

二维激光相干组束系统光束质量的评价与测量

李 震^{1,2} 薛宇豪^{1,2} 周 军¹ 何 兵^{1*} 刘 驰^{1,2} 漆云凤¹ 董景星¹
魏运荣¹ 楼祺洪¹ 潘志勇³

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100049; ³ 中国电子科技集团公司第二十三研究所, 上海 201900)

摘要 以光束质量(BQ)作为二维激光相干组束系统输出激光光束质量的评价因子,对相干组束系统的光束质量进行了实验研究。利用光反馈环形腔被动相位锁定技术,搭建了二维 4 路光纤激光相干组束的实验平台,实现了 4 路光纤激光的相干组束。当选取理想光束口径为近场子光束外切圆直径时,以圆形平顶光束或高斯光束作为理想光束模型,对应不同的远场光斑桶尺寸,分别进行了 BQ 测量。结果表明,BQ 定义中理想光束模型的选择对 BQ 影响较小,而远场光斑桶尺寸的选取对 BQ 影响较大。对于不同相干组束系统的 BQ 评价,需要在明确 BQ 定义的情况下进行。

关键词 激光器;光纤激光;相干组束;光束质量

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0402002

Evaluation and Measurement for Beam Quality of Coherent Beam Combination of Lasers in Two-Dimensional Distribution

Li Zhen^{1,2} Xue Yuhao^{1,2} Zhou Jun¹ He Bing¹ Liu Chi^{1,2} Qi Yunfeng¹
Dong Jingxing¹ Wei Yunrong¹ Lou Qihong¹ Pan Zhiyong³

¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques,
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ No. 23 Research Institute of China Electronic Technology Corporation Group, Shanghai 201900, China

Abstract Beam quality (BQ) of the coherent beam combination system of lasers in two-dimensional distribution is studied with BQ as the evaluation factor for beam quality of the output laser. By using passive phase locking technology with optical feedback in a ring cavity, the experimental setup of coherent beam combination of four lasers in two dimensions is built, and the combination of four fiber lasers is realized. When the diameter of ideal beam is selected as the circumscribed circle diameter of sub-beams in near-field, circular flat-topped beam or Gaussian beam is taken as the ideal beam model. Corresponding to different bucket sizes of laser spot in far-field, BQs are measured separately. The results show that, the selection of ideal beam model in the definition has little effect on BQ, but the selection of bucket size of laser spot in far-field has greater impact on BQ. The BQs of different coherent beam combination systems should be evaluated with a clear definition of BQ.

Key words lasers; fiber laser; coherent beam combination; beam quality

OCIS codes 140.3510; 140.3295; 140.3298

收稿日期: 2010-10-18; 收到修改稿日期: 2010-11-30

基金项目: 国家 863 计划(2008AA03Z405)、国家自然科学基金(60908011, 60907045)和上海市科技启明星基金(09QB1401700)资助课题。

作者简介: 李 震(1986—),男,博士研究生,主要从事高功率光纤激光器、光纤放大器等方面的研究。

E-mail: lznkgx@163.com

导师简介: 周 军(1972—),男,博士,研究员,主要从事高功率光纤激光器、光纤放大器等方面的研究。

E-mail: junzhousd@mail.siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: bryanho@mail.siom.ac.cn

1 引 言

近年来,随着半导体激光抽运技术和双包层光纤制作工艺的提高,光纤激光器的输出功率迅速提升。IPG 公司已于 2009 年实现了单根光纤 10 kW 的输出^[1]。由于受到光纤中的非线性效应等效应的限制,单根光纤的输出功率不可能无限提高^[2]。因此,多路光纤激光的相干组束技术得到了国内外研究者的广泛重视^[3~8]。光束质量(BQ)是高功率光纤激光器的一个重要性能指标。相干组束技术可以在提高总输出功率的同时保证较好的光束质量。

