

高功率激光装置中波前畸变对相干合成的影响

母杰^{1,2} 王逍^{1,2} 景峰^{1,2} 黄小霞^{1,2} 李志林^{1,2,3} 朱启华^{1,2} 栗敬钦^{1,2} 张军伟^{1,2} 周凯南^{1,2}
曾小明^{1,2} 王晓东^{1,2}

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

²等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900

³西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054

摘要 根据高功率激光装置中波前畸变分段的特点, 提出通过构造不同频段的波前畸变来研究相干合成结果与波前畸变之间的关系。以神光-III原型装置的结构和参数为模型, 利用蒙特卡罗方法进行了数值模拟, 分析了低频、中高频波前畸变对相干合成的影响, 并给出了低频和中高频波前畸变与相干合成结果的对应关系。为高功率激光装置中进行波前畸变控制, 实现相干合成提供一种分析思路和理论参考。

关键词 激光技术; 相干合成; 波前畸变; 高功率激光装置

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0602010

Effect of Wavefront Distortion on Coherent Beam Combination in High-Power Laser Facilities

Mu Jie^{1,2} Wang Xiao^{1,2} Jing Feng^{1,2} Huang Xiaoxia^{1,2} Li Zhilin^{1,2,3} Zhu Qihua^{1,2}
Su Jingqin^{1,2} Zhang Junwei^{1,2} Zhou Kainan^{1,2} Zeng Xiaoming^{1,2} Wang Xiaodong^{1,2}

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

²Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Mianyang, Sichuan 621900, China

³State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiao Tong University, Xi'an, Shaanxi 710054, China

Abstract Based on the segmentation characteristics in space frequency of wavefront distortion, a new method of constructing wavefront distortion is proposed to study the relationship between wavefront distortion and coherent beam combination (CBC). Taking the structure and parameters of SG-III technical integration line as a model and using Monte-Carlo method to realize the simulation, the effects of low and mid-high frequency wavefront distortions are analyzed. Moreover, the corresponding relationships between the low, mid-high frequency wavefront distortion and the result of CBC are established respectively. The results provide an analysis thought and a theoretical reference of wavefront distortion correction for CBC in high-power laser facilities.

Key words laser technique; coherent beam combination; wavefront distortion; high-power laser facility

OCIS codes 140.3298; 220.1000; 140.3460

1 引 言

高功率激光可以产生极端的物态条件, 为惯性约束聚变^[1-2]、等离子体物理^[3-4]、实验室天体物理^[4]等科学研究提供技术基础。获取高功率激光的技术手段主要有两种: 一是提高单束激光的输出功率; 二是将多路

收稿日期: 2014-12-31; 收到修改稿日期: 2015-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(61308040)、国家863计划(2013AA8043047)

作者简介: 母杰(1987—), 女, 博士后, 主要从事固体激光器相干组束方面的研究。E-mail: mujiebest@163.com

导师简介: 景峰(1968—), 男, 博士, 研究员, 主要从事高功率固体激光物理和激光技术等方面的研究。

E-mail: jingfeng09@sina.cn(通信联系人)

激光束进行相干合成。单束激光的输出功率通常是有限的,与前者相比,相干合成是一种可行的技术方案,因此成为很多大型激光装置的一个重要研究内容。比如,美国国家点火装置(NIF)计划将192路光束中的4路实现高能皮秒激光脉冲的输出,并进行相干合成,用于X射线背照光和快点火实验^[5]。俄罗斯的艾瓦超强光研究中心(XCELS)合成12路15 PW的光束后理论上可以获得约 10^{26} W/cm²的聚焦功率密度^[6]。日本的FIEREX-I计划合成4路激光束获取10 kJ/10 ps的输出^[7]。

