

准分子激光靶面焦斑合束研究分析

薛全喜^{1,2} 江少恩¹ 赵学庆² 王哲斌¹ 胡云² 叶锡生² 刘晶儒²

¹ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900
² 西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

摘要 靶面焦斑合束数值模拟研究可为准分子激光角多路系统建设提供重要参考。首先介绍了靶面激光焦斑合束的计算方法,进而基于单束激光焦斑形态和光束指向稳定性开展了 18 束准分子激光靶面合束计算,给出了合束焦斑的形态及评价参数。最后,基于准等熵压缩实验的要求,研究了不同系统成像质量对激光指向稳定性的要求。研究表明:多束激光焦斑合束有利于提高焦斑均匀性;高系统成像质量需要较高的光束指向稳定性来保证合束焦斑的均匀性,否则高系统成像质量的优势得不到体现;系统成像质量较差时,光束指向稳定性处于一定范围内即可,更高的激光指向稳定性对焦斑的均匀性改善不显著。

关键词 激光光学;激光技术;光束平滑;数值计算;不均匀性;正态分布;准分子激光

中图分类号 TN248.21 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0302003

Research and Analysis of Focal Spot Overlapping for Excimer Laser

Xue Quanxi^{1,2} Jiang Shao'en¹ Zhao Xueqing² Wang Zhebin¹ Hu Yun²
Ye Xisheng² Liu Jingru²

¹ Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China
² State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China

Abstract Numerical study on focal spot overlapping can provide important supports for the construction of an excimer laser angular multiplexing system. The simulation methods of focal spots overlapping are introduced first. And then simulations of 18 laser beams overlapping are performed based on single laser beam focal spot profiles and laser pointing stability. Profiles and parameters of overlapped laser focal spot on target surface are given. Finally, the relations between imaging quality and laser pointing stability are studied under the requirements of isentropic compression experiments. Many conclusions are drawn from the study. The uniformity of focal spot can be raised by overlapping. What's more, better beam pointing stability is needed to keep the uniformity when the imaging quality is excellent. Otherwise, the outstanding imaging quality is wasteful. The beam pointing stability can just be within a certain range when imaging quality is common, for the uniformity cannot be improved much by better laser pointing stability.

Key words laser optics; laser technique; laser beam smoothing; numerical calculation; nonuniformity; normal distribution; excimer laser

OCIS codes 140.2180; 140.3295; 140.3298

1 引言

激光加载的准等熵压缩实验要求靶面激光辐照均匀,且时间波形按一定规律缓变上升^[1-6]。准分子激光具有频带宽的特点,利用像传递技术可以实

现优于固体激光的靶面辐照均匀性^[7-9]。另外,准分子激光普遍采用角多路技术来压缩脉宽,光束路数多达几束到几十束^[7-9],容易堆积出理想的激光波形。这些特点使得准分子激光成为优良的准等熵

收稿日期: 2013-06-19; 收到修改稿日期: 2013-10-15

基金项目: 国家重点实验室基金(SKLLIM1006-01)

作者简介: 薛全喜(1980—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事激光技术及激光等离子体等方面的研究。

E-mail: quanxixue@163.com

导师简介: 江少恩(1964—),男,博士,研究员,主要从事激光聚变方面的研究。E-mail: jshn@vip.sina.com

压缩驱动源。但准分子激光系统的某些特点对实验需求有明显影响。最理想的激光焦斑合束是在靶面严格堆积,但采用角多路技术的准分子激光系统中放大级数多且采用了角多路编码、解码技术,单束激光光程往往长于固体装置,达到百米以上,光束指向不稳定容易导致靶面激光焦斑重合度下降,影响焦斑平顶面积比例和均匀性。除此以外,在激光加载的准等熵实验中,为防止侧向稀疏波对实验的影响,要求靶的激光焦斑尺寸远大于靶的厚度,因此,激光焦斑尺寸应尽量大。但相对固体激光装置,目前可用的准分子激光能量小,实验中激光焦斑不宜太大,还应尽量提高激光能量利用率,即提高焦斑中平顶部分所占能量比例。