对于相干组束获得的典型非高斯型光束,利用 M^2 因子评价其光束质量可能导致组束光束越多反而光束质量越差,利用 Strehl 比则不能反映不同占空比情形下组束光束质量的差异^[9]。诺格公司在其固体激光相干组束实验中引入 BQ 来评价光束质量^[10]。BQ 专门用于评价目标处强激光的光束质量,把光束质量和功率密度联系起来,直接反映激光束在目标靶面上的能量集中度,BQ 是从工程应用的角度描述光束质量,对强激光与目标的能量耦合和破坏效应的研究有实际意义^[11]。当关注高功率激光器输出激光的能量集中度等特性时,可选用 BQ 来评价。光束传输因子(BPF)也是一种高能激光光束质量的评价标准,它可以根据 BQ 来换算得到^[12]。而在目前国内外研究中,存在着对 BQ 的不同定义^[13,14],BQ 测量时所选用的远场光斑桶尺寸不同会对测量结果产生影响。

本文对二维光纤激光相干组束系统的 BQ 进行了实验研究。采用光反馈环形腔被动相位锁定技术,实现了 4 路二维光纤激光的相干组束,实验测量了其输出激光的 BQ。分析了 BQ 定义中的理想光束模型以及远场光斑桶尺寸的选取对 BQ 测量结果的影响。

2 BQ 的定义与测量方法

BQ 为桶中功率比,也称环围能量比或靶面上功率比。其定义为规定桶尺寸内理想光斑环围功率(或能量)与相同桶尺寸内实际光斑环围功率(或能量)比值的算术平方根,即将 BQ 定义为 $\sqrt{P_{\text{ideal}}/P_{\text{real}}}$ 或 $\sqrt{E_{\text{ideal}}/E_{\text{real}}}$ ^[13]。诺格公司将激光 BQ 定义为 $\sqrt{f_{\text{DL}}/f}$ ^[14],其中 f_{DL} 为理想近衍射极限、光束直径为 D 的光束在发散角(半角)为 λ/D 内功率与出射功率的比值;诺格公司将理想近衍射极限光束定义为平顶光束。 f 为待测实际激光光束在发散角(半角)为 λ/D 内功率与该激光光束出射功率的比值。

这里的 λ 为待测激光波长, D 为待测激光光束在近场的直径。实际上,由于诺格公司的定义式中分子分母都是针对激光光束出射功率的比值,因此与 BQ 的一般定义在本质上是一致的。诺格公司定义式中所取的远场光斑桶尺寸半径为 $\lambda L/D$, L 为光束传输距离。但根据理想均匀平面波的圆孔衍射^[15],可以取艾里斑半径 $1.22\lambda L/D$ 作为远场光斑桶尺寸。在相干组束系统中,激光 BQ 可以反映出中心光斑的能量集中度,BQ 越小,中心光斑所占的能量比例就越大。定义光束占空比等于子光束直径与相邻两子光束的间距,中心光斑所占的能量比例与光束占空比有关。以圆形平顶光束为理想光束,艾里斑半径为远场光斑桶尺寸,对于 4 束激光以 2×2 正方形排列,假定子光束均为高斯光束,在实现锁相的情况下,图 1 为理论计算的 BQ 与光束占空比的关系曲线。当光束占空比越大(对应子光束之间间距越小),组束输出激光的 BQ 越小。实际上,当光束占空比越大时,组束后的光斑图样中的中心光斑所占的能量比例也越大。