高功率激光装置系统庞大、结构复杂,有诸多因素会导致光束的波前畸变(光学元件面型加工误差,放大器热畸变,强激光非线性效应等),造成输出光束的质量下降,从而影响合成效果。因此,在进行多光束的相干合成时,不仅需要控制束间的同步误差和倾斜误差^[8],还需要考虑光束内部波前畸变带来的影响。对光束波前进行分析常用Zernike多项式法^[9]。但在高功率激光装置中光束通常采用方形口径,不满足Zernike多项式正交条件。此外,该方法无法定量描述波前频谱,难以提供丰富的波前信息。高功率激光装置中通常将波前畸变按空间频率来进行分段,对不同频率段的波前畸变采用不同的控制措施(利用自适应光学技术^[10-11]控制低频畸变,提高光学元件质量来控制中频畸变,利用空间滤波技术^[12]控制高频及部分中频畸变)。不同的激光装置,其空间频率的划分也有所不同。比如,NIF装置中低频和中频空间尺度的分界点为33 mm,中频和高频空间尺度的分界点为0.12 mm^[13];神光-III原型装置中低频和中频空间尺度的分界点为30 mm,中频和高频空间尺度的分界点为0.11 mm^[14]。

Xiao等^[15]计算了高斯光束和高斯传播相位函数下的相干合成结果。Yang等^[16]模拟了Von Karman功率谱下的相干合成结果。本文以神光-III原型装置的结构为模型,利用蒙特卡罗方法进行数值模拟,通过构造不同频段的波前畸变来研究相干合成结果与波前畸变之间的关系,为高功率激光装置中进行波前畸变控制,实现相干合成提供一种分析思路和理论参考。

2 理论模型

2.1 多光束相干合成

高功率激光装置中通常采用方形口径的光束。为了防止直边衍射引起光传输过程中的近场调制,光束的边沿进行了软化,因此采用超高斯光束来描述光束截面的光强分布。单光束的出射光场可表示为

$$E(x,y) = \text{rect}\left(\frac{x}{D}, \frac{y}{D}\right) u(x,y) \exp\{-ik[\alpha(x-x_0) + \beta(y-y_0)] + i2\pi\varphi(x,y)\}, \quad (1)$$

式中 (x,y) 为近场坐标, D 为光束口径, (x_0,y_0) 为光束的中心坐标, α 和 β 是光束的倾斜相位, $\varphi(x,y)$ 为光束的相位分布, $\text{rect}\left(\frac{x}{D}, \frac{y}{D}\right)$ 为方形光束的孔径函数: $\text{rect}\left(\frac{x}{D}, \frac{y}{D}\right) = \begin{cases} 1 & |x| \leq D, |y| \leq D \\ 0 & |x| > D, |y| > D \end{cases}$, $u(x,y)$ 为超高斯的空间分布:

$$u(x,y) = \exp\left\{-\left[\left(\frac{x}{R_0}\right)^{2n} + \left(\frac{y}{R_0}\right)^{2n}\right]\right\}, \text{其中 } R_0 \text{ 为光束束腰, } n \text{ 为超高斯光束的阶数。}$$

N 路光束的出射光场可表示为

$$U(x,y) = \sum_{j=1}^N E_j(x,y), \quad (2)$$

根据夫琅禾费衍射理论, N 路光束相干合成后的远场强度分布可描述为

$$I(u,v) = \left| c \iint U(x,y) \exp\left[-i\frac{k}{f}(ux+vy)\right] dx dy \right|^2, \quad (3)$$

式中 (u,v) 为远场坐标, $c = \frac{1}{i\lambda f} \exp(ikf) \exp\left[i\frac{k}{2f}(u^2+v^2)\right]$ 为系数因子, f 为传播距离, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数。

2.2 波前畸变

分析波前畸变对相干合成的影响时,不需要考虑光束间的倾斜相差,即令(1)式中的 $\alpha = 0$, $\beta = 0$ 。光束的波前畸变主要由光束传播过程中引入的相位噪声决定。在频域中,可将其分为低频、中频和高频。低频相位噪声服从高斯分布,对应的低频波前可表示为^[17]

$$\varphi(x,y) = K \cdot \text{rand}(-1,1) \otimes \exp\left\{-\left[\left(x/s_x\right)^2 + \left(y/s_y\right)^2\right]\right\}, \quad (4)$$

式中 K 是比例系数, $\text{rand}(-1,1)$ 是 -1 到 1 之间均匀分布的随机数, s_x 和 s_y 分别表示波前在 x 方向和 y 方向上的空间尺度, \otimes 表示卷积。使用不同的空间尺度和比例系数可以产生具有一定分布特征的随机低频相位畸变。