能否达到上述物理实验要求关键在于激光器系统的成像质量和光束指向稳定性。高的光束指向稳定性对光学元件的支撑、实验室地基等提出了更高要求。另外,高系统成像质量导致光学元件造价可能会高数倍。允许的光轴抖动范围与系统成像质量要求是否有对应关系,更高系统成像质量是否一定具有优势,这些都是系统建设者所关心的。有必要对影响合束焦斑的影响因素开展研究。

在焦斑合束实验研究方面,美国海军实验室的研究最具有代表性,该实验室建有世界上规模最大的准分子激光器——NIKE 装置,该装置的单束及多束合束激光焦斑的实验测量结果被多次报道过。单束放大激光焦斑不均匀因子达到 $1\% \sim 1.4\%$, $37 \sim 40$ 束激光合束后焦斑不均匀因子下降到 $0.2\% \sim 0.25\%$ ^[10]。国内中国原子能科学研究院也在文献中给出了“天光一号”装置的单束焦斑测量结果:靶面种子光不均匀因子为 3.57% ,初级放大后单束焦斑不均匀因子达到 $1.03\% \sim 1.4\%$ ^[11-12],但截至目前,尚未见到靶面焦斑合束数据。在数值模拟方面,国内外均未见相关报道。

目前,在成功开展单路验证工作的基础上^[13-19],西北核技术研究所正基于与俄罗斯大电流所合作研制的长脉冲 XeCl 准分子激光主振荡功率放大(MOPA)系统,采用光学角多路技术和像传递技术开展脉宽压缩和光束平滑工作。建成后,激光束总数多达 18 路,总能量约 100 J,单束光程近 200 m,靶面焦斑直径为 $300 \sim 800 \mu\text{m}$ 可调,将成为国内光束路数最多、指标领先的准分子激光系统。与国内现有的其他大型激光装置相比,该系统光束路数多、焦斑均匀性好且脉宽长,是开展准等熵压缩实验的优良驱动源之一。

基于西北核技术研究所单路验证实验实测焦斑和理想平顶焦斑,开展了 18 束 $800 \mu\text{m}$ 激光焦斑的合束模拟工作,研究了光束指向稳定性和系统成像质量对合束焦斑的影响,并结合准等熵压缩实验的参数要求对计算结果做了分析。

2 计算方法与输入条件

2.1 靶面单束激光焦斑

为验证角多路系统光学设计,实验室开展了单路验证实验。除编码和解码光路外,单路与多路光路基本相同,如图 1 所示。振荡器前级发出的种子光依次被五级放大器放大,最终传输至靶室内部。靶面激光焦斑与前级振荡器出口放置的物孔满足成像关系,更改物孔或部分光学元件的大小可以改变靶上激光光斑的大小。实验中,按 3 mm 的初级物面和 $800 \mu\text{m}$ 焦斑口径布局光学元件。由于靶面焦斑大小远小于 LBA(Laser Beam Analyzer)的 CCD 光敏面尺寸,在靶后位置搭建了放大光路,并对靶面焦斑做了放大测量。实验测得种子光物面光强分布和靶面光强分布如图 2 所示。对比图 2(a)和(b)可知,种子光物面的平顶得到了良好保持,但边缘陡直度下降。用 LBA 的处理软件对图 2(b)进行分析,发现焦斑中心平顶部分直径为 $800 \mu\text{m}$,不均匀因子约为 5% ,底面直径为 $1000 \mu\text{m}$,环带光强近似按三角函数规律衰减。

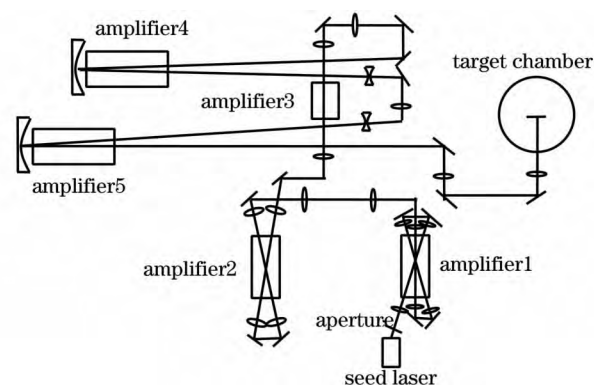


图 1 单路验证实验光路图

Fig. 1 Schematic of single beam laser system

正在建设的角多路系统原理图如图 3 所示,同一种子光被分成 18 束,互成角度按一定时序关系依次通过放大器,并将前一级放大器前像面传递至下一级放大器,直至将该像传输至靶面。由于光学系统在单路基础上做了改进,角多路系统相对单路更加优化,焦斑周围渐变的环带将有所变窄且均匀性应有所提高,即靶面光斑形态优于单路实测焦斑,更加接近于平顶。