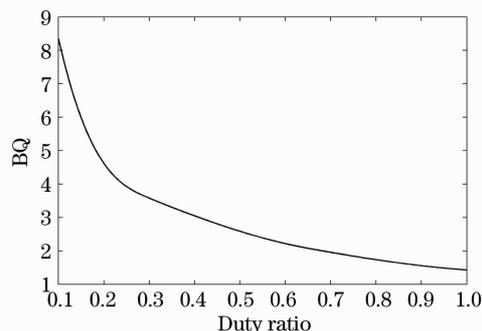


图 1 BQ 与光束占空比的关系曲线

Fig. 1 Relation curve of BQ versus duty ratio

BQ 与 f_{DL} 和 f 两个参量有关。这两个参量都涉及到远场光斑桶尺寸,因此需要先确定出激光波长 λ 和激光光束近场直径 D 。实验中采用掺镱光纤,系统输出的相干合成激光光束波长 λ 约为 1080 nm。对于实验中 4 路光纤激光的相干组束,4 路光束成正方形对称排布。如图 2 所示,待测激光光束在近场的直径 D 可以用图中虚线圆的直径近似表示。如图 3 所示,实验利用一个可变光阑来确定 D 。从大到小改变可变光阑的直径,由于一开始光阑直径足够大,随着光阑直径的减小,透过的激光功率基本不变。当光阑直径减小到使 4 路光束刚好能够全部通过光阑时,可变光阑的直径即为待测的 D 。

f_{DL} 是一个理论计算值。对于理想近衍射极限、光束直径为 D 的圆形平顶光束,其相应的数学模型

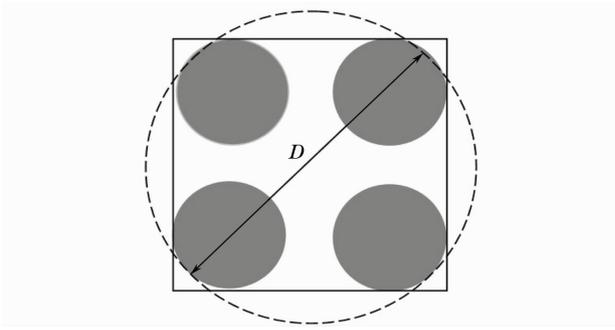


图2 激光光束近场直径

Fig. 2 Near-field diameter of laser beam

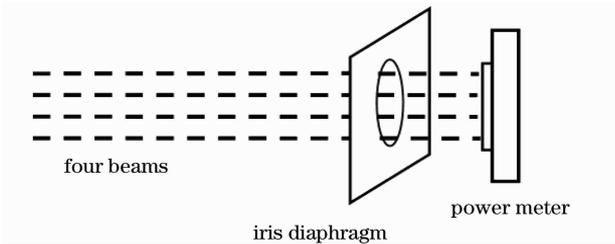


图3 激光光束近场直径的测量方法

Fig. 3 Measurement method for near-field diameter of laser beam

表示为^[16]

$$\text{circ}\left(\frac{2\sqrt{x^2+y^2}}{D}\right) = \begin{cases} 1, & \sqrt{x^2+y^2} \leq \frac{D}{2} \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (1)$$

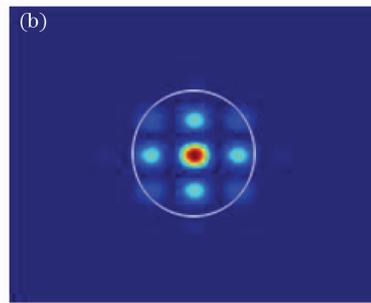
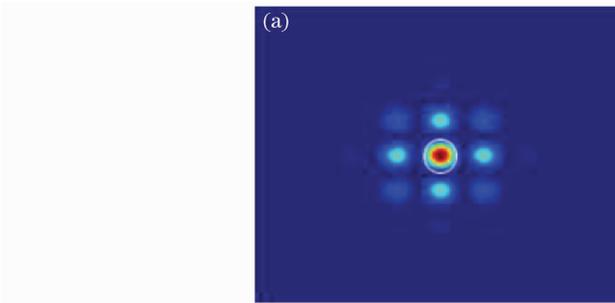


图4 理论模拟远场光斑。(a)圆圈半径取“桶”半径,(b)圆圈半径取整个光斑半径

Fig. 4 Theoretical beam patterns in far-field. (a) circle radius equal to the “bucket” radius, (b) circle radius equal to the radius of whole beam pattern

