

文章编号: 1001-3806(2014)04-0509-06

## 双光束光纤激光器相干合成仿真及实验研究

李发丹, 郭会娜, 孙建国, 张兵, 冯光

(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 郑州 450047)

**摘要:** 为了研究光纤激光器相干合成, 采用光纤激光的相干合成数学模型仿真了双光束光纤激光相干合成的方法, 模拟仿真了各类因素条件下高斯光束相干合成的功率分布, 分析了不同参量条件下对合成效果的影响, 并针对部分仿真结果进行了实验研究。结果表明, 双光纤激光空间距离为 0mm, 光束夹角为  $0^\circ$ , 偏振方向完全一致时, 则相干合成效果最好。

**关键词:** 光纤光学; 光纤激光器; 相干合成; 模拟仿真; 实验

**中图分类号:** TN248.1      **文献标志码:** A      **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.04.015

## Simulation and experimental study on coherent combination of dual beam fiber laser

LI Fadan, GUO Huina, SUN Jianguo, ZHANG Bing, FENG Guang

(The 27th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450005, China)

**Abstract:** In order to study the coherent combination of fiber lasers, coherent combination method of dual-beam fiber laser was simulated by means of the mathematical model of coherent combination of fiber laser, the power distribution of the combined Gaussian beam was studied under different conditions, the effect of different parameters on the coherent combination was analyzed. After simulation and experimental verification, the results show that the best effect of coherent combination can be obtained when the space distance is 0mm, the beam angle is  $0^\circ$  and the polarization is identical.

**Key words:** fiber optics; fiber laser; coherent combination; numerical simulation; experiment

## 引言

光纤激光器作为最先进的激光器早已出现, 但是发展一直比较缓慢, 一直到以双包层光纤为基础的包层抽运技术<sup>[1-2]</sup>出现后, 光纤激光器输出功率才真正意义上从低功率发展到高功率输出, 单根连续光纤激光器输出已经超过千瓦<sup>[3]</sup>, 甚至 IPG 公司已经研发出了商业上万瓦的光纤激光器。虽然激光器技术发展迅速, 单根光纤激光器输出功率也突破万瓦, 但是由于光纤材料本身的热耐受性, 功率不可能无限制提高, 理论上单模光纤最高功率不可能超过 1MW, 而且由于光纤内激光功率密度的提高, 会出现各类严重的喇曼散射、布里渊散射等非线性效应。因而单纤最终输出功率受到限制, 光束质量也在高

功率条件下难以保证<sup>[4]</sup>。所以就发展了各种组束合成技术, 其中将多个光纤激光器的进行相干合成的是获得高功率、高光束质量激光输出的有效途径之一<sup>[5-6]</sup>。光纤激光器的相干合成技术的研究已经成国际研究热点<sup>[7]</sup>, 国内也进行了大量的纯理论仿真研究<sup>[8]</sup>, 但是和实验对比的报道比较少<sup>[9]</sup>。

本文中给出了实现光纤激光相干合成的双光束试验系统, 并在此基础上根据光学合成理论的, 建立了简单的激光相干合成的双光束高斯数学表达式, 利用 MATLAB 仿真软件, 仿真了各类特定参量条件下的双光束激光相干合成效果图形, 对比分析了特定参量的细微变化对相干合成图像的影响, 并在此基础上, 和实际实验进行了对比, 证明了数学理论模型的真实可行性。

