficient phase locking and extracavity coherent combination of two diode-pumped Nd:YAG laser beams [J]. *Opt Lett*, 1996, 21(24): 1996-1998.
- [15] LOU Q H, ZHOU J, WANG Zh J. Analysis of high power fiber laser weapons [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(3): 161-165 (in Chinese).

(上接第 171 页)

- [4] LEE H J, KIM K J, KIM H G. Pulse-amplitude equalization of rational harmonic mode-locked fiber laser using a semiconductor optical amplifier loop mirror [J]. *Opt Commun*, 1999, 160(1): 53-56.
- [5] LI Z, LOU C, CHAN K T, *et al.* Theoretical and experimental study of pulse amplitude-equalized in a rational harmonic mode-locked fiber ring laser [J]. *IEEE J Q E*, 2001, 37(1): 33-37.
- [6] HE H Ch, YANG L Zh, WANG Y C. Generation of 1.5ps pulses with 0.7nJ of energy based on polarization additive pulse mode-locking [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1): 77-79 (in Chinese).
- [7] LEE C G, KIM Y J, CHOI H K, *et al.* Pulse-amplitude equalization in a rational harmonic mode-locked semiconductor ring laser using optical

feedback [J]. *Opt Commun*, 2002, 209(4/6): 417-425.

- [8] KIM Y J, LEE C G, CHUN Y Y, *et al.* Pulse-amplitude equalization in a rational harmonic mode-locked semiconductor fiber ring laser using a dual-drive Mach-Zehnder modulator [J]. *Optics Express*, 2004, 12(5): 907-915.
- [9] PANG Zh G, YU K X, FAN H. Study of the optimum operating mode in lithium niobate acousto-electro-optic modulator [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(2): 160-162 (in Chinese).
- [10] ZHU G, CHEN H, DUTTA N. Time domain analysis of a rational harmonic mode locked ring fiber laser [J]. *J A P*, 1990, 90(5): 2143-2147.