3 实验测量结果与分析

所搭建的环形腔被动锁相二维4路光纤激光相干组束的实验装置如图5所示。4路光纤放大链路中所用的光纤放大器均采用掺镱光纤,依次为瓦级光纤放大器,30 W 光纤放大器和300 W 光纤放大器。其中瓦级光纤放大器增益介质采用的是5/130 μm掺镱光纤;30 W 光纤放大器增益介质采用的是20/400 μm 双包层掺镱光纤;300 W 光纤放大器增益介质采用30/400 μm 双包层掺镱光纤。每路放

利用傅里叶变换^[16]

$$\mathcal{F}[\text{circ}(r)] = \frac{1}{2\pi\rho^2} \int_0^{2\pi\rho} r' J_0(r') dr' = \frac{J_1(2\pi\rho)}{\rho}, \quad (2)$$

将其变换到远场,得出远场处光场分布,其中 J_1 是第一阶第一类贝塞尔函数, $r' = 2\pi r\rho$, ρ 为远场平面极坐标表示的变量。计算出与艾里斑对应的发散角内的功率与出射功率的比值即为 f_{DL} ,这里的出射功率即为整个光斑所对应的光功率。

f 由实验测量得到。实验中利用焦距为 F 的傅里叶透镜将激光光束变换到远场。将CCD置于其焦点位置进行观测,获取CCD监测到的光斑图样。图4为理论模拟的相干组束光斑图样,在此光斑图样中选用一个与艾里斑同样大小的圆圈,使得该圆圈尽量覆盖光斑图样的中心亮斑。如图4(a)所示,该圆圈内所包含的总强度记为 P_0 ,将该圆圈的直径记为 d_0 。测量中心光斑的中心最大强度值,由光强降落到中心强度值的 $1/e^2$ 的点所确定的范围为光斑半径。由于组束光斑有多个光强极小值存在,该中心强度值的 $1/e^2$ 的点要在尽可能远离中心的位置选取。以确定出的光斑半径为半径,在CCD中选用一个较大的圆圈,如图4(b)所示,其直径记为 d 。该较大的圆圈内包含的总强度记为 P ,则 $f = P_0/P$ 。

大器中均连接有光隔离器,以避免后向自激振荡激光的影响。每条光纤放大链路的输出光束经焦距为 $f_m = 5.8$ cm的准直透镜后准直输出。为了使得4束激光光束相互之间足够靠近,采用如图5所示的光束拼接系统,即利用反射镜使光束再次排列,实验中对对应的光束占空比为0.88。在经过分光比为10:90的分束片之后,能量较小的那一部分通过焦距为25 cm的傅里叶透镜后被单模光纤(6/125 μm)收集。通过一个50:50分束器后,使用功率计监测一部分反馈信

号光,以便于实验中光耦合的调节。另一部分反馈信号光首先经过一个小功率的光纤放大器进行放大,接着通过 2×1 的波分复用器(WDM)耦合进入一个预放大器。WDM的另一端连接的是一个 1064 nm 的激光二极管(LD)种子源。在实验中需要仔细调节 4 束激光光束经傅里叶透镜耦合到单模光纤,在调节过程中,可能遇到耦合效率较低而没有信号光返回,此时该 1064 nm 的 LD 种子源可以避免各级放大器自激振荡而损坏。当实验中调节到有反馈信号光返回后,可以减小该 LD 种子源的输出功率直

至完全关闭。这里预放大器的作用是增强信号光的功率以使其分别进入 4 条链路后仍可以保证足够的功率。在预放大器之后,反馈光通过另一根单模光纤($6/125 \mu\text{m}$)耦合注入回各放大链路。实验中采用了 3 个 50:50 的一分二耦合器使得反馈光分别注入到 4 条放大链路。整个组束系统的输出激光为经过 10:90 分束片之后能量较大的那一部分。实验中采用另外一个分束片分出一部分激光以供 CCD(型号为 Spiricon SP620U)来监测,傅里叶透镜 L 的焦距 F 为 40 cm。