## 1 系统构成及工作原理

最基本的光纤激光相干合成系统的是两路光纤激光相干合成, 然后才可以扩展到多路激光相干合成, 因此作者搭建了最简单的光纤激光相干

作者简介: 李发丹(1981-), 男, 工程师, 工学硕士, 主要研究方向为光电对抗与激光技术的研究。

E-mail: 67390466@qq.com

收稿日期: 2013-09-11; 收到修改稿日期: 2013-11-11

实验系统,见图1。实验系统主要由光纤激光器种子源、光分束器、光纤激光放大器、相干控制探测系统等部分组成,最终试验效果通过光束分析仪进行实验效果观测。

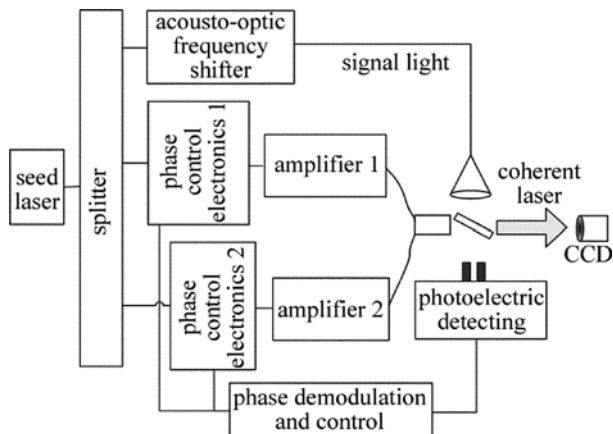


Fig. 1 Experimental system of dual-beam fiber laser coherent combination

光纤激光种子源采用窄线宽单模光纤激光器,然后经过放大器进行放大实现 20W 以上的高功率输出。激光种子源经过光纤分束器分成一个参考光和两个信号光,每路光纤放大器的均有相位解调与控制器。两路信号光在经过放大最终实现输出高功率激光。在实验系统接收和控制部分,种子光的参考光和两路经过放大的输出光束干涉,利用探测器来探测激光的干涉信号,来检测相干合成的两路激光的相位的微小变化,传达不同的电压给相位控制器,实现对两路放大激光相位大小补偿,使二者相位保持不变,最终实现光纤激光的相干合成。

## 2 理论模型

光纤激光合成最基本的就是两路光纤激光相干合成,根据最终激光输出状态来建立理论模型,忽略实验系统前端激光种子源、放大模型及其相干控制系统的影响,因为实验系统的最终光纤激光输出为窄线宽基模光束,光束质量非常优秀, $x$ 轴  $M^2 = 1.071$ , $y$ 轴  $M^2 = 1.108$ ,接近于 He-Ne 气体激光的光束质量。所以,作者理论假定输出激光为标准基模高斯光束。

在波动光学中,对于一束波长为  $\lambda$  的激光,其复振幅  $U$  在空间的分布满足高斯光束,与  $z$  轴夹角为  $\beta$ , $x$ - $y$  平面的交点距离为  $\varepsilon$ ,则单路光纤激光传播模型用下式表示<sup>[10]</sup>:

$$U(x, y, z, \beta) = U(\beta) = \frac{c}{w(z)} \exp \left[ -\frac{x^2 \cos^2 \beta + y^2}{w^2(z)} \right] \times$$

$$\exp \left[ i \left( -\omega t + kx \sin \beta - kz \cos \beta + \frac{x^2 \cos^2 \beta + y^2}{2R(z)} - \arctan \frac{z}{f} \right) \right] \quad (1)$$

式中, $k$  为波数且  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $w(z)$  是激光腰斑半径,是  $z$  方向的光斑半径,  $w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/f)^2}$ ,  $w_0$  为  $z = 0$  处基模光斑半径,且  $w_0 = \sqrt{f/\pi}$ ;  $R(z) = z + f^2/z$ ,  $f$  为共焦参量且  $f = \pi w_0^2/\lambda$ ;  $\omega$  为激光频率;  $R(z)$  是  $z$  点等相位面的曲率半径;  $c$  为常数,  $c/w(z)$  为振幅。

两光束激光在远场重叠,表达式为:

$$I(x, y) = |U_1(+\beta, +\varepsilon)|^2 + |U_2(-\beta, -\varepsilon)|^2 + U_1(+\beta, +\varepsilon)U_2^*(-\beta, -\varepsilon) + U_1^*(+\beta, +\varepsilon)U_2(-\beta, -\varepsilon) \quad (2)$$

式中, \* 表示卷积。其中:

$$|U_1(+\beta, +\varepsilon)|^2 = \left[ \frac{c_1}{w_1(z)} \right]^2 \times \exp \left[ -2 \frac{(x - \varepsilon)^2 \cos^2 \beta + y^2}{w_1^2(z)} \right] \quad (3)$$

$$|U_2(-\beta, -\varepsilon)|^2 = \left[ \frac{c_2}{w_2(z)} \right]^2 \times \exp \left[ -2 \frac{(x + \varepsilon)^2 \cos^2 \beta + y^2}{w_2^2(z)} \right] \quad (4)$$

