

文章编号: 0253-2239(2009)08-2248-08

光纤激光相干阵列远场光强分布的影响分析

王 炜¹ 何 兵¹ 周 军¹ 楼祺洪¹ 刘 侠¹ 张芳沛² 赵宏明¹ 许 辉³

(¹中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ²中国电子科技集团公司 第 27 研究所, 河南 郑州 450015)
³南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 在光纤激光相干组束中, 受到各种因素的影响, 各个单元激光器出射激光的相位、振幅和偏振态不能保持一致, 并随着时间而变化, 均会降低相干组束后的光束质量、减弱光束中心的峰值光强和中心区域内的功率。针对光纤激光相干组束中每个单元光束的出射时的相位、振幅和偏振方向扰动对相干组束远场光强分布的影响进行了理论分析, 并给出数值计算结果。结果表明远场光强分布的图形、峰值光强度和中心区域内的功率, 受到各因素的影响, 都会不同程度的变差或减弱。

关键词 光纤激光; 相干组束; 光强分布; 光束质量

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2248

Study on Far-Field Intensity Distribution of Fiber Laser Used in Coherent Beam Combination

Wang Wei¹ He Bing¹ Zhou Jun¹ Lou Qihong¹ Liu Xia¹
Zhang Fangpei² Zhao Hongming¹ Xu Hui³

¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

² The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou, Henan 450015, China

³ School of Electronic Engineering & Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract In coherent beam combination with fiber lasers, the phases, amplitudes and polarization directions of each laser are different, influenced by manufacturing process, environment and others. The far-field intensity distribution and beam quality of lasers with coherent beam combination are studied and calculated. Numerical results show that the figure of far-field light distribution, the light intensity of peak value, and the power of the central region degenerate or trail off in varying degrees.

Key words fiber laser; coherent beam combination; intensity distribution; beam quality

1 引 言

光纤激光器是近年来高功率激光光源研究领域中的热点, 与其它激光器相比, 无论在光束质量、体积重量、转换效率方面, 还是在散热、使用寿命、工作性能、系统维护等方面, 它都具有明显的优势^[1]。但是, 光纤激光器在高功率条件下产生的非线性效应, 以及光纤本身能承受的阈值功率的限制, 要大幅度地提高单个光纤激光器的功率是相当困难的^[2]。

2008 年, Dawson 等的研究分析结果认为, 按照料目前的材料和条件, 考虑各种物理因素, 包括热限制、非线性光学影响、输出端限制等, 对于宽带光纤激光器, 输出衍射极限激光的功率上限为 36.6 kW, 对于窄带宽光纤激光器, 输出上限则是 18.6 kW^[3]。

目前常用的解决办法采用光纤激光器阵列进行组束达到提高输出功率的目的。但作为高能激光武器仅得到简单的高功率合成输出是不够的, 还必须

收稿日期: 2008-10-15; **收到修改稿日期**: 2008-12-10

基金项目: 国家 863 计划(2008AA03Z405)资助课题。

作者简介: 王 炜(1977—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤激光器、光纤激光器相干组束等方面的研究。

E-mail: ww71651@163.com

导师简介: 楼祺洪(1942—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率双包层光纤激光器及相干组束技术等方面的研究。

E-mail: qhlou@mail.shcnc.ac.cn

保证组束后的激光光束质量不能降低,甚至能够得到提高,光纤激光器阵列的相干合成(即相干组束)是产生高功率、高质量光束的常用选择^[4~9],但是光纤激光器中的光纤,受到工艺条件的制约以及工作时外界环境的影响,每个单元的光束出射时的相对相位误差、振幅误差、偏振态不能完全相同,并会出现扰动现象,这对相干合成后的远场光强分布会有很大的影响,从而降低远场光束质量^[10],本文采用了数学中的概率统计的方法,对上述的三种因素分别对远场光强分布的影响做了分析和研究。

2 理想情况下相干合成光束的远场光强分布

首先计算理想情况下相干合成光束在远场的光强分布。在这里我们采用了一般形式的激光器阵列,阵列分布如图 1 所示。

假设在 x 方向分布有 N 个单元, y 方向分布有 M 个单元,每相邻单元在 x, y 的间隔分别为 d_x, d_y , 波长为 λ , 在坐标原点的单路激光器出射光束的振

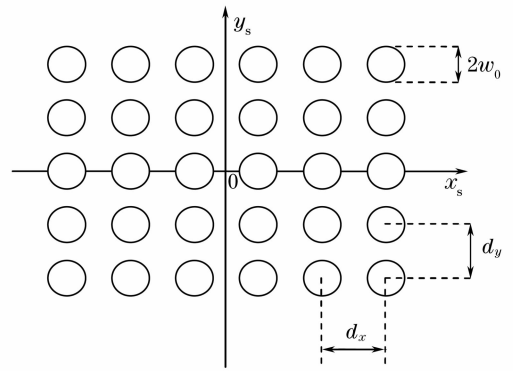


图 1 激光器阵列二维分布图

Fig. 1 Two-dimensional distribution of laser array

幅分布为

$$U_t = A_0 \exp\left[-\frac{(x_s^2 + y_s^2)}{\omega_0^2}\right] = A_0 U(x_s, y_s), \quad (1)$$

