

光束通量空间分布随机变化的统计分析

韩伟¹⁾²⁾ 周丽丹^{1)†} 李富全²⁾ 王芳²⁾ 冯斌²⁾ 郑奎兴²⁾ 巩马理¹⁾

1) (清华大学精密机械与仪器系, 北京 100084)

2) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2013年10月26日收到; 2013年12月23日收到修改稿)

基于高功率激光装置研究了大口径激光束通量空间分布随机变化的统计规律. 统计分析表明, 多次累积的光束最大通量分布服从高斯分布, 平均值随累积发次的增加而上升, 但标准差保持不变, 与单次激光束通量分布的标准差基本一致. 这一统计规律是由大口径光束通量空间分布的大面相似性和局域差异性所决定的.

关键词: 激光损伤, 光束通量空间分布, 统计分析

PACS: 42.60.Jf, 42.70.Hj

DOI: 10.7498/aps.63.074204

1 引言

激光导致的光学元件损伤^[1-4]是制约高功率激光驱动器的关键问题之一^[5-7]. 光学元件在强激光多发次辐照下, 损伤点数量逐渐增加, 损伤点尺寸逐步增长^[8-10], 当损伤点造成光束面积损失达到一定程度, 影响激光驱动器总体性能时, 光学元件必须进行损伤修复^[11-13]或更换. 因此, 元件使用寿命取决于元件损伤点数量和损伤点尺寸随激光发次的增长规律^[14,15]. 其中, 元件损伤点数量的计算公式为

$$N = A \int \rho(\phi) f(\phi) d\phi, \quad (1)$$

其中, A 为激光束面积, $\rho(\Phi)$ 为激光束通量密度达到 Φ 时元件表面损伤点的面密度^[16,17], $f(\Phi)$ 为光束通量密度分布的概率密度函数.

假设光学元件不存在预处理效应^[18,19]和疲劳效应^[20], 即元件损伤阈值并不随激光发次的增加而上升或降低. 当激光束总能量恒定时, 若在不同的激光辐照发次下光束近场任意局部区域的通量保持不变, 即光束通量空间分布不随发次变化, 那么元件损伤点数量并不会随着激光辐照发次的增

加而变化. 但是, 实际情况是, 大口径光束近场任意局部区域在激光发次之间存在能量波动(需要说明的是, 本文所谈的能量波动并不是由发次之间激光总能量起伏引起的, 而是由光传输过程中的各种随机动力学因素引起的), 随着激光发次的增加, 元件局部区域就会由于承受了更高的通量而产生新的损伤点, 从而导致元件损伤点的数量增加.

因此, 光束通量空间分布的随机变化导致 N 发次激光辐照下元件损伤点的数量并不取决于单发次的激光通量分布 $\Phi(x, y)$, 而是取决于 N 发次辐照过程中元件任意局部区域所承受的最高激光通量密度 $\Phi_{\max}(x, y)$. $\Phi_{\max}(x, y)$ 称为 N 发次累积的光束最大通量空间分布, 即

$$\phi_{\max}(x, y) = \max_{i=1,2,\dots,N} \{\phi_i(x, y)\}. \quad (2)$$

在 N 发次激光辐照下光学元件损伤点数量为

$$N = A \int \rho(\phi) f_{\max}(\phi) d\phi, \quad (3)$$

其中, $f_{\max}(\Phi)$ 为 N 发次累积的光束最大通量分布 $\Phi_{\max}(x, y)$ 的概率密度函数. 因此, 明确元件损伤点数量随激光发次的增长规律需要研究 $f_{\max}(\Phi)$ 随激光辐照发次 N 的变化规律. 本文根据大口径高通量验证实验平台(Integrated Testbed, 简称ITB)

† 通讯作者. E-mail: tonyhan2000@163.com

的光束近场数据, 研究光束通量空间分布随机变化的统计规律, 为元件损伤点数量的精确预测和元件使用寿命评估奠定基础.

2 单发次光束通量空间分布 $\Phi(x, y)$

ITB是基于多程放大构型的大口径高通量激光器, 其输出激光波长为1053 nm, 光谱带宽30 GHz, 脉冲宽度3 ns或5 ns, 光束口径36 cm×36 cm, 最大输出能量16000 J. 本文所开展的研究工作均基于ITB输出能量约7500 J/3 ns时的基频光光束近场实验数据.