将(3)式、(4)式带入(2)式中就得到了激光相干光强的双光束空间数学表达为:

$$I(x, y) = \frac{E}{w_2^2(p^2 + q^2)} \times \left\{ \exp \left[ -2 \frac{(x - \varepsilon)^2 \cos^2 \beta + y^2}{p^2 w_2^2(z_2)} \right] + q^2 \exp \left[ 2 - \frac{(x + \varepsilon)^2 \cos^2 \beta + y^2}{w_2^2(z_2)} \right] + 2q \exp \left[ -\frac{(x - \varepsilon)^2 \cos^2 \beta + y^2}{p^2 w_2^2(z_2)} - \frac{(x + \varepsilon)^2 \cos^2 \beta + y^2}{w_2^2(z_2)} \right] \right\} \times \cos \left\{ \sin \beta [k_1(x - \varepsilon) + k_2(x + \varepsilon)] - \cos \beta (k_1 z_1 - k_2 z_2) - \arctg \frac{z_1}{f_1} + \arctg \frac{z_2}{f_2} + \frac{(x - \varepsilon)^2 \cos^2 \beta + y^2}{2R_1(z)} - \frac{(x + \varepsilon)^2 \cos^2 \beta + y^2}{2R_2(z)} \right\} \quad (5)$$

式中,  $w_2 = w_2(z)$ ,  $w_1 = w_1(z)$ ,  $p = w_1/w_2$ ,  $q = c_2/c_1$ ,  $E = A_1^2 w_1^2 + A_2^2 w_2^2 = c_1^2 + c_2^2$ 。

上面给出了两路光纤激光在空间的合成详细数学理论表达式,据此就可以仿真不同状况的激光相干合成的分布图像,并针对部分试验结果进行对比。

### 3 模拟仿真及实验讨论

实验中所用光纤激光为窄线宽基模光束,波长为 1064nm,激光束腰为  $w_0$ ,在  $z=0$  处光束半径是 1mm,空间传输距离  $z$  如没有特殊说明都默认  $z=2m$ , $p$  和  $q$  在没有特殊说明时都为 1,两光路偏振方向一致的线偏光。实际实验系统中光纤激光输出为 1064nm,工作模式也是  $TEM_{00}$  模,束腰不确定,输出口径为 3mm,单路激光种子源功率为 0.3W,经过两级放大后实现 0.5W 到 20W 光纤激光功率输出,如无特殊注明,均为输出功率为 20W 的条件下的实验状态。光束分析仪用 Ophir 公司的光斑分析仪 SCOR20 系统,软件是该公司提供的 Beam Profile,其具体指标为:分辨率 1600pixel  $\times$  1200pixel;光谱响应范围 350nm  $\sim$  1320nm,像素间隔 4.4 $\mu$ m  $\times$  4.4 $\mu$ m;接收口径 7.1mm  $\times$  5.4mm,因为光斑分析仪的阈值要求很低,所用在镜头前加了足够多的衰减,实验和理论只进行定性对比,光束分析仪的观测结果和作者的仿真计算只是相对功率分布。

#### 3.1 空间距离对相干合成的影响

图 2 为双光束完全平行入射条件下,双光束偏振方向一致,双光束在距离为 0mm 距离情况下的相干,干涉条纹为一个主峰,两个次峰,主峰占总功率的 80% 以上,这是该实验上达到最好的相干效果。从图中可以看到两个次峰一大一小,由于相干控制的不稳定性,两个峰在动态大小变化中,但两者总体上是稳定的。

仿真结果显示,距离在  $\beta=0.5mrad$  时仿真效果和实验效果近似,说明实际实验中并没有达到  $\beta=0mrad$  的最理想状态。由于仿真是在完全理想条件下,仿真结果非常对称。仿真在距离为  $\beta=0mrad$  时达到完全相干,但是实验状态下,完全相干几乎很难实现。