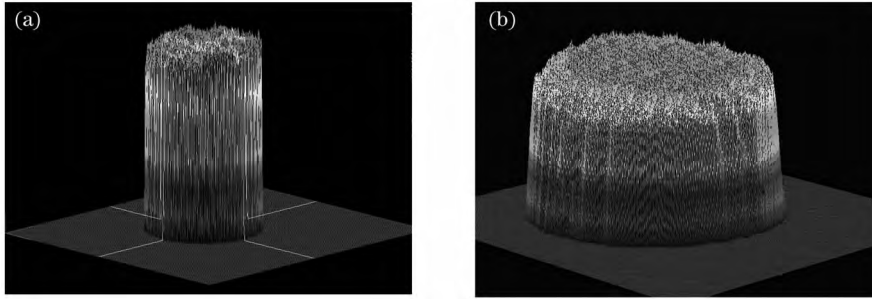


图 2 单路测试结果。(a) 种子光物面光强分布；(b) 靶面焦斑光强分布

Fig. 2 Experimental results of single beam laser system. (a) Seed beam intensity distribution; (b) focal spot on target surface

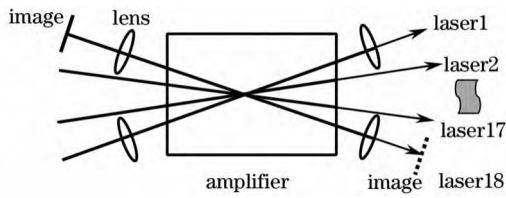


图 3 角多路系统光束平滑与放大技术原理图

Fig. 3 Principle diagram of laser beam smoothing and amplification

需要指出的是,系统种子源经由一台振荡源采用散射匀滑技术优化产生^[12-13],相干性差;除此之外,放大过程中各束激光光路长度不同,且合束时间不完全同步,合束焦斑可认为是各焦斑光强的线性叠加。另外,被放大的激光存在放大自发辐射(ASE)背景,与放大器工作状态相关,此类具体问题在此不做考虑。

2.2 激光光轴的分布概率

单路验证实验中利用测量种子光焦斑重心的方法测量了各级放大器像面焦斑重心的抖动,发现分布概率服从二维正态分布^[19],标准差值与所测像面大小、位置有关。二维正态分布表达式为

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad x, y \in [-\infty, +\infty], \quad (1)$$

式中 x, y 分别为二维焦斑的两个坐标, σ 为光轴位置的标准差。图 4 为 $\sigma = 40 \mu\text{m}$ 时,光轴的分布概率

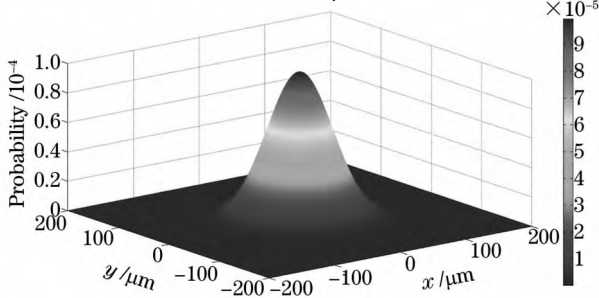


图 4 $\sigma = 40 \mu\text{m}$ 时光轴分布概率

Fig. 4 Laser axis distribution probability as $\sigma = 40 \mu\text{m}$

图。可以算出,光轴落在半径为 $40 \mu\text{m}$ 圆内的概率为 46.6% ,落在半径为 $80 \mu\text{m}$ 圆内的概率为 91.1% 。

2.3 焦斑不均匀性计算

实际应用中,焦斑的不均匀性一般用一定环围能量比条件下各像素光强的标准差值来计算,也称作不均匀因子^[15],表达式为

$$f_{\text{RMS}} = \frac{1}{\bar{p}} \left[\frac{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2}{N} \right]^{1/2} \times 100\%, \quad (2)$$