式中 A_0 为振幅, ω_0 为每路激光束的腰斑半径, $U(x_s, y_s) = \exp[-(x_s^2 + y_s^2)/\omega_0^2]$ 。

因为在远处观察时,由夫琅禾费衍射可以推出,单路激光器的出射光束在 z 处的振幅为

$$U(f_x, f_y, z) = C \iint U(x_s, y_s) \times \exp[j2\pi(f_x x_s + f_y y_s)] dx_s dy_s, \quad (2)$$

式中 $C = \frac{jA_0 \exp(-jkz)}{\lambda z} \exp\left[-\frac{jk}{2z}(x^2 + y^2)\right]$, $f_x = \frac{x_s}{\lambda z}$, $f_y = \frac{y_s}{\lambda z}$ 。

由傅里叶光学理论,(2)式可以看作是对出射光束的空间傅里叶变换,因此(2)式可以写为

$$U(f_x, f_y, z) = C \cdot \mathcal{F}\{U(x_s, y_s)\}.$$

式中 \mathcal{F} 为傅里叶变换。对于二维分布的激光器阵列,它的远场光振幅分布可以写为

$$U_{\text{array}}(f_x, f_y, z) = C \cdot \mathcal{F}\{U(x_s, y_s)\} \times \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \exp[-j2\pi(f_x x_{sn} + f_y y_{sm})], \quad (3)$$

式中 $x_{sn} = nd_x$, 下面的 $y_{sm} = md_y$ 。

光强分布为

$$I_0(f_x, f_y, z) = |\mathcal{F}\{U_{\text{array}}(x_s, y_s)\}|^2 = \frac{A_0}{\lambda^2 z^2} |\mathcal{F}\{U(x_s, y_s)\}|^2 \left| \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \exp[-j2\pi(f_x x_{sn} + f_y y_{sm})] \right|^2, \quad (4)$$

$$\text{式中 } \left| \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \exp[-j2\pi(f_x x_{sn} + f_y y_{sm})] \right| = \left| \frac{\sin(\pi N d_x f_x)}{\sin(\pi d_x f_x)} \frac{\sin(\pi M d_y f_y)}{\sin(\pi d_y f_y)} \right|.$$

(4)式可以写为

$$I_0(f_x, f_y, z) = |\mathcal{F}\{U_{\text{array}}(x_s, y_s)\}|^2 = \frac{A_0}{\lambda^2 z^2} |\mathcal{F}\{U(x_s, y_s)\}|^2 \frac{\sin^2(\pi N d_x f_x)}{\sin^2(\pi d_x f_x)} \frac{\sin^2(\pi M d_y f_y)}{\sin^2(\pi d_y f_y)}, \quad (5)$$

从(5)式可以看出,二维激光器阵列中,每个激光器的中心为圆心,半径为 ω_0 的圆孔构成了一个多孔的空间调制器,它把单路激光器的出射振幅分布通过卷积的方式调制成为具有相同振幅分布而中心坐标不同的一个复杂的激光器阵列的出射光振幅分

布,由傅里叶光学变换理论可以看到其在远场的光振幅分布是由两部分相乘而得到的,如图 2 所示。第一部分就是单路激光器光远场振幅分布,第二部分是空间调制器在远场的傅里叶变换。对于后面各种影响的分析,都是在此基础上进行讨论,图 2 中参

数为 $A_0 = 1 \text{ W}$, $\omega_0 = 3 \text{ mm}$, $z = 100 \text{ m}$, $N = M = 6$, $d_x = d_y = 10 \text{ mm}$, $\lambda = 1064 \text{ nm}$ 。

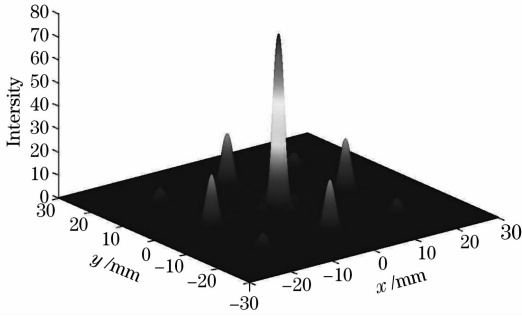


图2 6×6 路相干激光阵列远场光强三维分布
Fig. 2 3-D far-field intensity distribution of 6×6 coherent laser array

3 出射相位随机抖动对相干合成的影响

对于光纤激光器相干合成而言,只有每路光纤激光器的出射时相位都相同或者相差 2π 时,相干合成光束的远场光强分布才会如图2所示,这时的光束质量最好,但是实际中,由于受到温度扰动、吸收不均匀性等随机的因素的影响,每路激光输出的光束相位相对于其它路激光的相位都是有随机误差的,这必将影响光束的远场光强分布,有必要仔细分析相位的随机变化对光束质量的影响^[11]。

考虑每路输出时都有一个随机相位的变化,且相互之间是不相干的,这里设定对于 x 方向第 n 个和 y 方向第 m 个的激光光路输出光相位变化偏差为 ϕ_{nm} ,那么远场的光振幅分布表达式,即(3)式应该写为

$$U_{\text{array}}(f_x, f_y, z) = C \cdot \mathcal{F}\{U(x_s, y_s)\} \times \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \exp[-j2\pi(f_x x_{sn} + f_y y_{sm})] \exp(j\phi_{nm}), \quad (6)$$