图 3 是  $\beta=0.5mrad$  条件下,微调光束分析仪,双光束距离为 0.1mm 条件下的实验结果,从实验结果可以看出,条纹明显增多,主峰功率下降严重,出现 7 个干涉条纹,功率主要集中在中间 5 个干涉峰上,仿真结果和实际比较一致,另外在实验图上可以看到,干涉条纹的最左侧出现圆形干涉条纹,这是因为实验系统中出现了微尘造成的衍射条纹。

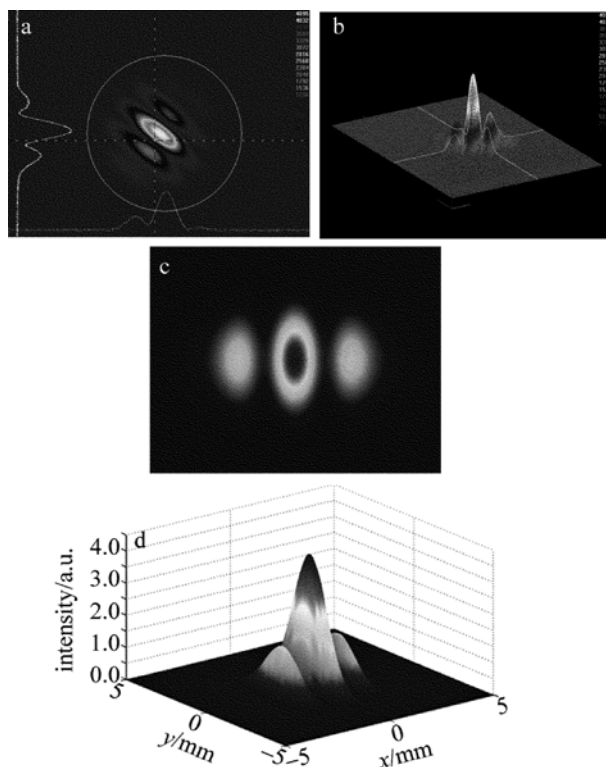


Fig. 2 The different perspective of coherent experimental results and simulation diagram when the beam angle of 0.5mrad and the spatial distance of 0mm

a,b—the experimental diagram c,d—the simulation diagram

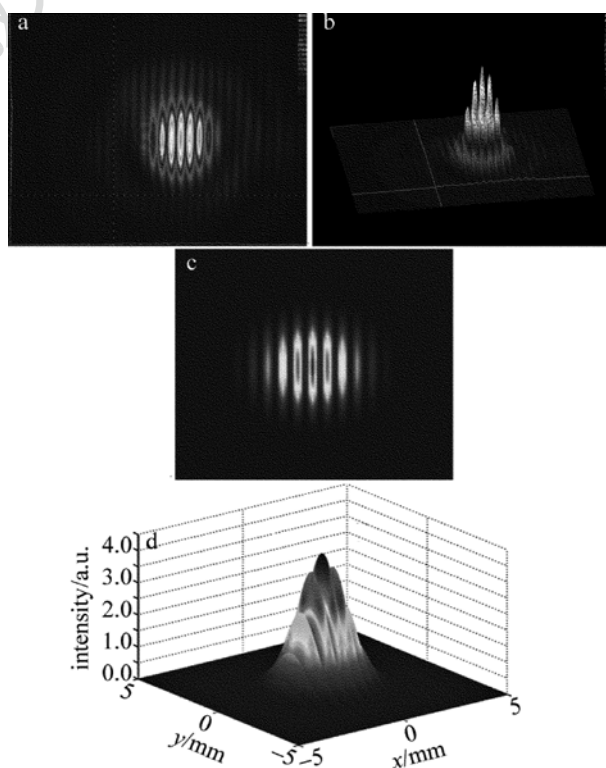


Fig. 3 The different perspective of coherent experimental results and simulation diagram when the beam angle of 0.5mrad and the spatial distance of 0.1mm

a,b—the experimental diagram c,d—the simulation diagram



从实验和仿真图都可以看出在双激光光束空间距离越近,相干效果越好,从3维强度分布图中也可以看出,当空间距离相对较远时,两者相干形成的干涉峰相对低一点,在距离为0mm时激光相干的峰值为距离是0.01mm时的2倍多,相干实验非常灵敏,轻微的调节就出现大幅度的变化。