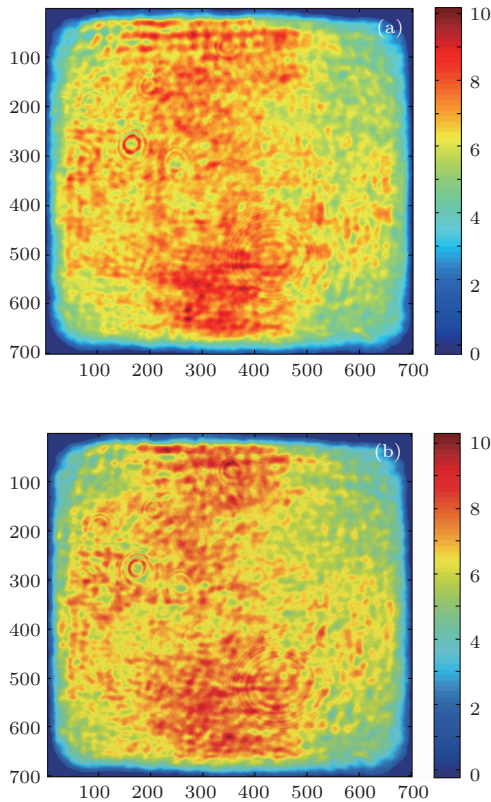


图1 (网刊彩色) 任意两发基频光近场二维分布对比

图1是相同能量下任意两发基频光近场二维分布图, 对比可知, 两发近场之间具有大面相似性和局域差异性的特征. 大面相似性主要来源于光路中的固有畸变, 如光学元件面形、钜玻璃热畸变等, 它们引起的近场分布特征基本不随发次变化; 局域差异性来源于光传输过程中的各种随机动力学过程, 如灰尘杂质的随机分布、空气扰动、非线性过程的随机性等, 这些因素导致不同发次之间的光束近场在大面相似性的基础上存在不可避免的随机波动. 正是光束局域通量在激光发次之间的随机波动

导致元件损伤点数量随激光发次的增加而上升.

单发次光束通量空间分布的概率密度函数通常用高斯函数表示, 如图2所示. 高斯型光束通量分布的概率密度函数为

$$f_s(\phi; \mu, \sigma_s) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\phi - \mu)^2}{2\sigma_s^2}\right), \quad (4)$$

其中, μ 为光束平均通量密度, σ_s 为光束通量空间分布的标准差. 因此, 单发次光束通量的空间分布特征可通过光束平均通量密度 μ 和标准差 σ_s 两个参数来表征. 对于ITB基频光能量约7500 J时近场分布, 其特征参数分别为 $\mu = 6.63 \text{ J/cm}^2$ 和 $\sigma_s = 0.75 \text{ J/cm}^2$.

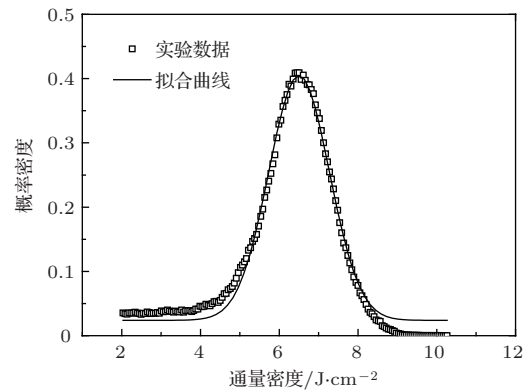


图2 单发次光束通量分布的概率密度函数 (对应图1(a))

3 多发次累计的光束最大通量分布

$$\Phi_{\max}(x, y)$$

将ITB基频光能量在7500 J左右的九发光束近场数据进行统计分析. 为了消除总能量起伏的影响, 将所有的近场能量按7500 J进行归一化.

图3(a)为九发次累积的光束最大通量的空间分布, 对比图1, 可以发现, 九发次累积的光束最大通量分布中“强区”成分增多, 这进一步证明光束局域通量的随机波动. 图3(b)是九发次累积的最大通量分布的概率密度分布, 仍然可以用高斯分布函数进行拟合, 即

$$f_{\max}(\phi; \mu_{\max}, \sigma_{\max}) = \frac{1}{\sigma_{\max} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\phi - \mu_{\max})^2}{2\sigma_{\max}^2}\right), \quad (5)$$

μ_{\max} 和 σ_{\max} 表示 N 发次累积的光束最大通量分布的平均通量和标准偏差.