式中 N 为像元数, \bar{p} 为所有像元上光强平均值, p_i 为第 i 个像元上的光强值。

2.4 焦斑合束与评价

当光束数量足够多时,合束焦斑的形态保持稳定,为单个焦斑在各坐标点出现几率的加权和,可通过单个焦斑形态函数 $p(x, y)$ 和概率函数积分描述。由(1)式得合束焦斑形态可表示为

$$P(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{s^2 + t^2}{2\sigma^2}\right) p(x - s, y - t) dt, \quad (3)$$

式中 s 和 t 分别为单束激光的光轴与靶面交点坐标。

但当激光光束数量较小时,合束焦斑的形态与个体焦斑的位置密切相关。当光束数量为 n 时,合束焦斑的形态表示为

$$P(x, y) = \sum_{i=0}^n \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{s_i^2 + t_i^2}{2\sigma^2}\right) p(x - s_i, y - t_i), \quad s_i, t_i \in [-\infty, +\infty], \quad (4)$$

式中 s_i 和 t_i 为按正态分布产生的随机数,表示第 i 个焦斑的中心坐标。数值模拟中,需要按照 CCD 像元的大小将焦斑离散化。(4)式变为

$$P(x_i, y_i) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{s_j^2 + t_j^2}{2\sigma^2}\right) p(x_i - s_j, y_i - t_j), \quad x_i, y_i, s_j, t_j \in [-\infty, +\infty], \quad (5)$$

式中 $x_{i+1} - x_i = \Delta x, y_{i+1} - y_i = \Delta y$, 分别表示 CCD 像元的横向和纵向尺寸。

一定口径内合束焦斑的环围能量比和不均匀因子分别如(6)式和(7)式所示:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N'} P(x_i, y_i) \Big|_{x_i^2 + y_i^2 \leq R'^2}}{\sum_{i=1}^N P(x_i, y_i) \Big|_{x_i, y_i \in [-\infty, +\infty]}} \quad (6)$$

$$f_{\text{RMS}} = \frac{N'}{\sum_{i=1}^{N'} P(x_i, y_i)} \left\{ \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} \left[P(x_i, y_i) - \frac{\sum_{i=1}^{N'} P(x_i, y_i)}{N'} \right] \right\}^{1/2} \times 100\%, \quad x_i, y_i \in [-R', +R'] \quad (7)$$

(6)、(7)式中, r 和 f_{RMS} 分别为环围能量比和不均匀因子, R' 为计算区域的半径, N 和 N' 分别表示焦斑上所有的像元数目和计算区域内的像元数目。

将单路测试结果代入(3)~(7)式, 即可得到合束焦斑形态描述表达式和评价表达式。

3 计算结果

由于系统成像质量的提高, 角多路系统焦斑形态相对单路结果有所提升, 将处于单路实测结果和理想平顶两种焦斑之间, 计算选取单路实测结果和理想平顶两种焦斑形态开展合束模拟。

基于两种焦斑形态和上文所述评价方法, 对 18 束激光的靶面焦斑进行了合束模拟。光轴分布标准

差 σ 分别取为 0、40、80、120、160、200 μm 。主要从焦斑不均匀因子和环围能量两个参量对影响合束焦斑的因素做了计算和比较。

图 5 和图 6 为靶面光强分布随标准差 σ 的变化关系, 由图可见, 随着标准差 σ 的增加, 焦斑的平顶部分直径减小, 而底部直径增大。对于实测焦斑合束, $\sigma \geq 120 \mu\text{m}$ 时, 平顶消失; $\sigma = 0, 40, 80 \mu\text{m}$ 对应的平顶直径分别约 800、700、600 μm 。而对于理想平顶焦斑合束, $\sigma > 160 \mu\text{m}$ 时, 平顶消失; $\sigma = 0, 40, 80, 120, 160 \mu\text{m}$ 对应的焦斑平顶直径分别约 800、600、500、400、250 μm 。显然, σ 相同时, 实测焦斑对应平顶面积稍大。