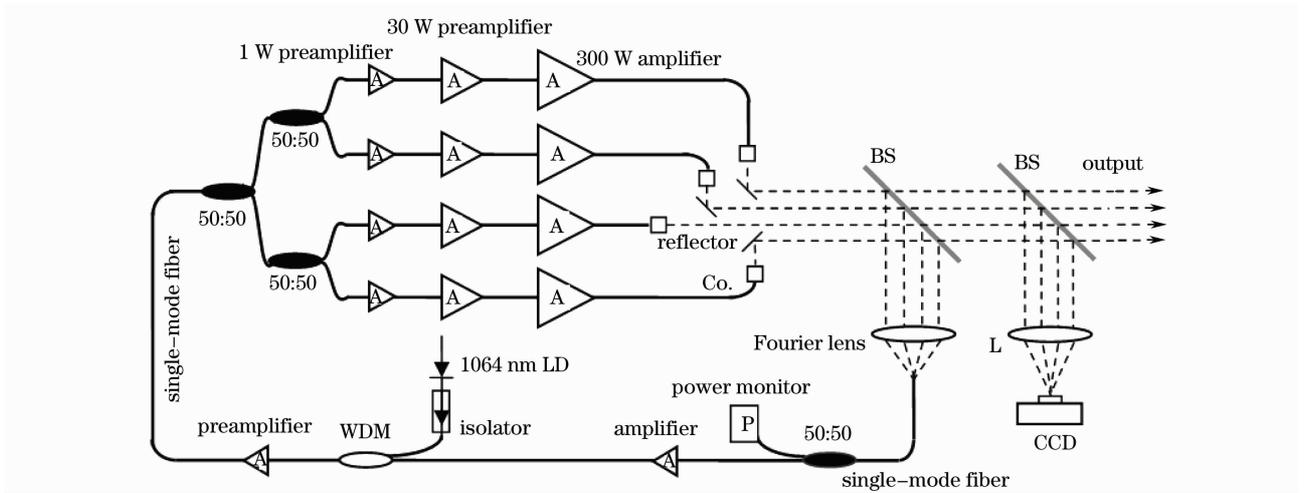


图 5 实验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

利用 CCD 观测远场干涉图样。实验中测量得到激光光束近场直径 $D=18 \text{ mm}$, CCD 位置处所对应的艾里斑直径为 $58.6 \mu\text{m}$ 。利用 CCD 监测相干组束后的光斑图样。图 6 为输出功率 46 W 时的远

场光斑图样,其中心亮斑的相干对比度为 0.75。在 CCD 的操作软件(Spiricon LBA-USB-SP Software Version 4.83)中选用一圆圈,如图 6(a)所示。该圆圈直径按照 $58.6 \mu\text{m}$ 来选取,实验中 CCD 软件里