那么光强分布的表达式为

$$I_{\text{array}}(f_x, f_y, z) = U_{\text{array}}(f_x, f_y, z) U_{\text{array}}^*(f_x, f_y, z) \propto \frac{1}{\lambda^2 z^2} \left| \mathcal{F}\{U(x_s, y_s)\} \right|^2 \times \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{n'=1}^N \sum_{m'=1}^M \exp[-j2\pi f_x (x_{sn} - x_{s'n'})] \exp[-j2\pi f_y (y_{sm} - y_{s'm'})] \exp[j(\phi_{nm} - \phi_{n'm'})], \quad (7)$$

(7)式所表达的是某一瞬时的光强分布,对于我们来说没有什么实际研究价值,应当关注的是平均光强分布,其表达式由(7)式可以改写为

$$\bar{I}_{\text{array}} = \langle I_{\text{array}}(f_x, f_y, z) \rangle \propto \frac{1}{\lambda^2 z^2} \left| \mathcal{F}\{U(x_s, y_s)\} \right|^2 \times \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{n'=1}^N \sum_{m'=1}^M \exp[-j2\pi f_x (x_{sn} - x_{s'n'})] \exp[-j2\pi f_y (y_{sm} - y_{s'm'})] \langle \exp[j(\phi_{nm} - \phi_{n'm'})] \rangle, \quad (8)$$

在这里,假定每个单元的输出相位变化都是零均值的高斯变量,它们的方差都相同,为 δ_ϕ^2 。由高斯矩理论^[12], (8)式的最后一项可以写为

$$\langle \exp[j(\phi_{nm} - \phi_{n'm'})] \rangle = \exp\left[-\frac{1}{2} \langle (\phi_{nm} - \phi_{n'm'})^2 \rangle\right] = \exp(-\delta_\phi^2), \quad (9)$$

将(9)式代入(8)式,整理得到平均光强表达式为

$$\bar{I}_{\text{array}}(f_x, f_y, z) \propto I_0(f_x, f_y, z) \exp(-\delta_\phi^2) + \frac{NMA_0^2}{\lambda^2 z^2} \left| \mathcal{F}\{U(x_s, y_s)\} \right|^2 [1 - \exp(-\delta_\phi^2)], \quad (10)$$

式中 $I_0(f_x, f_y, z)$ 为理想相干时的远场光强分布, N, M 分别为激光阵列在 x, y 方向个数。图3为 δ 取不同值时, 2×2 路相干阵列远场光强分布图(具体参数为 $A_0 = 1 \text{ W}$, $\omega_0 = 3 \text{ mm}$, $z = 100 \text{ m}$, $N = M = 2$, $d_x = d_y = 10 \text{ mm}$, $\lambda = 1064 \text{ nm}$)。

根据参考文献^[13],分析相干合成光束远场光强分布时,采用了远场光束中心强度比值 I/I_0 和光束中心光斑尺寸的环围功率比 BQ 这两个参数。图4为相干组束后的远场光束中心强度与理想相干情

况下远场光束中心强度比值 I/I_0 与 δ 取值之间的关系曲线图,图5为取理想情况下光束中心光斑尺寸的环围功率比 BQ 与 δ 之间的关系曲线图,从图4和图5可以看出相位抖动幅度越大,即 δ 值越大,远场光强分布图形就越差,各级光斑的轮廓越模糊,即对比度越差,光束中心峰值光强就越低,中心光斑包含的功率也相应减少,光束质量逐渐变差。但是从图4和图5中也可以看到,在 δ 值较小时, I/I_0 和 BQ 值的变化不是很显著,所以在做激光相干组束