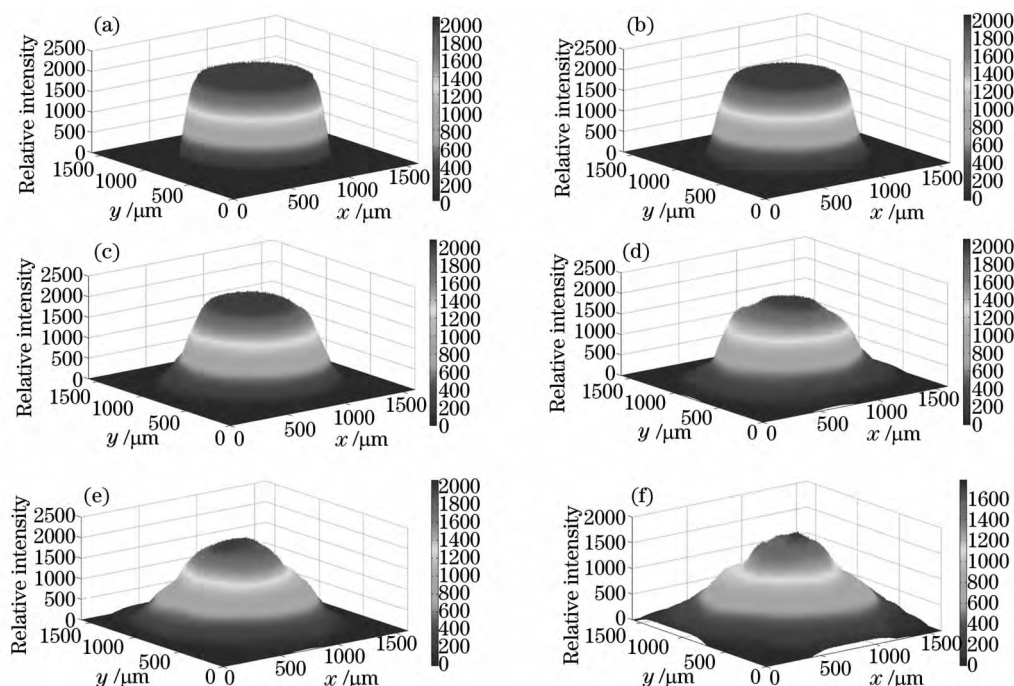


图 5 实测焦斑合束后光强分布。(a) $\sigma=0$; (b) $\sigma=40 \mu\text{m}$; (c) $\sigma=80 \mu\text{m}$; (d) $\sigma=120 \mu\text{m}$; (e) $\sigma=160 \mu\text{m}$; (f) $\sigma=200 \mu\text{m}$

Fig. 5 Overlapped focal spot based on experimental results. (a) $\sigma=0$; (b) $\sigma=40 \mu\text{m}$; (c) $\sigma=80 \mu\text{m}$;

(d) $\sigma=120 \mu\text{m}$; (e) $\sigma=160 \mu\text{m}$; (f) $\sigma=200 \mu\text{m}$

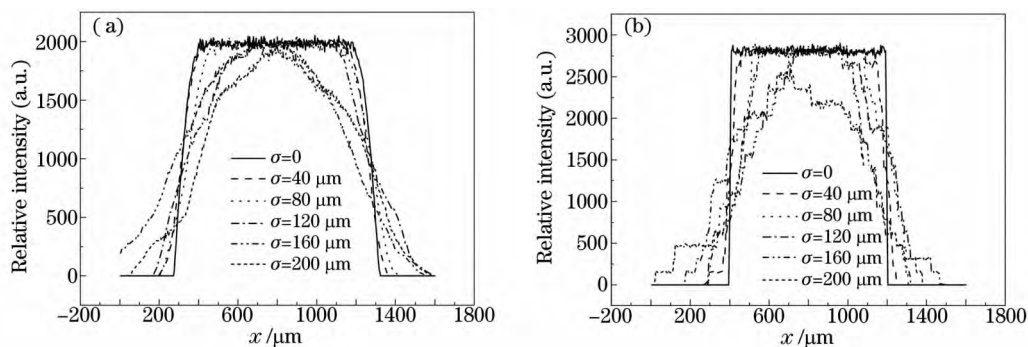


图 6 合束焦斑沿 x 轴光强分布。(a) 基于实测焦斑；(b) 基于理想平顶焦斑

Fig. 6 Intensity distribution of overlapped focal spot along x axis. (a) Based on experimental results;

(b) based on ideal flat top focal spot

图 7 为合束焦斑的不均匀因子随计算口径以及光轴分布标准差的变化关系,可以看到,18 束激光叠加后,焦斑平顶部分的不均匀因子减小,为 1.2%。该结果与美国海军实验室的实验测量结果相符。两