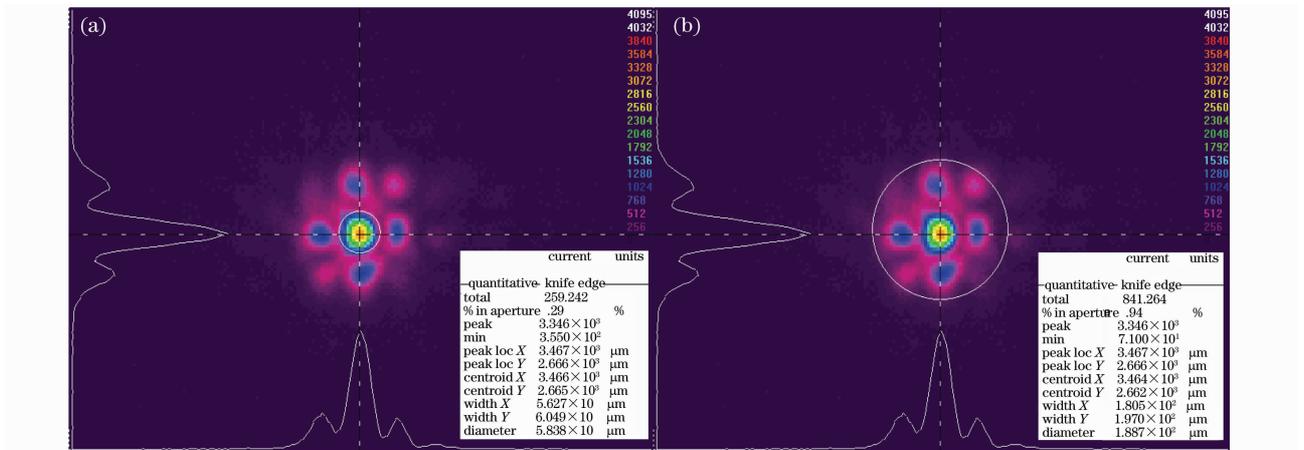


图 6 远场光斑图样及相关测量数据

Fig. 6 Beam patterns and measured data in far-field

实际取用的圆圈直径为 $58.4 \mu\text{m}$ ，基本覆盖了光斑图样中的中心亮斑，圆圈所包含的总强度记为 P_0 ，从图 6(a) 可见 $P_0 = 259$ 。找出中心光斑的中心最大强度值，则整个光斑的光斑半径为尽可能远处强度为中心强度值 $1/e^2$ 的点到光斑中心的距离。由此确定出 CCD 中用以覆盖整个组束光斑图样的大圆圈直径大小。大圆圈内所包含的总强度记为 P ，从图 6(b) 可见 $P = 841$ 。由 $f = P_0/P$ 得到 $f = 0.3080$ ， f_{DL} 由理论计算得出， $f_{\text{DL}} = 0.9257$ 。因此 BQ 为 1.73。

若依照诺格公司对远场光斑桶尺寸的原始定义，选用 $\lambda L/D$ 作为远场光斑桶尺寸，对应 $f_{\text{DL}} = 0.9150$ 。CCD 位置处 λ/D 发散角(半角)对应的桶直径为 $2\lambda F/D = 48.0 \mu\text{m}$ 。通过上述类似的步骤，对 BQ 进行重新测量，得 BQ 为 1.94。值得注意的是，由于远场光斑桶尺寸的减小也会使得 f_{DL} 减小，但由于随着远场光斑桶尺寸的减小，实际光束的桶内功率也在减少，实验测量结果表明 BQ 在远场光斑桶尺寸减小时会增大。

以上 BQ 的测量结果是在选取圆形平顶光束作为理想光束的模型时所得到的，但实际中高斯光束更为常见，并且 Siegman 的 M^2 因子理论中也选取基模高斯光束作为理想光束^[13]。研究测量了选取高斯光束作为理想光束模型时的 BQ。理想光束模型选取的差异将会导致 f_{DL} 的差异。对于高斯光束，有^[16]

$$\text{Gaus}(\sqrt{x^2 + y^2}) = \exp[-\pi(x^2 + y^2)], \quad (3)$$

其傅里叶变换仍为高斯函数^[16]，

$$\text{Gaus}(\sqrt{f_x^2 + f_y^2}) = \exp[-\pi(f_x^2 + f_y^2)]. \quad (4)$$

通过数值计算，对于实验中的参数，当选取高斯光束作为理想光束时 $f_{\text{DL}} = 0.9452$ 。类似的实验测量可得 BQ 为 1.75。该情况下若选用 $\lambda L/D$ 作为远场光斑桶尺寸，相应的 $f_{\text{DL}} = 0.8698$ ，实验测量 BQ 为 1.89。实验中，BQ 的测量是在理想光束的口径选取近场子光束外切圆直径下所进行的。若选取理想光束为与实验排列相对应的理想化子光束排列，测量得到的 BQ 通常较小^[17]，但不能有效反映光束占空比不同情况下的 BQ 差异。