在图4中给出了主峰占总功率比值与激光距离的关系和相干中心主峰对比度与空间位置的关系。可以很容易看出:两者比值随着空间距离 $\varepsilon$ 的增大很快变小,在0mm到0.5mm变化幅度比较平缓,在0.5mm到2mm变化幅度剧烈,在2mm到3mm时,幅度斜率变缓;而激光对比度随着距离的增大先达到一个最大值,然后迅速变小。

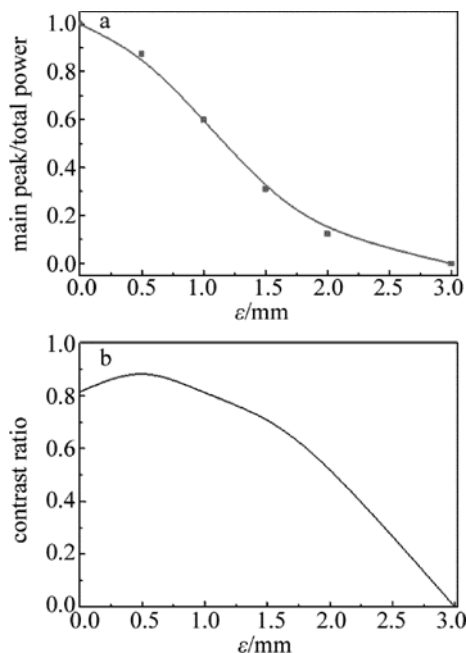


Fig. 4 a—the relationship between the main peak/total power and space distance b—the relationship between contrast ratio at the main peak and spatial distance

### 3.2 光束偏振夹角对相干合成的影响

图5、图6分别为 $\beta = 1\text{mrad}$ 且 $\varepsilon = 0\text{mm}$ 时,双激光光束的偏振夹角为 $0^\circ$ 、 $20^\circ$ 两类条件下的相干实验图和仿真结果图。可以看出,在偏振夹角越小,两者相干合成效果越好,从相干合成3维分布图中也可以看出,偏振夹角相对较大时,相干产生的峰值比较小,在两束激光偏振方向一致时,相干产生的干涉峰值较大,对比度也要好得多。

实验系统中,由于两光束都是偏振光,作者在采用技术手段让其中一束光夹角偏转,这样输出的激光功率就会下降;让另一路激光功率降低到两路功

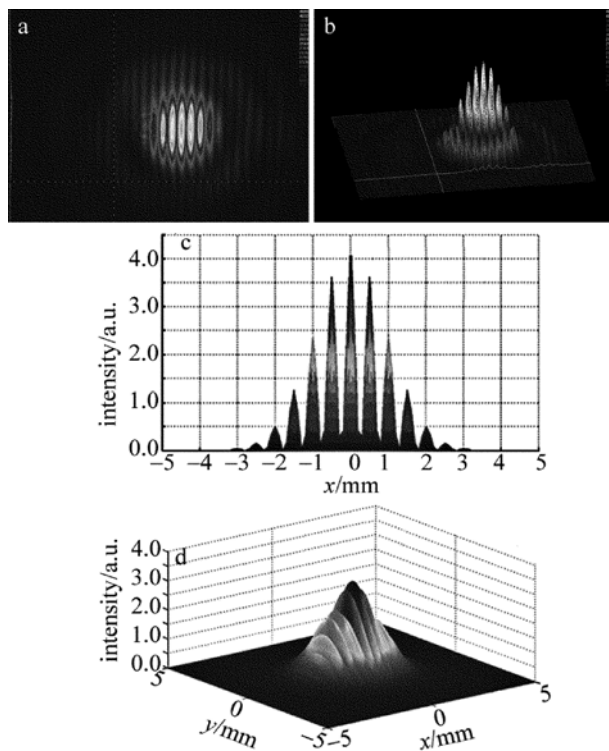


Fig. 5 The different perspective of coherent experimental results and simulation diagram when the polarization angle of  $0^\circ$  and the unchanged beam space distance