种焦斑计算结果相同的趋势是,计算口径大于平顶口径时,不均匀因子变大;焦斑口径一定时,不均匀因子随 σ 增大而变大;但当不均匀因子和计算口径都相同时,实测焦斑对应的 σ 值稍大。

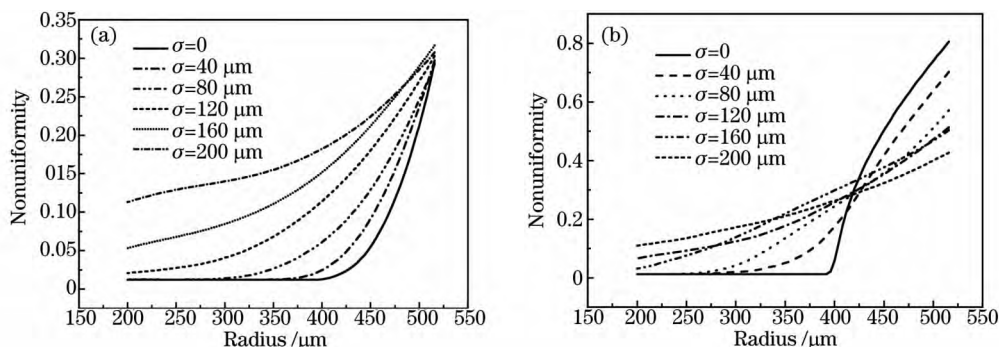


图 7 合束焦斑不均匀因子随口径的变化关系。(a) 基于实测焦斑；(b) 基于理想平顶焦斑

Fig. 7 Nonuniformity of overlapped focal spot versus computational domain. (a) Based on experimental results;

(b) based on ideal flat top focal spot

图 8 为合束焦斑的环围能量比随计算口径以及光轴分布标准差 σ 的变化关系,由该图可见,随着计算口径的增大,环围能量比增大;计算口径一定时,

随着 σ 的增大环围能量比减小;计算口径和 σ 值相同时,理想焦斑环围能量比稍高于实测焦斑。

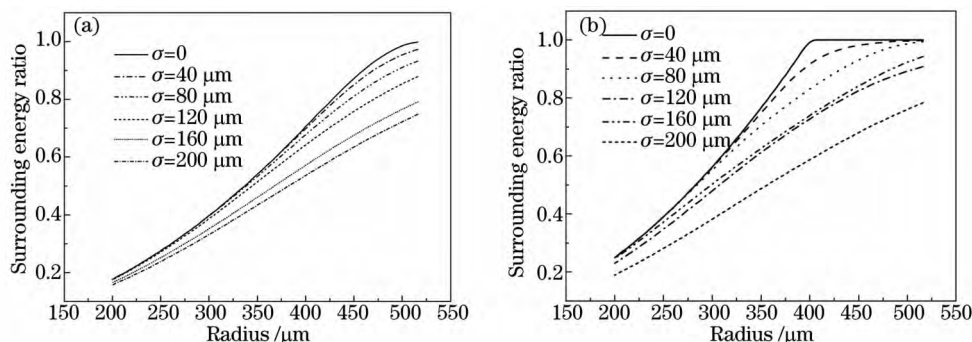


图 8 合束焦斑环围能量比随口径的变化关系。(a) 基于实测焦斑；(b) 基于理想焦斑

Fig. 8 Surrounding energy ratio of overlapped focal spot versus computational domain. (a) Based on experimental results;

(b) based on ideal flat top focal spot

4 结果分析

综合以上计算结果,基于两种激光焦斑得到的部分结论相同:合束后,平顶部分均匀性得到提高; σ 增大,合束焦斑平顶面积减小,一定计算口径内,环围能量比和均匀性降低。也存在区别:均匀性和计算口径相同时,实测焦斑对应的 σ 稍大,但环围能量比稍小。原因不难分析,光轴抖动范围越大,合束效果越差;实测焦斑中环带部分实际增加了单束激光焦斑面积,焦斑增大,允许光轴的抖动范围增加。