实验时,必须要保证每路光束输出时相对相位差为零或接近于零,这样才能获得好的实验结果,通过计算分析,如果 δ 控制在 0.1π 内,是可以得到图形轮

廓清晰,高对比度的远场相干光强分布,以及很高的中心峰值功率。

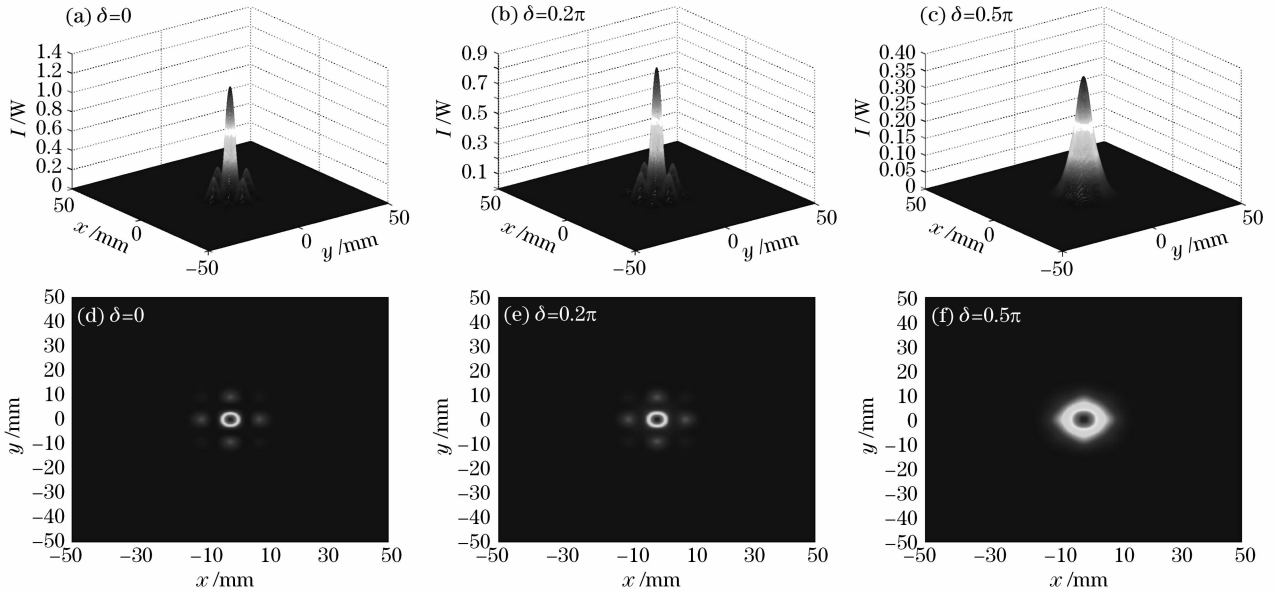


图 3 不同 δ 下 2×2 路相干阵列远场光强分布三维图(a)~(c)和二维图(d)~(f)

Fig. 3 3-D [(a)~(c)] and 2-D [(d)~(f)] far-field intensity distribution of 2-D 2×2 coherent laser array with different δ

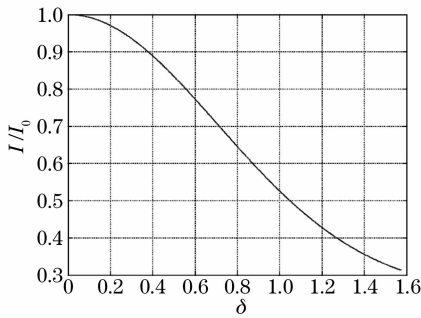


图 4 I/I_0 与 δ 的曲线图

Fig. 4 Dependence of I/I_0 on δ

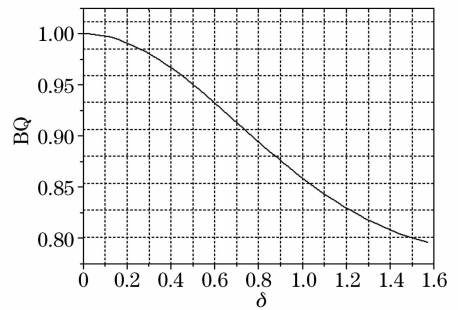


图 5 BQ 与 δ 的曲线图

Fig. 5 Dependence of BQ on δ

4 出射激光振幅抖动对相干合成的影响

理想的相干组束中,每路出射激光振幅是相同的,在实验中,由于抽运光受到环境温度的影响,抽运光的波长会出现漂移,同时抽运光的光强也会降低,光纤激光器中的光纤也会受到环境温度的影响,以及其它环境因素的影响,光纤激光器出射激光振幅总是比之最佳值偏低,并且随着时间变化,忽高忽低,不能保持稳定,这种振幅的抖动也会直接影响相干合成光束的远场的光强强度变化和分布,在这里假定每路出射光束的振幅都 A_{nm} 比最佳值 A_0 要小,并且随时间变化,设这个差值为 q_{nm} ($q_{nm} = A_0 - A_{nm}$,

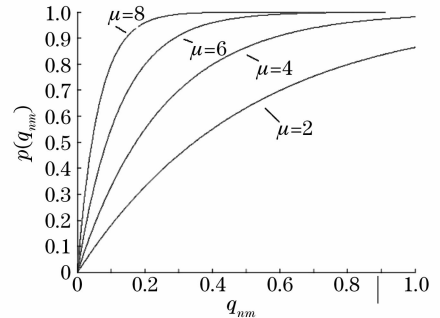


图 6 不同 μ 值概率分布图

Fig. 6 Dependence of the probability distribution on μ ($0 < q_{nm} < +\infty$), 在这里,假设这个值服从参数为 μ 的指数分布,它的分布函数为

$$P(q_{mn}) = \begin{cases} 1 - \exp(-\mu q_{mn}), & q_{mn} \geq 0 \\ 0, & q_{mn} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

概率分布如图 6 所示。那么对于每路激光器的出射振幅分布应当写成

$$U_{mn}(x_s, y_s) = \iint A_{mn} \exp\left[-\frac{(x_s - a)^2 + (y_s - b)^2}{\omega_0^2}\right] \delta(a - x_{sn}, b - y_{sm}) da db, \quad (12)$$

在这里设 $U_0(x_s, y_s) = \exp[-(x_s^2 + y_s^2)/\omega_0^2]$, 那么这时的远场 z 处的光振幅分布为

$$U_{\text{array}}(f_x, f_y, z) = C \cdot \mathcal{F}\{U_0(x_s, y_s)\} \times \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_{mn} \exp[-j2\pi(f_x x_{sn} + f_y y_{sm})],$$

远场光强为

$$I_{\text{array}}(f_x, f_y, z) = U_{\text{array}}(f_x, f_y, z) U_{\text{array}}^*(f_x, f_y, z) \propto \frac{1}{\lambda^2 z^2} |\mathcal{F}\{U_0(x_s, y_s)\}|^2 \times \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{n'=1}^N \sum_{m'=1}^M A_{nm} A_{n'm'} \exp[-j2\pi f_x (x_{sn} - x_{s n'})] \exp[-j2\pi f_y (y_{sm} - y_{s m'})], \quad (13)$$