中高频相位畸变可采用功率谱密度(PSD)来描述^[18]

$$\lg[A(f_x)] = a + b \lg f_x, \quad (5)$$

式中 f_x 是空间频率, $A(f_x)$ 是频率为 f_x 成分的幅度, a 决定了波前总体畸变程度, b 决定了波前畸变频谱分布的相对比例。通过调整 a 和 b 的值, 可以构造不同的 PSD 曲线, 再通过逆傅里叶变换可以得到具有相应频谱分布的畸变波前。

2.3 相干合成效果的评价指标

评价相干合成的参数很多, 不同的应用场合可以选择不同的评价参数。为了能够较为全面地反映远场焦斑的能量分布情况, 选择了斯特列尔比(S)和 1 倍衍射极限内(DL)的桶中功率比(P_B)作为评价指标。

S 为当前含有相差时的远场峰值光强 I_{\max_real} 与理想的不含相差时的远场峰值光强 I_{\max_ideal} 的比, 表达式如(6)式所示。 S 的值介于 $0 \sim 1$ 之间, 值越大表明系统中所含的相差越小。

$$S = \frac{I_{\max_real}}{I_{\max_ideal}}. \quad (6)$$

P_B 从能量角度描述光束在远场的聚焦能力, 表示远场给定尺寸的区域 c 中所包含的能量占总能量的百分比, 表达式如(7)式所示。 P_B 也介于 $0 \sim 1$ 之间, 在给定的积分区域的情况下, 值越大表明能量集中度越高, 聚焦能力越强。

$$P_B = \frac{\iint_c I(x,y)}{\iint_x I(x,y)}. \quad (7)$$

3 计算分析与结果讨论

神光-III 原型由 8 束激光构成, 单束激光的输出能量为 $1.2 \text{ kJ}/1 \text{ ns}/351 \text{ nm}$ 和 $1.8 \text{ kJ}/3 \text{ ns}/351 \text{ nm}$, 是国内第一台可输出万焦耳级能量的激光装置^[19]。神光-III 原型装置的单光束口径为 $290 \text{ mm} \times 290 \text{ mm}$, x 和 y 方向上的孔径间隔分别为 230 mm 和 70 mm , 如图 1 所示。刘红婕等^[14]的研究结果表明, 神光-III 原型装置中相位噪声的中低频分界点为 30 mm , 中高频噪声的分界点为 0.11 mm 。下面分别根据低频和中高频波前畸变的描述方式生成随机相位屏, 以神光-III 原型装置的结构和参数为模型, 模拟 4 路光束分别存在低频和中高频波前畸变情况下的相干合成结果, 并分析波前畸变对光束相干合成的影响。在该过程中, 采用蒙特卡罗方法实现: 对应参数的每个取值, 随机产生多个相位屏, 并对得到的结果进行统计平均, 统计次数取 1000 次。

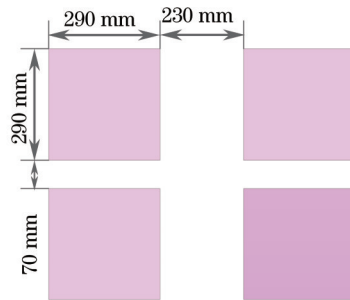


图 1 神光-III 原型装置中的 4 路光束布局

Fig.1 Layout of four beams in SG-III technical integration line

3.1 低频波前畸变下的相干合成结果

令光束束腰 $R_0 = 13 \text{ cm}$, 超高斯光束的阶数 $n = 10$, 4 路光束存在 $s_x = s_y = 40 \text{ mm}$ 的波前畸变, 单光束波前相位均方根 RMS 值为 0.1λ 时随机产生的光束的近场振幅、相位分布和远场焦斑如图 2 所示。在无波前畸变的理想情况下, $S_{ideal} = 1$, 1 倍衍射极限内的 $P_{B-ideal} = 37.6\%$ 。当光束具有图 2(a) 所示的振幅分布和图 2(b) 所示的相位分