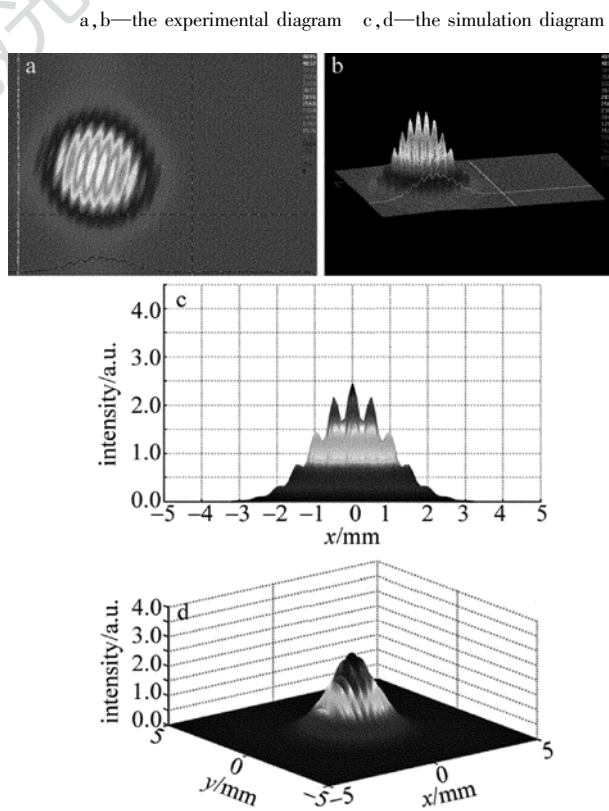


Fig. 6 The different perspective of coherent experimental results and simulation diagram when the polarization angle of  $20^\circ$  and the unchanged beam space distance

率一致的水平,然后再控制两光束功率相同条件下进行实验对比,其实这样条件下夹角偏转的光路上就多增加了一个光程,因此在另一路上需要同样手段进行补偿光程。

从图 5 和图 6 可以看出,实验图的仿真图比较一致,当双光束夹角不变时,空间距离不变时,对比度随偏振夹角在较小时变化较缓,然后迅速减小,而干涉峰值则随偏振夹角的增大不断减小,在其它条件不变情况下,偏转夹角越大,两束光的同一方向的分量就越少,因此对比度越差,从图 7 可以看出,在夹角为  $60^\circ$  时,由于同一偏振方向分量少,所以对比度下降到 0.5,而干涉峰由于只是简单的功率叠加,在最后  $60^\circ$  主峰占总功率的比值从 0.4 下降到 0.2 左右,下降也比较厉害,尤其对比度的下降,相干条纹已经很不明显。

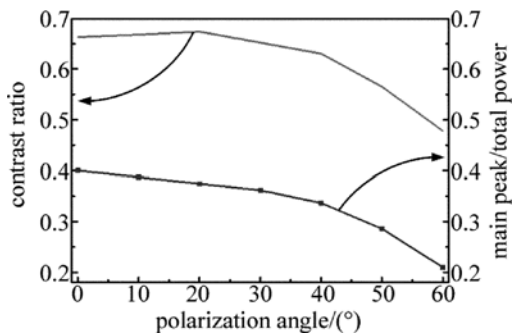


Fig. 7 The relationship between the contrast ratio and polarization angle and the relationship between the main peak/total power and polarization angle