激光加载的准等熵实验要求加载激光靶面能量不均匀因子小于5%^[6],基于上文结果,将不均匀因子定为5%,得到了焦斑半径和环围能量比随 σ 的关系,如图9所示。可以看到 $\sigma < 30 \mu\text{m}$ 时,理想光束合束焦斑口径小于实测焦斑,且环围能量比更高; $\sigma > 30 \mu\text{m}$ 时,理想光束合束焦斑口径和环围能量比均小于实测焦斑,即更高成像质量焦斑相对实测焦斑并无优势。可见,若系统光束指向稳定性较差时,追求很高的系统成像质量并无实用价值。即 $\sigma > 30 \mu\text{m}$ 时,光束指向稳定性超越成像质量成为影响合束焦斑的最主要因素。采用文献[15]中的焦斑直径定义,即采用63%的环围能量比来定义焦斑的直径,两种焦斑所允许的 σ 最大值分别为 $80 \mu\text{m}$ 和 $65 \mu\text{m}$,相当于单束焦斑直径的10%和8.6%,对应焦斑有效口径分别为 $780 \mu\text{m}$ 和 $650 \mu\text{m}$ 。

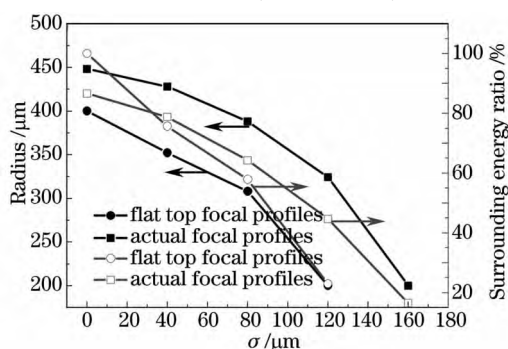


图9 不均匀因子为5%时焦斑半径、环围能量比随 σ 的变化关系

Fig. 9 Radius and surrounding energy ratio versus σ when nonuniformity factor is 5%

综上所述,在激光加载的准等熵实验中,若激光能量利用率不小于63%且焦斑不均匀因子小于5%,理想平顶光斑要求光轴抖动标准差小于 $30 \mu\text{m}$,否则无法体现高系统成像质量的的优势;而在目前系统成像质量前提下,光轴抖动标准差处于 $30 \sim 80 \mu\text{m}$ 即可,若大于 $80 \mu\text{m}$,焦斑均匀性将明显下降。

5 结 论

基于单路验证实验所测得的靶面焦斑形态和光束指向稳定性,利用数值模拟方法综合考虑了单路靶面形态和光束指向稳定性,计算了准分子激光角多路系统建成后18路激光靶面合束的焦斑形态,主要从焦斑不均匀因子和环围能量比两个参量出发研究了影响合束焦斑形态和均匀性的因素;最后,结合准等熵实验对激光参数的具体要求,反向给出了对激光指向稳定性的要求,并特别指出光束指向稳定性一定要与系统成像质量相结合,并非一定要追求尽量高的单一项指标。研究表明,多束激光合束后靶面焦斑均匀性有了显著提高,与国外文献报道的实验结果相符;光束指向稳定性要求与系统成像质量相关,高系统成像质量需要较高的光束指向稳定性来保证合束焦斑的均匀性,否则高系统成像质量的优势得不到体现;系统成像质量较差时,光束指向稳定性处于一定范围内即可,更高的激光指向稳定性对焦斑的均匀性改善效果不显著。