布时, $S=0.607, P_B=25.3\%$ 。比较图 2(c)和(d)也可以看出,当 4 路光束存在束内波前畸变时,远场焦斑的形态发生退化,不再规则,主瓣能量降低,旁瓣能量增加。

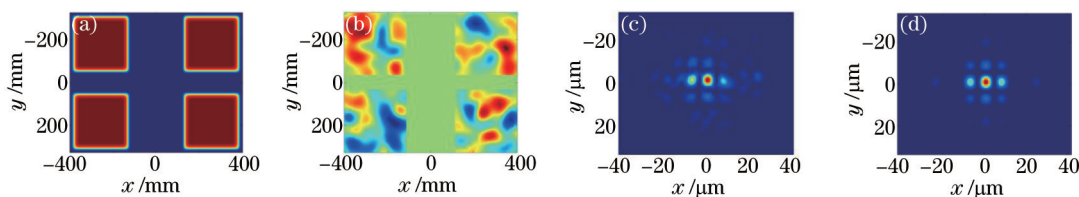


图 2 光束近场分布和远场焦斑。(a) 振幅; (b) 相位; (c) 光束近场分布如图(a)和(b)时的远场焦斑; (d) 理想情况下的远场焦斑
Fig.2 Optical near-field distribution and far-field focal spot. (a) Amplitude; (b) phase; (c) far-field focal spot of optical near-field distribution in Figs.(a) and (b); (d) ideal far-field focal spot

令 $s_x=s_y$, 且在 $[40 \text{ mm}, 340 \text{ mm}]$ 间以 1 cm 的间隔递增变化, 调整比例系数 K , 使单光束的波前相位 RMS 值在 $[0.04\lambda, 0.15\lambda]$ 间以 0.01λ 的间隔递增变化。以下将单光束的波前相位 RMS 简称为波前 RMS。图 3 给出了得到的 S 和 P_B 与波前空间尺度和波前 RMS 的对应关系。可以看出, 在 $s_x=s_y \in [40 \text{ mm}, 150 \text{ mm}]$ 范围内, 当波前 RMS 一定时, 随着空间尺度的增加, S 整体上逐渐降低, 而 P_B 逐渐升高; 在 $s_x=s_y \in (150 \text{ mm}, 340 \text{ mm}]$ 的范围内, 当波前 RMS 一定时, S 和 P_B 均趋于稳定。当空间尺度一定时, 随着波前 RMS 的增加, S 和 P_B 都明显降低。延伸波前空间尺度和波前 RMS 的取值范围进行数值仿真, 可以得到更多的 S 和 P_B 与波前空间尺度和波前 RMS 的对应关系。在进行相干合成时, 确定要达到的 S 和 P_B 后, 就可以得到在一定空间尺度下波前 RMS 需要校正的范围。

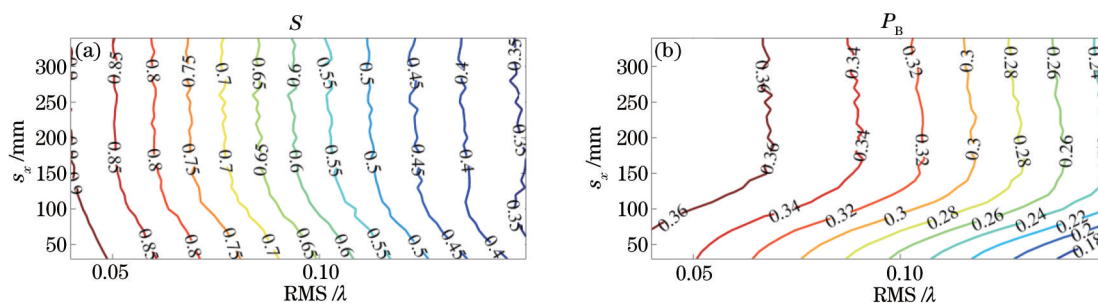


图 3 S 和 P_B 随波前空间尺度和波前 RMS 的变化。(a) S ; (b) P_B

Fig.3 S and P_B variation curves with scale length and RMS of wavefront. (a) S ; (b) P_B