振幅幅值是随着时间而变化, 瞬态的光强分布是很难探测, 应当关注的是短时平均光强分布, 其表达式由(13)式可以改写为

$$\bar{I}_{\text{array}} = \langle I_{\text{array}}(f_x, f_y, z) \rangle \propto \frac{1}{\lambda^2 z^2} |\mathcal{F}\{U_0(x_s, y_s)\}|^2 \times \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{n'=1}^N \sum_{m'=1}^M \langle A_{nm} A_{n'm'} \rangle \exp[-j2\pi f_x (x_{sn} - x_{s n'})] \exp[-j2\pi f_y (y_{sm} - y_{s m'})], \quad (14)$$

对于 $\langle A_{nm} A_{n'm'} \rangle$ 可以写为

$$\langle A_{nm} A_{n'm'} \rangle = \langle (A_0 - q_{nm})(A_0 - q_{n'm'}) \rangle = A_0^2 - A_0(\langle q_{nm} \rangle + \langle q_{n'm'} \rangle) + \langle q_{nm} q_{n'm'} \rangle, \quad (15)$$

由概率知识可得到

$$\langle q_{nm} q_{n'm'} \rangle \begin{cases} 2/\mu^2, & n = n', m = m' \\ 1/\mu^2, & \text{others} \end{cases} \quad (16)$$

将(15)式和(16)式代入(14)式中整理得到

$$\bar{I}_{\text{array}} \propto \frac{1}{\lambda^2 z^2} |\mathcal{F}\{U(x_s, y_s)\}|^2 \left[\left(A_0 - \frac{1}{\mu}\right)^2 \frac{\sin^2(\pi N d_x f_x)}{\sin^2(\pi d_x f_x)} \frac{\sin^2(\pi M d_y f_y)}{\sin^2(\pi d_y f_y)} + \frac{NM}{\mu^2} \right]. \quad (17)$$

图 7 为 μ 取不同值时, 2×2 路相干阵列远场光强分布图(具体参数为 $A_0 = 1 \text{ W}$, $\omega_0 = 3 \text{ mm}$, $z = 100 \text{ m}$, $N = M = 2$, $d_x = d_y = 10 \text{ mm}$, $\lambda = 1064 \text{ nm}$)。

图 8 为相干组束后的远场光束中心强度与理相相干情况下远场光束中心强度比值 I/I_0 与 μ 取值之间的关系曲线图, 图 9 为取理想情况下光束中心光斑尺寸的环围功率比 BQ 与 μ 之间的关系曲线图, 从图 8 和图 9, 可以看到随着 μ 值变大, 即振幅的抖动幅度变小, 振幅越接近于最值 A_0 , 远场相干光强分布中各级光斑轮廓逐渐清晰, 即对比度越接近于 1, 中心峰值光强逐渐变大, 中心光斑区域内的功率所占比率逐渐增大, 图形更趋向于理想相干光强分布, 通过计算可以知道, 当振幅的抖动幅度不超过振幅的 10% 时, 可以得到很好的远场相干图形, 以及较高的峰值光强。

5 出射激光偏振轴变化对相干合成的影响

单模光纤中的基模光是线偏振光, 当光纤的纤芯是理想圆形且传播轴为直线、无外力、不弯曲的情况下, 其形状对中心轴为理想对称的, 这时 x 轴处 y 轴传播常数相等(即简并)。但是, 实际的光纤中, 光纤的纤芯难以做成理想的圆形, 并且沿传播方向的弯曲与外力强度及方向均是变化的, 会产生弹光效应, 所以双折射主轴方向及双折射率与传播方向均不想同。并且由于温度等因素的影响, 双折射也随时变化。这样, 经长距离传输后, 从单模光纤输出光的偏振态将随时间缓慢变化, 主轴方向也不断变化^[14,15]。