### 3.3 频率差异对相干合成的影响

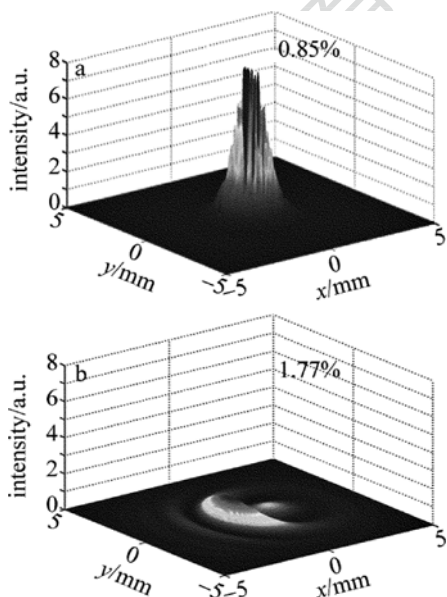


Fig. 8 Interference effect diagram when frequency difference of 0.85% and 1.77%

图 8 中仿真了双光束频率差分别为 0.85% 和 1.77% 时的干涉效果。在仿真结果中显示,在频率不一致的条件下,仍是可以实现部分相干,在光束夹角为 1mrad、空间距离为 0mm、频率不同时,干涉图像变化多端,有时可以显出干涉图样,更多的时候出现环形、多峰型。经过对比,频率差达 1% 时,干涉峰值会变得很小或者干涉效果极差。

### 3.4 光束夹角对相干合成的影响

理论仿真中,在双光束角度很大 ( $\beta = 5\text{rad}$  时,双光束间夹角为  $10\text{rad}$ ) 时仍然可以得到明显的干涉条纹。条纹变化以  $5\text{mrad}$  为一个周期,  $\beta = 0\text{mrad}$  时完全相干,随着  $\beta$  增大,条纹增多,条纹变密集,然后再次实现完全相干。而在实际试验中很难观察到这个现象。由于激光的空间相干性,双光束夹角不可能很大,实验中,在夹角大于  $3\text{mrad}$  时候,就很难实现相干合成,几乎条纹不可见。所以大角度的仿真结果没有实际意义,所以在实现良好相干的条件下,微调角度,来研究光束夹角对相干的影响。从图 2 中也可以看出在光束夹角  $0.5\text{mrad}$  时,实现了最佳相干,而完全相干很难实现。

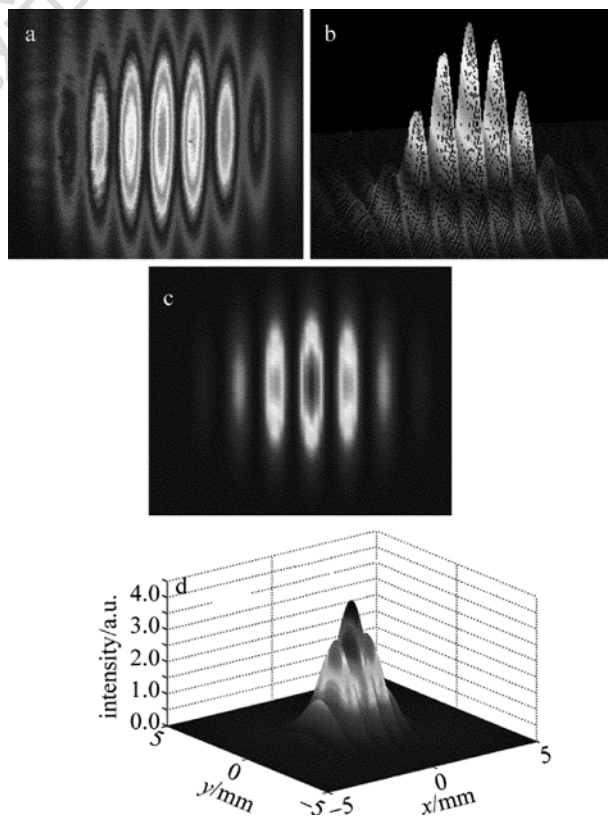


Fig. 9 The different perspective of coherent experimental results and simulation diagram when  $\beta = 0.7\text{mrad}$   
a, b—the experimental diagram c, d—the simulation diagram