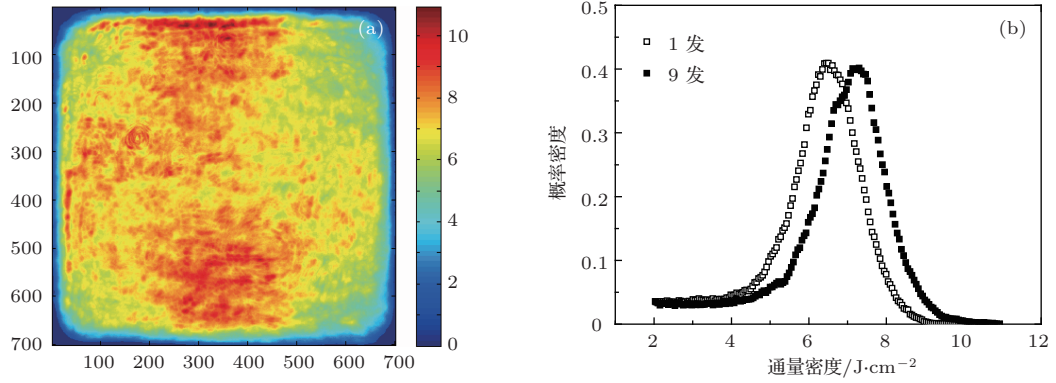


图3 (网刊彩色) 九发次累积的最大通量的空间分布 (a) 和概率密度分布函数 (b)