3.2 中高频波前畸变下的相干合成结果

令 $a=0.9, b=-0.3$, 对应的近场相位和远场焦斑如图 4 所示。此时, $S=0.649, P_B=24.4\%$ 。对比图 4(b)和图 2 (d)(理想情况下的远场焦斑)可以看出, 在中高频波前畸变的情况下, 远场焦斑的形态基本没有发生变化, 但是 S 和 P_B 都明显降低。这是由于中高频波前畸变导致很多能量分散在成像平面上, 降低了有效能量。

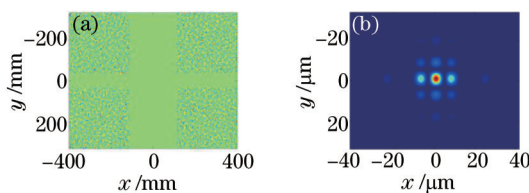
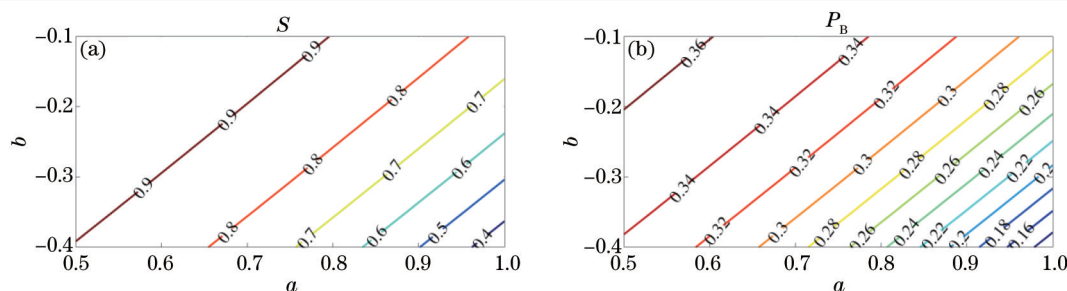


图 4 光束近场分布和远场焦斑。(a) 近场相位; (b) 远场焦斑

Fig.4 Optical near-field distribution and far-field focal spot. (a) Near-field phase; (b) far-field focal spot

令 a 和 b 分别在 $[0.5, 1], [-0.4, -0.1]$ 的范围以 0.05 的间隔递增变化, 分析 S 和 P_B 的变化, 结果如图 5 所示。从图 5 可以看出, 当 a 一定时, 随着 b 的增加, S 和 P_B 都明显升高; 当 b 一定时, 随着 a 的增加, S 和 P_B 都明显降低。同样地, 延伸 a 和 b 的取值范围进行数值仿真, 可以得到更多的 S 和 P_B 与 a 和 b 的对应关系。指定要达到的 S 和 P_B , 就可以得到 a 和 b 的取值范围, 为波前畸变控制提供依据。

图5 S 和 P_B 随 a 和 b 的变化。(a) S ; (b) P_B Fig.5 S and P_B variation curves with a and b . (a) S ; (b) P_B

4 结 论

以神光-III原型装置的结构和参数为模型,通过构造不同频段的波前畸变,利用蒙特卡罗方法研究了高功率激光装置中多光束的相干合成结果和束内波前畸变之间的关系。研究表明,低频波前畸变会造成远场焦斑的形态发生退化,不再规则,主瓣能量降低,旁瓣能量增加,中高频波前畸变不会使远场焦斑的形态发生明显变化,但会导致很多能量分散在成像平面上,降低有效能量。另外,还给出了低频波前畸变情况下 S 和 P_B 与波前空间尺度和波前 RMS 的对应关系以及中高频波前畸变情况下 S 和 P_B 与 a 和 b 的对应关系。根据该研究结果,在指定相干合成达到的 S 和 P_B 的指标下,可以得到波前 RMS、空间尺度和 a 、 b 的取值范围,为高功率激光装置中相干合成所需要的波前畸变控制提供一种分析思路 and 理论参考。