参 考 文 献

- 1 H Park, B A Remington, D Braun, *et al.*. Quasi-isentropic material property studies at extreme pressures: from Omega to NIF[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 112(4): 042024.
- 2 D C Swift, R P Johnson. Quasi-isentropic compression by ablative laser loading: response of materials to dynamic loading on nanosecond time scales[J]. Phys Rev E, 2005, 71(6): 066401.
- 3 K T Lorenz, M J Edwards, A F Jankowski, *et al.*. High pressure, quasi-isentropic compression experiments on the Omega laser[J]. High Energy Density Physics, 2006, 2(3-4): 113-125.
- 4 D K Bradley, J H Eggert, R F Smith, *et al.*. Diamond at 800 GPa[J]. Phys Rev Lett, 2009, 102(7): 075503.
- 5 R F Smith, S M Pollaine, S J Moon, *et al.*. High planarity X-ray drive for ultrafast shockless-compression experiments[J]. Phys Plasmas, 2007, 14(5): 057105.
- 6 R F Smith, K T Lorenz, D Ho, *et al.*. Graded-density Reservoirs for Accessing High Pressure Low Temperature Material States[R]. 2006, UCRL-CONF-220822.
- 7 S P Obenschain, S E Bondner, D Colombant, *et al.*. The Nike KrF laser facility: performance and initial target experiments[J]. Phys Plasmas, 1996, 3(5): 2098-2107.
- 8 T Lehecka, R H Lehmborg, A V Deniz, *et al.*. Production of high energy, uniform focal profiles with the Nike laser[J]. Opt Commun, 1995, 117(5-6): 485-491.
- 9 D M Kehne, M Karasik, Y Aglitsky, *et al.*. Implementation of focal zooming on the Nike KrF laser[J]. Rev Sci Instrum, 2013, 84(1): 013509.
- 10 C J Pawley, K Gerber, R H Lehmborg, *et al.*. Measurements of laser-imprinted perturbations and Rayleigh-Taylor growth with the Nike KrF laser[J]. Phys Plasmas, 1997, 4(5): 1969-1977.
- 11 Xiang Yihuai, Shan Yusheng, Gong Kun, *et al.*. Experimental investigations of beam smooth technique for high power KrF laser system[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2003, 37(2): 101-105.

- 向益淮, 单玉生, 龚 堃, 等. 高功率 KrF 准分子激光光束平滑技术实验研究[J]. 原子能科学技术, 2003, 37(2): 101-105.
- 12 Xiang Yihuai, Gao Zhixing, Tong Xiaohui, *et al.*. Development of new angular multiplexing for "Heaven I"[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(5): 795-798.
- 向益淮, 高智星, 佟小惠, 等. "天光一号"平滑角多路系统的建立[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(5): 795-798.
- 13 Zhao Xueqing, Liu Jingru, Yi Aiping, *et al.*. Amplification of high power short pulse excimer laser with beam smoothing[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(2): 397-406.
- 赵学庆, 刘晶儒, 易爱平, 等. 平滑化窄脉冲高功率准分子激光放大技术[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 397-406.
- 14 Xue Quanxi, Zhao Xueqing, Hua Hengqi, *et al.*. Seed beam smoothing for high power XeCl excimer laser system[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(2): 332-339.
- 薛全喜, 赵学庆, 华恒祺, 等. 高功率 XeCl 准分子激光系统前端平滑实验[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 332-339.
- 15 Zhao Xueqing, Xue Quanxi, Zheng Guoxin, *et al.*. The shape control over the front-end of excimer laser beam[J]. Engineering Science, 2009, 11(8): 52-57.
- 赵学庆, 薛全喜, 郑国鑫, 等. 准分子激光前端光束形态控制技术[J]. 中国工程科学, 2009, 11(8): 52-57.
- 16 Hu Yun, Zhao Xueqing, Xue Quanxi, *et al.*. ASE suppression in the high power excimer laser MOPA system based on electro-optical switch[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102008.
- 胡 云, 赵学庆, 薛全喜, 等. 基于电光开关的高功率准分子激光 MOPA 系统 ASE 抑制[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102008.
- 17 Hu Yun, Zhao Xueqing, Xue Quanxi, *et al.*. Suppression of ASE from excimer laser using cascaded UV electro-optical switch[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1): 13-19.
- 胡 云, 赵学庆, 薛全喜, 等. 由级联紫外电光开关控制准分子激光的自发辐射放大[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 13-19.
- 18 Wang Dahui, Zhao Jun, Zhao Xueqing, *et al.*. Measurement and analysis on structure stability of optical mirror mounts with small aperture[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(S1): 308-311.
- 王大辉, 赵 军, 赵学庆, 等. 小口径光学支撑镜架结构稳定性测试及分析[J]. 中国激光, 2010, 37(S1): 308-311.
- 19 Wang Dahui, Zhao Xueqing, Zhang Yongsheng, *et al.*. Simulation of beam pointing stability on targeting plane of high power excimer laser system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(8): 2039-2043.
- 王大辉, 赵学庆, 张永生, 等. 高功率准分子激光系统光束指向稳定性模拟[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(8): 2039-2043.

栏目编辑:张 腾