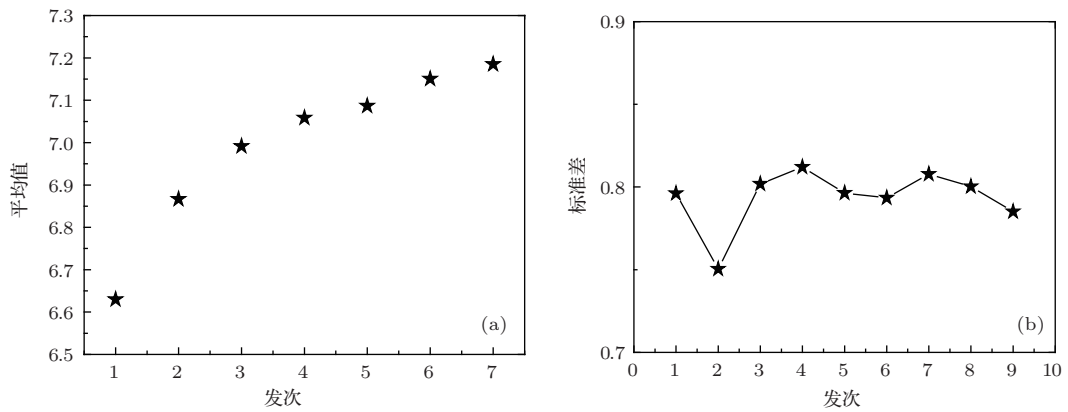


图4 N 发次累积的光束最大通量分布的平均通量 (a) 和标准差 (b) 随激光发次的变化规律

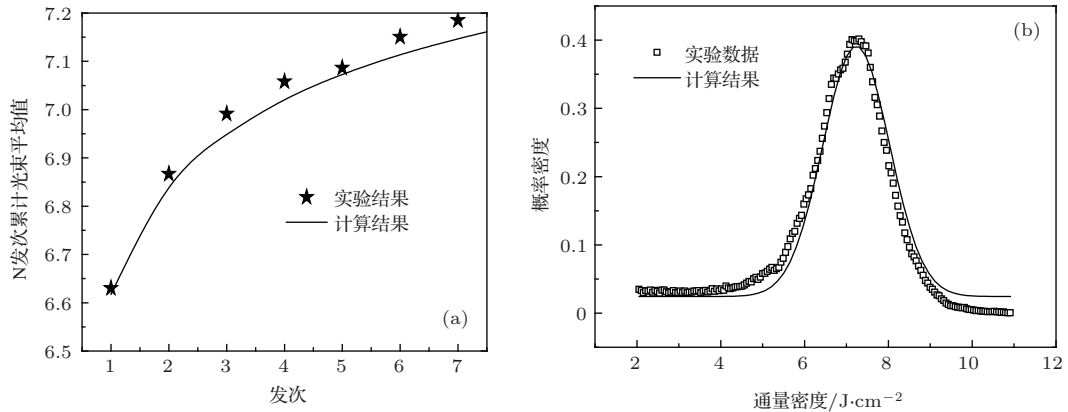


图5 N 发次累积的光束最大通量分布平均值 (a) 和概率密度分布 (b) 的理论计算结果与实验测量结果

图4表示 N 发次累积的光束最大通量分布 $\Phi_{\max}(x, y)$ 随累积发次 N 的变化规律, 可见随着累积发次的增加, $\Phi_{\max}(x, y)$ 概率密度函数 $f_{\max}(\Phi)$ 的平均值 μ_{\max} 向高通量移动, 但标准差 σ_{\max} 在 0.79 J/cm^2 附近波动, 略有变小的趋势.

N 发次累积的光束最大通量分布的平均值随

发次上升, 而标准差基本保持不变, 其根本原因是光束通量空间分布在不同发次之间具有大面相似性和局域随机波动性. 局域随机波动性导致 μ_{\max} 随累积发次 N 增加而上升, 大面相似性导致 σ_{\max} 随累积发次 N 逐步收敛, 且与单发次光束通量分布的标准差基本相同. 需要指出的是, 如果激光器运

行过程中频繁更换光学元件等, 将破坏不同发次之间光束近场的大面相似性, 不同发次之间的光束近场具有完全的随机性, 多发次累积的光束最大通量分布的标准差就会随发次的增加而变小, 当 N 接近无穷时, 标准差趋于零. 本文所讨论的情况是基于激光器稳定运行阶段, 此时光束通量空间分布在不同发次之间具有大面相似性. 针对不具备大面相似性的光束通量空间分布, 可以进行分段统计.

光束通量空间分布的随机变化导致 N 发次激光辐照下元件损伤点的数量并不取决于单发次的激光通量分布 $\Phi(x, y)$, 而是取决于 N 发次辐照过程中元件任意局部区域所承受的最高激光通量密度 $\Phi_{\max}(x, y)$. 因此, 精确预测 N 发次后元件损伤点数量必须获得 N 发次累计的光束最大通量分布 $\Phi_{\max}(x, y)$. 从 ITB 实验数据的统计分析可以看出, N 发次累计的光束最大通量分布 $\Phi_{\max}(x, y)$ 的概率密度函数 $f_{\max}(\Phi)$ 仍然服从高斯分布, 且平均值 μ_{\max} 随累积发次 N 上升, 标准差 σ_{\max} 与单发次光束通量分布标准差 σ_s 一致. 因此计算 N 发次累计的光束最大通量分布 $\Phi_{\max}(x, y)$ 的概率密度函数 $f_{\max}(\Phi)$ 的关键是平均值 μ_{\max} . 文献 [21] 中假设不同区域光束通量的随机分布属于独立同分布, 并认为 N 发次累积的光束近场任意局域的最大通量属于样本的最大次序统计量, 而 N 发次累积的光束最大通量分布的平均值 μ_{\max} 为最大次序统计量的期望值. 基于最大次序统计量计算得到的 μ_{\max} 与 ITB 实验数据的对比如图 5(a) 所示, 计算结果与实验数据基本一致. 进一步地, 根据 N 发次累积的光束最大通量分布标准差 σ_{\max} 的统计规律, N 发次累积的光束最大通量的概率密度函数理论计算结果与实验测量结果也较为一致, 如图 5(b) 所示. 这为光学元件损伤点数量的精确预测奠定了基础.

4 结 论

本文基于 ITB 基频光近场数据, 研究了光束通量空间分布随机变化的统计规律, 统计分析结果表明光束通量空间分布的大面相似性和局域差异性导致多发次累积的光束最大通量的空间分布不同于单发次光束通量的空间分布, 且多发次累积的光束最大通量分布的平均值随累积发次的增加而上升, 但其标准差基本保持不变. 本文研究结果为高

功率激光驱动器光学元件损伤点数量的精确预测和元件使用寿命评估奠定了基础.