参 考 文 献

- 1 Fan Dianyan, Zhang Xiaomin. Laser fusion and high power laser: history and progress[J]. Physics, 2010, 39(9): 589-596.
范滇元, 张小民. 激光核聚变与高功率激光: 历史与进展[J]. 物理, 2010, 39(9): 589-596.
- 2 Li Hong, Wang Dongfang, Zou Wei, *et al.*. Design of high power laser beam automatic alignment system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1002003.
李 红, 王东方, 邹 伟, 等. 高功率激光装置光束自动准直系统设计[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1002003.
- 3 D Umstadter. Relativistic laser-plasma interactions[J]. J Phys D: Appl Phys, 2003, 36(8): R151-R165.
- 4 S V Bulanov, T Z Esirkepov, D Habs, *et al.*. Relativistic laser-matter interaction and relativistic laboratory astrophysics[J]. Eur Phys J D, 2009, 55(2): 483-507.
- 5 K L Baker, D Homoelle, E Utterback, *et al.*. Phasing rectangular apertures[J]. Opt Express, 2009, 17(22): 19551-19565.
- 6 A V Bashinov, A A Gonoskov, A V Kim, *et al.*. New horizons for extreme light physics with mega-science project XCELS[J]. Eur Phys J Special Topics, 2014, 223(6): 1105-1112.
- 7 N Miyanaga, H Azechi, K A Tanaka, *et al.*. 10-kJ PW laser for the FIREX-I program[C]. J Phys IV, 2006, 133: 81-87.
- 8 Mu Jie, Jing Feng, Wang Xiao, *et al.*. Error control of piston and tilt based on SPGD in coherent beam combination[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0602002.
母 杰, 景 峰, 王 逍, 等. 相干合成中基于 SPGD 算法的平移误差和倾斜误差控制[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0602002.
- 9 R J Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. J Opt Soc Am, 1976, 66(3): 207-211.
- 10 Jiang Wenhan, Yang Zeping, Guan Chunlin, *et al.*. New progress on adaptive optics in inertial confinement fusion facility[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1625-1634.
姜文汉, 杨泽平, 官春林, 等. 自适应光学技术在惯性约束聚变领域应用的新进展[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1625-1634.
- 11 Guo Ailin, Zhu Haidong, Tang Shiwang, *et al.*. Residual wavefront aberration of high-power laser facility[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0814002.
郭爱林, 朱海东, 唐仕旺, 等. 高功率激光驱动器波前残余像差研究[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0814002.
- 12 J E Murray, D Milam, C D Boley, *et al.*. Spatial filter pinhole development for the national ignition facility[J]. Appl Opt, 2000, 39(9): 1405-1420.
- 13 C R Wolfe, J K Lawson. The measurement and analysis of wavefront structure from large aperture ICF optics[C]. SPIE, 1995, 2633: 361-385.
- 14 Liu Hongjie, Jing Feng, Zuo Yanlei, *et al.*. Study of the dividing method of the wave-front spatial frequency of the high-power-laser

- beam[J]. *Acta Photon Sin*, 2006, 35(10): 1464–1467.
- 刘红婕, 景 峰, 左言磊, 等. 高功率激光束波前空间频率划分的研究[J]. *光子学报*, 2006, 35(10): 1464–1467.
- 15 X Xiao, D Voelz. Wave optics simulation approach for partial spatially coherent beams[J]. *Opt Express*, 2006, 14(16): 6986–6992.
- 16 Y Yang, H Luo, X Wang, *et al.*. Wave optics simulation approach for high-power laser beam combination[J]. *Opt Commun.*, 2011, 284(13): 3207–3210.
- 17 J K Lawson, J M Auerbach, Jr R E English, *et al.*. NIF optical specifications—the importance of the RMS gradient[C]. SPIE, 1999, 3492: 336–343.
- 18 D M Aikens, C R Wolfe, J K Lawson. The use of power spectral density (PSD) functions in specifying optics for the National Ignition Facility[C]. SPIE, 1995, 2576: 281–292.
- 19 Zheng Wanguo, Zu Xiaotao, Yuan Xiaodong, *et al.*. *Damage Resistance and Physical Problem of High Power Laser Facilities*[M]. Beijing: Science Press, 2014: 4.
- 郑万国, 祖小涛, 袁晓东, 等. 高功率激光装置的负载能力及其相关物理问题[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 4.

栏目编辑: 宋梅梅