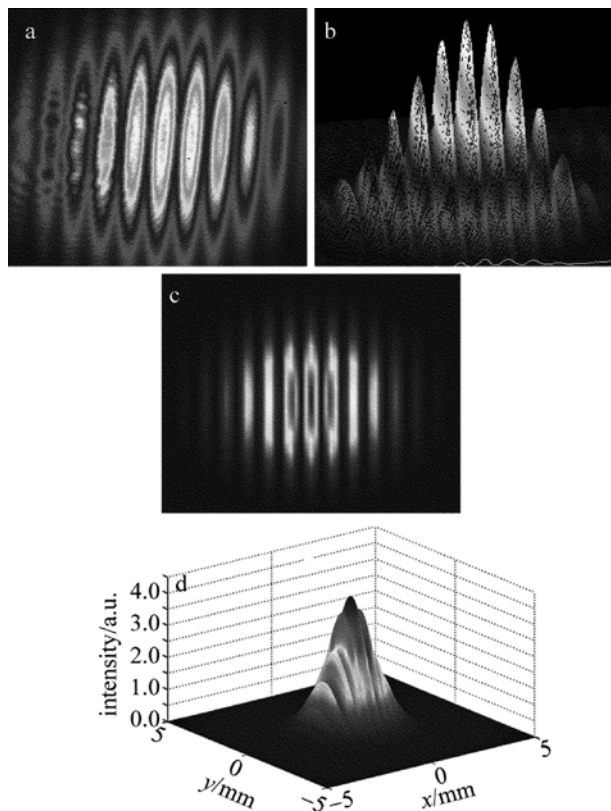


Fig. 10 The different perspective of coherent experimental results and simulation diagram when  $\beta = 1.25\text{mrad}$

a, b—the experimental diagram c, d—the simulation diagram

从图 2、图 9 和图 10 可以看出,在  $\beta = 0.5\text{mrad}$  时,只有 3 个干涉条纹,一个主峰,主峰能力占总能量的 90%,在  $\beta = 0.7\text{mrad}$  时,旁瓣已经由两个变成了 4 个,能量分布比较分散,大多数为旁瓣,而在  $1.25\text{mrad}$  时主峰已经和次峰能量差不多,旁瓣多达 6 个以上,其中相干图像中的 3 个主峰条纹总功率占全部激光功率 61% 以上,实验的结果表明,光束之间夹角越小,相干合成效果越好,理论和实际符合得比较好。

#### 4 结 论

给出了双光束激光的实验合成数学模型,经过

仿真和实验结果的对比得出:双光纤激光的光束的中心距离,双光束偏振差异,双光束空间夹角等对最终的激光相干影响都很大。结果表明:双光纤激光空间距离为  $0\text{mm}$ 、光束夹角为  $0\text{mrad}$ 、偏振方向完全一致时,相干合成效果最好,实验与理论符合得很好,而光束夹角和光束偏振特性的仿真结果和实际实验有差异,主要是理论仿真中没有考虑空间相干性问题。

#### 参 考 文 献

- [1] SNITZER E, PO H, HAKIMI F, *et al.* Double-clad offset core Nd fiber laser [C]//Optical Fiber Sensors. Washington DC, USA: Optical Society of America, 1988:PD5.
- [2] PO H, SNITZER E, TUMMINELLI R, *et al.* Double clad high brightness Nd fiber laser pumped by GaAlAs phased array[C]//Optical Fiber Communication Conference. Washington DC, USA: Optical Society of America, 1989:PD7.
- [3] 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.
- [4] SABOURDY D, KERMENE V, DESFARGES-BERTHELENOT A, *et al.* Power scaling of fibre lasers with all fibre interferometric cavity [J]. Electronics Letters, 2002, 38(14):692-693.
- [5] ISHAAYA A, DAVIDSON N, SHIMSHI L, *et al.* Intracavity coherent addition of Gaussian beam distributions using a planar interferometric coupler[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(12):2187-2189.
- [6] AUGST S J, FAN T Y, SANCHEZ A. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers[J]. Optics Letters, 2004, 29(5):474-476.
- [7] LIU L P, ZHOU Y, KONG F T. Phase locking in a fiber laser array with varying path lengths[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(21):4837-4839.
- [8] WANG C Z, LI L, SHANG W D, *et al.* Study on pulsed solid-state lasers with positive branch confocal unstable resonators[J]. Laser Technology, 2013, 37(4):441-444 (in Chinese).
- [9] SHI X G, DOU R H, JING SH, *et al.* Influence of system jitter on far field of coherently combined beam[J]. Laser Technology, 2009, 33(5):493-496 (in Chinese).
- [10] ZHOU B K, GAO Y Zh, CHEN T R, *et al.* Laser principle [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000:69-160 (in Chinese).