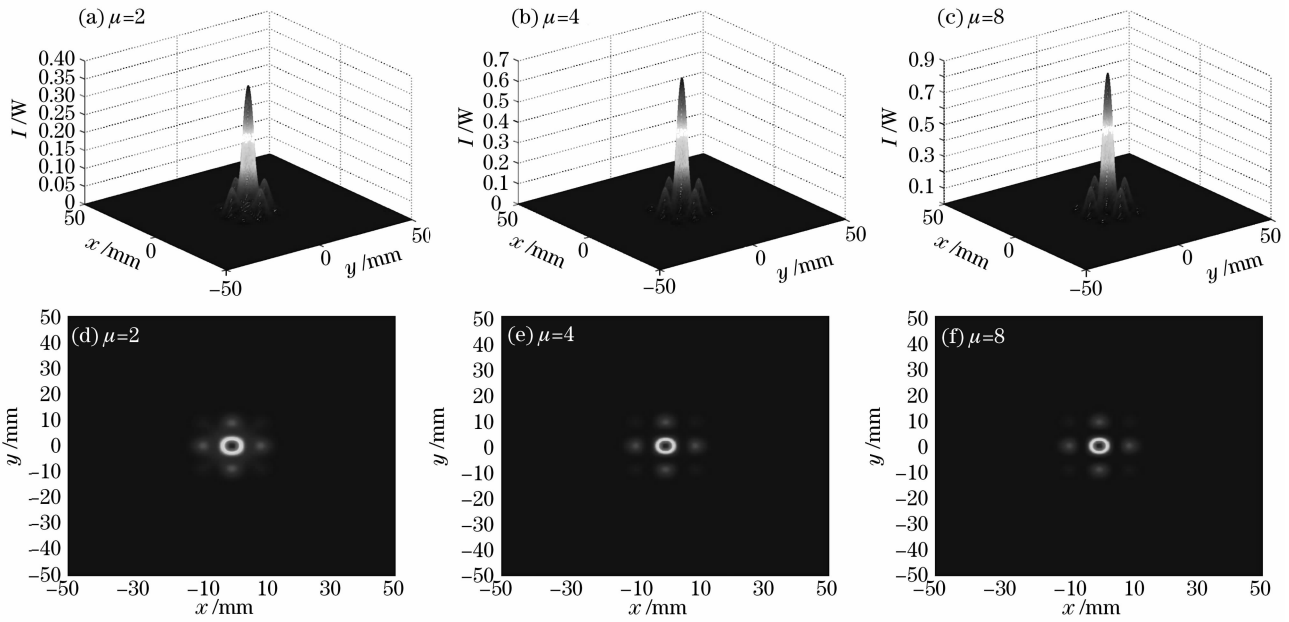


图 7 不同 μ 下 2×2 路相干阵列远场光强分布三维图(a)~(c)和二维图(d)~(f)

Fig. 7 3-D [(a)~(c)] and 2-D [(d)~(f)] far-field intensity distribution of 2-D 2×2 coherent laser array with different μ

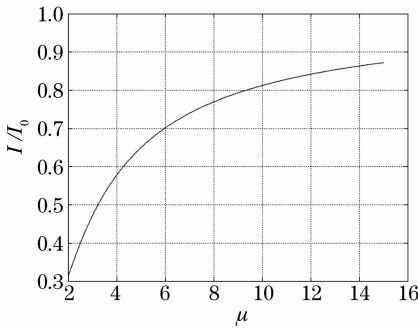


图 8 I/I_0 与 μ 的曲线图

Fig. 8 Dependence of I/I_0 on μ

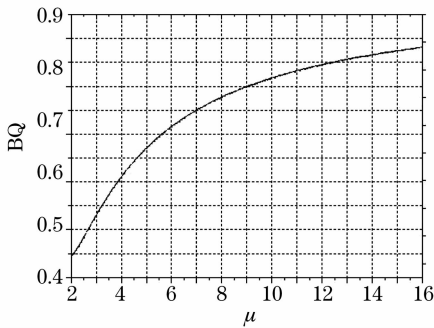


图 9 BQ 与 μ 的曲线图

Fig. 9 Dependence of BQ on μ

都应是偏振态一致。但是实际中,各个子光束在传输过程中在任意距离和任意时刻,很难保证偏振态都是一致的。因而在实际相干组束实验中,为了便于控制子光束的偏振态,一般采用保偏光纤作为增益介质的光纤激光器,即使这样,子光束的偏振方向还是受到各种因素的影响,还是会出现偏振方向抖动。为了便于分析和讨论光束的偏振方向不同对相干组束的影响,在这里做如下设定,首先假定每个子光束都是线偏振光,振幅幅值均为 A_0 ,偏振方向为 x 轴方向,受环境等其它因素影响,某一时刻其偏振方向与 x 轴正向的夹角为 θ_{mn} , θ_{mn} 变化范围为 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$,在这个范围内服从均匀分布,它的分布函数为

$$P(\theta_{mn}) = \begin{cases} 0, & \theta_{mn} < \theta_{\min} \\ \frac{\theta_{mn} - \theta_{\min}}{\theta_{\max} - \theta_{\min}}, & \theta_{\min} \leq \theta_{mn} < \theta_{\max} \\ 1, & \theta_{\max} \leq \theta_{mn} \end{cases} \quad (18)$$

那么对于每路激光器的出射振幅分布应当写为

$$U_m(x_s, y_s) = \iint \mathbf{A}_{mn} \exp\left[-\frac{(x_s - a)^2 + (y_s - b)^2}{\omega_0^2}\right] \times \delta(a - x_{sn}, b - y_{sm}) da db, \quad (19)$$

式中

理想的相干组束中的各个子光束在光束传输中

$$\mathbf{A}_{mm} = A_0(\mathbf{x}\cos\theta_{mm} + \mathbf{y}\sin\theta_{mm}),$$

$$I_{\text{array}}(f_x, f_y, z) = U_{\text{array}}(f_x, f_y, z)U_{\text{array}}^*(f_x, f_y, z) \propto \frac{1}{\lambda^2 z^2} |\mathcal{F}\{U_0(x_s, y_s)\}|^2 \times \quad (20)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{n'=1}^N \sum_{m'=1}^M \mathbf{A}_{mn} \mathbf{A}_{n'm'} \exp[-j2\pi f_x(x_{sn} - x_{sn'})] \exp[-j2\pi f_y(y_{sm} - y_{sm'})],$$

(20)式远场光强分布的瞬时表达式,由(20)式可以得到平均光强分布的表达式为

$$\bar{I}_{\text{array}} = \langle I_{\text{array}}(f_x, f_y, z) \rangle \propto \frac{1}{\lambda^2 z^2} |\mathcal{F}\{U_0(x_s, y_s)\}|^2 \times \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{n'=1}^N \sum_{m'=1}^M \langle \mathbf{A}_{mn} \mathbf{A}_{n'm'} \rangle \exp[-j2\pi f_x(x_{sn} - x_{sn'})] \exp[-j2\pi f_y(y_{sm} - y_{sm'})], \quad (21)$$