参考文献

- [1] Demos S G, Raman R N, Negres R A 2013 *Opt. Express* **21** 4875
- [2] Deng H X, Zu X T, Xiang X, Sun K 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 113603
- [3] Wong J, Ferriera J L, Lindsey E F, Haupt D L, Hutcheon I D, Kinney J H 2006 *J. Non-Cryst. Solids* **352** 255
- [4] Burnham A K, Runkel M, Feit M D, Rubenchik A M, Floyd R L, Land T A, Siekhaus W J, Hawley-Fedder R A 2003 *Appl. Opt.* **42** 5483
- [5] Liu H, Huang J, Wang F, Zhou X, Jiang X, Wu W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1308 (in Chinese)[刘红婕, 黄进, 王凤蕊, 周信达, 蒋晓东, 吴卫东 2010 物理学报 **59** 1308]
- [6] Han W, Wang F, Zhou L, Feng B, Jia H, Li K, Xiang Y, Zheng W 2012 *Chin. Phys. B* **21** 077901
- [7] Kozlowski M R, Mouser R P, Maricle S M, Wegner P J, Weiland T L 1999 *Proc. SPIE* **3578** 436
- [8] Bercegol H, Bouchut P, Lamaignere L, Garrec B L, Raze G 2004 *Proc. SPIE* **5273** 312
- [9] Huang W Q, Han W, Wang F, Xiang Y, Li F Q, Feng B, Jing F, Wei X F, Zheng W G, Zhang X M 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 017901
- [10] Negres R A, Abdulla G M, Cross D A, Liao Z M, Carr C W 2012 *Opt. Express* **20** 13030
- [11] Jiang Y, Liu C, Luo C, Yuan X, Xiang X, Wang H, He S, Lv H, Ren W, Zheng W, Zu X 2012 *Chin. Phys. B* **21** 054216
- [12] Jiang Y, Xiang X, Liu C, Luo C, Wang H, Yuan X, He S, Ren W, Lv H, Zheng W, Zu X 2012 *Chin. Phys. B* **21** 064219
- [13] Xiang X, Zheng W G, Yuan X D, Dai W, Jiang Y, Li X B, Wang H J, Lü H B, Zu X T 2011 *Chin. Phys. B* **20** 044208
- [14] Liao Z M, Abdulla G M, Negres R A, Cross D A, Carr C W 2012 *Opt. Express* **20** 15569
- [15] Negres R A, Abdulla G M, Cross D A, Liao Z M, Carr C W 2012 *Opt. Express* **20** 13030
- [16] Lamaignere L, Bouillet S, Courchinoux R, Donval T, Josse M, Poncetta J C, Bercegol H 2007 *Rev. Sci. Instrum.* **78** 103105
- [17] DeMange P, Carr C W, Radousky H B, Demos S G 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 3298
- [18] Liao Z M, Spaeth M L, Manes K, Adams J J, Carr C W 2010 *Opt. Lett.* **35** 2538
- [19] Demos S G, DeMange P, Negres R A, Feit M D 2010 *Opt. Express* **18** 13788
- [20] Chmel A E 1997 *Mater. Sci. Eng. B* **49** 175
- [21] Liao Z M, Huebel J, Trenholme J, Manes K, Carr C W 2011 *Appl. Opt.* **50** 3547

Statistical analysis of shot-to-shot variation of laser fluence spatial distribution

Han Wei¹⁾²⁾ Zhou Li-Dan^{1)†} Li Fu-Quan²⁾ Wang Fang²⁾ Feng Bin²⁾
Zheng Kui-Xin²⁾ Gong Ma-Li¹⁾

1) (*Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

2) (*Research Center of Laser Fusion, CAEP, P.O.Box 919-988, Mianyang 621900, China*)

(Received 26 October 2013; revised manuscript received 23 December 2013)

Abstract

The shot-to-shot variation of laser fluence spatial distribution on a large-aperture high-power laser facility is statistically analyzed. Statistical results show that the maximum fluence spatial distribution to which any location in the optic beam will be exposed after N shots, can be described by Gaussian function, and the average fluence across the beam increases with laser shots while standard deviation is relatively constant, independent of laser shots. This is due to the fact that laser fluence spatial distribution possesses similarity over the whole beam and dissimilarity at local positions for different laser shots.

Keywords: laser-induced damage, laser fluence spatial distribution, statistical analysis

PACS: 42.60.Jf, 42.70.Hj

DOI: [10.7498/aps.63.074204](https://doi.org/10.7498/aps.63.074204)

† Corresponding author. E-mail: tonyhan2000@163.com