在更高的功率水平下进行相干组束实验并对输出激光的 BQ 进行测量。图 7, 8 分别为输出功率为 140 和 569 W 时的组束光斑图样。在输出功率为 140 和 569 W 时，中心亮斑的相干对比度分别为 0.71 和 0.44。在光反馈环形腔被动相位锁定实验

方案中，除光束占空比对组束输出激光的 BQ 有较大影响外，在实验中还需要精确调节单模反馈光纤的位置，以使得干涉光场中的同相模成分恰好耦合到纤芯中从而注入回每一路光纤放大器中，同相模成分获得较高的增益形成振荡而实现较好的锁相结果^[18]。当输出功率增加到一定程度时，由于高功率情况下的热效应会导致准直输出镜等处产生抖动，从而影响激光光束的稳定，使得组束后中心亮斑的相干对比度下降，BQ 产生恶化。若改进热管理方案，可在一定程度上改善高功率情形下的 BQ。

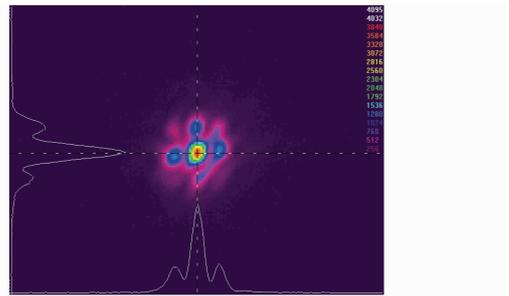


图 7 输出功率为 140 W 时的组束光斑图样

Fig. 7 Combination beam patterns at 140 W output power

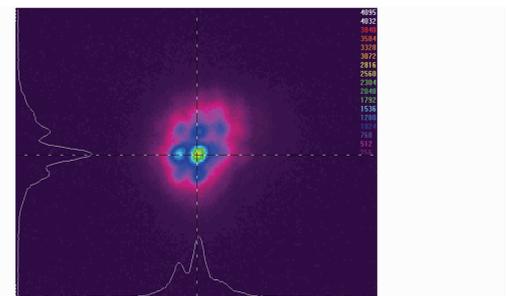


图 8 输出功率为 569 W 时的组束光斑图样

Fig. 8 Combination beam patterns at 569 W output power

按照上述 BQ 测量方法，对理想光束分别选取圆形平顶光束或高斯光束，远场光斑桶尺寸分别选取艾里斑半径 $1.22\lambda L/D$ 或 $\lambda L/D$ 时 4 种不同条件下的 BQ 进行了测量，测量结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出，当选取理想光束口径为近场子光束外切圆直径时，理想光束模型的选取对 BQ 的影响较小，而远场光斑桶尺寸的选取对 BQ 的影响较大。当选取远场光斑桶尺寸为艾里斑半径 $1.22\lambda L/D$ 时，BQ 比选取远场光斑桶尺寸为 $\lambda L/D$ 时的要小。对于一定的远场光斑桶尺寸，选取圆形平顶光束或高斯光束作为理想光束模型所对应的 BQ 测量值差异很小。

表 1 不同输出功率下对应不同理想光束模型和远场光斑桶尺寸的 BQ 因子测量结果
Table 1 Measurement results of BQ factor corresponding to different ideal beam models or bucket size of laser spot in far-field for different output powers

Output power	46 W		140 W		569 W	
Bucker size of laser spot in far-field	Circular flat-topped beam	Gaussian beam	Circular flat-topped beam	Gaussian beam	Circular flat-topped beam	Gaussian beam
$1.22\lambda L/D$	1.73	1.75	1.64	1.66	2.29	2.32
$\lambda L/D$	1.94	1.89	1.82	1.77	2.49	2.43