对于 $\langle \mathbf{A}_{mn} \mathbf{A}_{n'm'} \rangle$ 可以写为

$$\langle \mathbf{A}_{mn} \mathbf{A}_{n'm'} \rangle = \langle A_0^2(\mathbf{x}\cos\theta_{mn} + \mathbf{y}\sin\theta_{mn})(\mathbf{x}\cos\theta_{n'm'} + \mathbf{y}\sin\theta_{n'm'}) \rangle = \begin{cases} A_0^2, & n = n', m = m' \\ \frac{2 - 2\cos(\theta_{\max} - \theta_{\min})}{(\theta_{\max} - \theta_{\min})^2} A_0^2, & \text{others} \end{cases} \quad (22)$$

所以远场观察到的光强分布为

$$\bar{I}_{\text{array}} \propto \frac{A_0^2}{\lambda^2 z^2} |\mathcal{F}\{U(x_s, y_s)\}|^2 \left\{ \left[\frac{2 - 2\cos\Delta}{\Delta^2} \right] \frac{\sin^2(\pi N d_x f_x)}{\sin^2(\pi d_x f_x)} \frac{\sin^2(\pi M d_y f_y)}{\sin^2(\pi d_y f_y)} + NM \left[1 - \frac{2 - 2\cos\Delta}{\Delta^2} \right] \right\}, \quad (23)$$

式中 $\Delta = \theta_{\max} - \theta_{\min}$ 。

图10为 Δ 取不同值时, 2×2 路相干阵列远场光强分布图(具体参数为 $A_0 = 1 \text{ W}$, $\omega_0 = 3 \text{ mm}$, $z = 100 \text{ m}$, $N = M = 2$, $d_x = d_y = 10 \text{ mm}$, $\lambda = 1064 \text{ nm}$)。

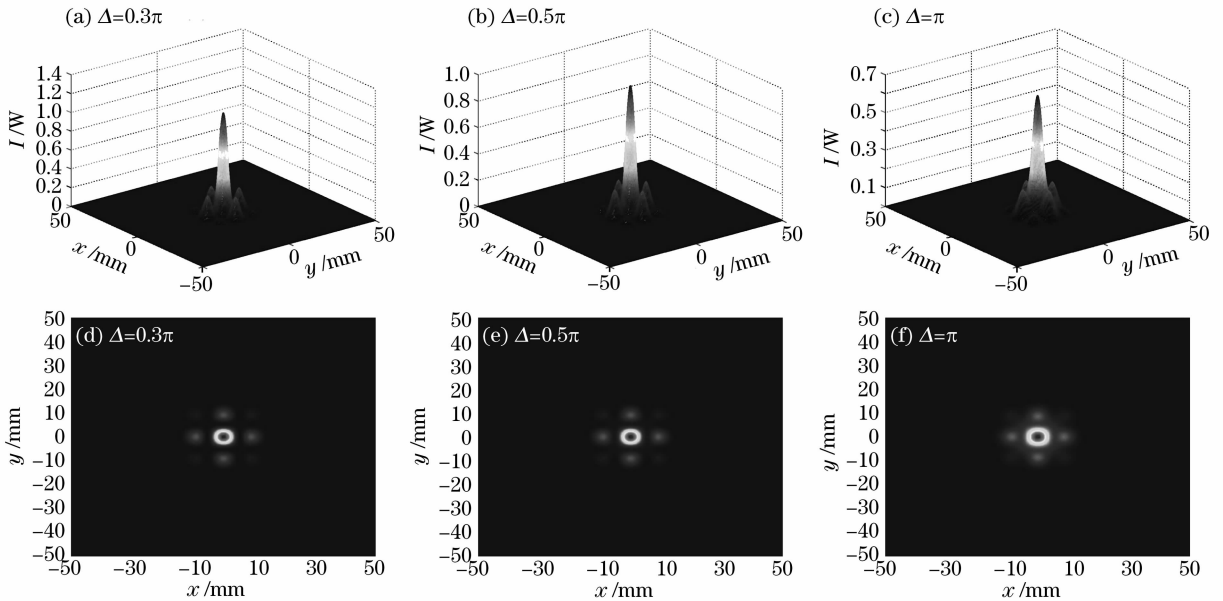
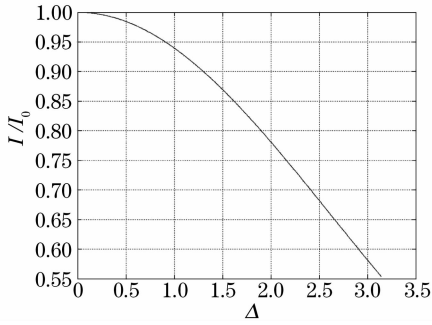
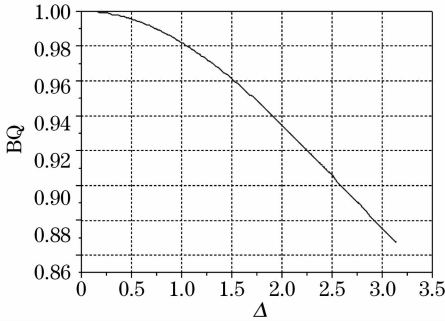


图10 不同 Δ 下 2×2 路相干阵列远场光强分布三维图(a)~(c)和二维图(d)~(f)

Fig. 10 3-D [(a)~(c)] and 2-D [(d)~(f)] far-field intensity distribution of coherent laser array with different Δ

图10为取不同 Δ 值时,相干合成光束远场光强分布,可以看到当 Δ 值变大时,虽然光强分布没有明显变化,但是轮廓变模糊,即对比度变小,光束质量也随之变差。图11为相干组束后的远场光束中心强度与理想相干情况下远场光束中心强度比值 I/I_0 与 Δ 取值之间的关系曲线图,图12为取理想情况下光束中心光斑尺寸的环围功率比BQ与 Δ 之

间的关系曲线图,从图11和图12,可以看到,当偏振方向抖动对光强分布的中心峰值功率和中心光斑区域内的功率影响,随着偏振抖动范围变大而变小,当 $\Delta = \pi$ 时,中心峰值功率为 $\Delta = 0$ 时的55.4%。可见对于光束的偏振方向抖动需要进行严格的控制,才能保证相干组束的效果。

图 11 I/I_0 与 Δ 的曲线图Fig. 11 Dependence of I/I_0 on Δ 图 12 BQ 与 Δ 的曲线图Fig. 12 Dependence of BQ on Δ

6 结 论

相干组束中的光纤激光器,由于光纤自身受到内部不稳定性等众多不可控制因素的影响,以及制作光纤过程引入的缺陷,环境影响,均会引起出射激光的相位、振幅和偏振态的扰动,从而不能保证每路光纤激光器出射激光相位、振幅和偏振态的一致,最终影响相干组束后效果。这里分别讨论分析了出射光束的相位、振幅和偏振态的扰动对相干合成光束的远场光强分布的影响,给出了数学分析结果,并用计算机进行了模拟。结果表明,相位抖动和振幅抖动对相干合成光束的远场光强分布和对比度会产生很大的影响,光束中心峰值功率和光束中心光斑尺寸的环围功率比也会降低,光束质量也随之变差;偏振态的抖动对相干组束后的光强分布影响不是很大,但对对比度有较大影响,光束中心峰值功率和光束中心光斑尺寸的环围功率比也会降低,光束质量也随之变差。所以在利用光纤激光器进行相干组束

的实验中,每路光纤激光器要采用型号参数一致的光纤,调整每路激光器使之出射激光特性参数尽量保持一致,同时要保证实验环境的稳定,减少各种可能存在的因素,才能确保得到高质量的相干合成激光束。

参 考 文 献

- 1 Qihong Lou, Jun Zhou, Bing He *et al.*. Fiber lasers and their coherent beam combination[J]. *Optics & Photonics News*, 2008, **19**: 46~51
- 2 Adrian Carter, Bryce Samson. New technology advances applications for high-power fiber lasers [J]. *Military & Aerospace Electronics*, 2005, **16**(7): 16~21
- 3 Jay W. Dawson, Michael J. Messerly, Raymond J. Beach *et al.*. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 13240~13266
- 4 Bing He, Qihong Lou, Jun Zhou. High power coherent beam combination from two fiber lasers [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2721~2726
- 5 Akira Shirakawa, Keigo Matsuo, Ken-ichi Ueda. Fiber laser coherent array for power scaling, bandwidth narrowing, and coherent beam direction control [C]. *SPIE*, 2005, **5709**: 165~174
- 6 Jianfeng Li, Kailiang Duan, Yishan Wang *et al.*. High-power coherent beam combining of two photonic crystal fiber lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(11): 888~890
- 7 Erik J. Bochove, Christopher J. Corcoran. In-phase supermode selection in a multicore fiber laser array by means of a self-Fourier external cavity[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 5009~5017
- 8 Agnes Desfrages-Bertheleot, Vincent Kermene, David Sabourdy *et al.*. Coherent combining of fibre lasers[J]. *C. R. Physique*, 2006, **7**: 244~253
- 9 E. J. Bochove, P. K Cheo, G. G King. Self-organization in a multicore fiber laser array[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**: 1200~1202
- 10 Zhou Pu, Hou Jing, Chen Zilun *et al.*. Comparison for coherent combining and spectrum combining of fiber lasers[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(4): 413~416
- 11 周 朴,侯 静,陈子伦 等. 光纤激光相干合成与谱合成的比较[J]. *激光技术*, 2008, **32**(4): 413~416
- 12 C. D. Nabors. Effects of phase errors on coherent emitter arrays [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(12): 2284~2489
- 13 D. S. Elliott, Rajarshi Roy, S. J. Smith. Extracavity laser band-shape and bandwidth modification [J]. *Phys. Rev. A*, 1982, **26**(1): 12~18
- 14 A. E. Siegman. How to (may be) measure laser beam quality [J]. *OSA TOPS*, 1998, **17**(2): 184~199
- 15 G. P. Agrawal. Principle and Applications of Nonlinear Fiber Optics[M]. Beijing: Academic Press, 2001. 130~131
- 16 G. P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. 130~31
- 17 Kokubun Y. Optical Wave Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 169~170
- 18 国分泰雄. 光波工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 169~170