4 结 论

提出了一种利用 CCD 及其配套软件简单测量 BQ 的方法并进行了相关实验,搭建二维 4 路环形腔光纤激光被动相干组束实验平台,实现了 4 路二维光纤激光的相干组束,并对其输出激光的 BQ 进行了测量。比较了选取不同的理想光束模型以及不同的远场光斑桶尺寸对测量得到的 BQ 的影响。实验结果表明,当选取理想光束口径为近场子光束外切圆直径时,理想光束模型的选取对 BQ 影响较小,而远场光斑桶尺寸的选取对 BQ 影响较大。由于在选取不同远场光斑桶尺寸的 BQ 定义下,测量所得的 BQ 存在一定差异,因此对于不同相干组束系统光束质量的评价,只有在明确 BQ 定义的情况下才能进行比较。

参 考 文 献

- 1 M. O'Connor, V. Gapontsev, V. Fomin *et al.*. Power scaling of SM fiber lasers toward 10 kW[C]. in Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, 2009.CThA3
- 2 Qihong Lou, Jun Zhou, Bing He *et al.*. Fiber lasers and their coherent beam combination[J]. *Optics & Photonics News*, 2008, **19**(5): 47~51
- 3 C. J. Corcoran, F. Durville. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(20): 201118
- 4 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Coherent output power of 60 W from two large-core double-cladding fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1279~1280
何 兵, 楼 祺 洪, 周 军 等. 两根大芯双包层光纤激光器获得 60 W 相干输出[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1279~1280
- 5 Xue Yuhao, Zhou Jun, He Bing *et al.*. Passive coherent beam combination of four Yb-doped fiber lasers in two-dimensional distribution[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2314~2317
薛 宇 豪, 周 军, 何 兵 等. 四路二维掺镱光纤激光被动相干组束实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2314~2317
- 6 J. Lhermite, A. Desfarges-Berthelemot, V. Kermene *et al.*. Passive phase locking of an array of four fiber amplifiers by an all-optical feedback loop [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32** (13): 1842~1844
- 7 Wang Wei, He Bing, Li Zhen *et al.*. Experimental study on coherent beam combination in lasers array in different duty ratios [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1007~1011
王 炜, 何 兵, 李 震 等. 占空比对相干组束影响的实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1007~1011
- 8 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
- 9 Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun. Study on universal standard for evaluating high energy beam quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 773~778
刘 泽 金, 周 朴, 许 晓 军. 高能激光光束质量通用评价标准的探讨[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 773~778
- 10 G. D. Goodno, H. Komine, S. J. McNaught *et al.*. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(9): 1247~1249
- 11 Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36** (7): 1643~1653
冯 国 英, 周 寿 桓. 激光光束质量综合评价的探讨[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1643~1653
- 12 Pu Zhou, Zejin Liu, Xiaojun Xu *et al.*. Influence of turbulent atmosphere on the far-field coherent combined beam quality [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(9): 625~627
- 13 A. E. Siegman. How to measure laser beam quality [J]. *OSA Trends in Optics and Photonics Series*, 1998, **17**(2): 184~199
- 14 Gregory D. Goodno, Charles P. Asman, Jesse Anderegg *et al.*. Brightness-scaling potential of actively phase-locked solid-state laser arrays[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 460~472
- 15 Zhao Kaihua, Zhong Xihua. Optics [M]. Beijing: Peking University Press, 1984
赵 凯 华, 钟 锡 华. 光学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1984
- 16 Lü Naiguang. Fourier Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2006
吕 乃 光. 傅 立 叶 光 学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006
- 17 Sami A. Shakir, Bill Culver, Burke Nelson *et al.*. Power scaling of passively phased fiber amplifier [C]. *SPIE*, 2008, **7070**: 70700N
- 18 Li Zhen, Zhou Jun, He Bing *et al.*. Coherent beam combination of passive phase locking of an array of three fiber lasers in one dimension by a ring cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3209~3214
李 震, 周 军, 何 兵 等. 环形腔被动锁相一维三路光纤激光相干组束研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3209~3214