

文章编号: 1001-4322(2006)05-0811-04

# “神光-Ⅱ”装置倍频激光直接驱动 冲击波平面性的实验研究\*

黄秀光<sup>1</sup>, 傅思祖<sup>1</sup>, 吴 江<sup>1</sup>, 顾 援<sup>1</sup>, 马民勋<sup>2</sup>,  
舒 桦<sup>1</sup>, 周华珍<sup>1</sup>, 叶君建<sup>1</sup>, 何钜华<sup>1</sup>, 王世绩<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 上海激光等离子体研究所 高功率激光物理国家实验室, 上海 201800; 2. 上海电力学院 基础部, 上海 200090)

**摘 要:** 设计了 3 套针对“神光-Ⅱ”倍频激光直接驱动的透镜阵列均匀辐照系统, 并对冲击波的平面性进行了实验研究。结果表明, 冲击波的平面性与透镜阵列参数、平面靶厚度、靶面位置等有关, 采用列阵元数为 121 的透镜阵列进行激光束匀滑驱动的冲击波平面性最好, 间接说明它在靶面的激光辐照是最均匀的; 另外, 随着靶厚的增加, 冲击波平面性变差, 平面区变小; 而且冲击波平面性随靶面离焦位置的变化成一定的周期性变化, 第 2 套透镜阵列焦点处的冲击波平面性最好。

**关键词:** 激光状态方程; 透镜阵列; 冲击波; 平面性

**中图分类号:** O521.3; O347.5 **文献标识码:** A

激光高压状态方程实验要求激光驱动的冲击波具有大范围的良好平面性<sup>[1-3]</sup>。由于入射激光在同一时刻聚焦辐照到靶面产生冲击波, 靶面各处的冲击波压强取决于该点处的激光辐照强度, 强度越高, 压强越大, 相应的冲击波速度也越快, 在靶中传播一段距离后, 波阵面就越超前; 因此, 要获得平面性能良好的冲击波, 在实验观测范围内, 靶面激光辐照强度的空间分布必须是均匀的。然而, 即使入射光束为理想的平顶超高斯光束或均匀平面波, 使用通常的聚焦光学系统所得到的焦斑的光强分布也是很不均匀的, 不能形成平面冲击波, 因此需要对光束进行改造, 实现对靶面的均匀辐照<sup>[4-6]</sup>。“神光-Ⅰ”装置曾采用透镜阵列(LA)技术<sup>[7-10]</sup>对近场均匀分布的输出激光进行束匀滑改造, 并取得了较为满意的效果<sup>[3, 11-12]</sup>, 而在“神光-Ⅱ”装置光束特殊分布条件下需要进一步改进 LA 技术, 来实现靶面的均匀辐照。

针对“神光-Ⅱ”装置输出激光近场分布存在中心黑区(有大面积光强为零的区域)的特殊情况(如图 1 所示), 本文设计了 3 套倍频激光 LA 均匀辐照系统, 并对冲击波的平面性进行了细致的实验研究。

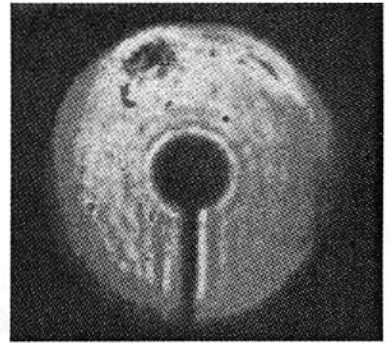


Fig. 1 Near-field distribution from “Shenguang-Ⅱ”  
图 1 “神光-Ⅱ”近场输出光斑

## 1 倍频激光 LA 均匀辐照系统的设计

透镜阵列与非球面主透镜组合聚焦系统的均匀化原理是利用波面分割与再重叠, 在主透镜焦面附近实现均匀靶面辐照。图 2 是其原理光路图, 图中, A 为非球面主聚焦透镜, B 为透镜阵列,  $d$  和  $f$  为列阵元口径和焦距,  $D$  和  $F$  为主透镜口径和焦距,  $C$  为主透镜焦面,  $E$  为小透镜阵列-非球面主透镜组合聚焦的焦面,  $l$  为  $E$  到  $C$  之间的距离,  $\phi$  为激光均匀辐照的焦斑尺寸,  $\phi = Fd/f$ 。LA 的最大特点是它所形成的焦斑的强度分布是“平顶”的, 且焦斑边沿的强度按指数率下降, 有足够的陡度, 这些对状态方程实验是非常有利的。从几何光学的角度, 列阵元数  $N$  越大, 靶面光强分布越均匀。但从物理光学的角度, 列阵元数  $N$  越大, 列阵元口径就越小, LA 菲涅耳数  $F_n = d\delta/4\lambda F$  也越小, 而子光束干涉条纹间隔  $\Delta X = \lambda F/d$  就越大, 因此, 硬边衍射效应和干涉效应就越明显, 这样会破坏靶面光强的均匀性。因此, 需要对 LA 均匀辐照系统进行总体的优化设计。

综合考虑了光学加工的可能和便利, 将列阵元设计为不等边六边形, 如图 3 所示。针对“神光-Ⅱ”输出激光特殊的近场分布(如图 1 所示), 在主透镜焦距和焦斑尺寸确定的情况下(“神光-Ⅱ”主透镜焦距  $F = 750$  mm,

\* 收稿日期: 2005-12-14; 修订日期: 2006-04-20  
基金项目: 国家 863 计划项目资助课题  
作者简介: 黄秀光(1970—), 男, 副研究员, 从事激光状态方程实验研究; huangxiuguang@sohu.com。

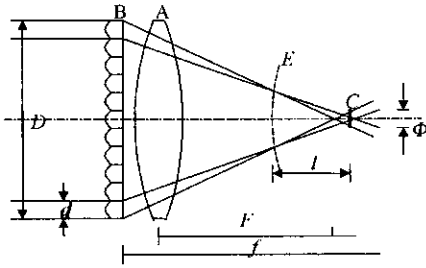


Fig. 2 Principle of the uniform irradiation system combined by small lens array and aspherical major lens

图 2 透镜阵列-主透镜均匀辐照光路图

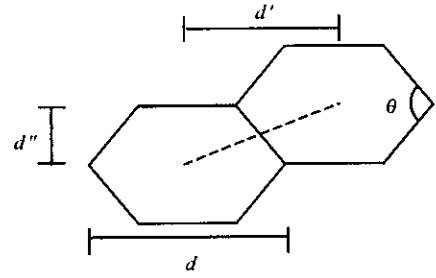


Fig. 3 Hexagonal small lens

图 3 六角形小透镜

状态方程物理实验要求焦斑尺寸约为  $0.9 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ ), 做了大量的数值模拟优化分析, 设计了 3 套参数不同的 LA 均匀辐照系统(见表 1)。3 套 LA 均匀辐照系统的焦斑尺寸基本相同, 但菲涅耳数  $F_n$  和干涉调制间隔有较大的差别, 列阵元数  $N$  越大的 LA 系统, 其  $F_n$  就越小,  $\Delta X$ (或  $\Delta Y$ ) 就越大, 这也许成为决定冲击波平面性好坏的关键因素。

表 1 3 套倍频激光 LA 均匀辐照系统参数

Table 1 Parameters of the three sets of LA uniform system for  $2\omega$  laser

No.	$F/\text{mm}$	$f/\text{mm}$	$d/\text{mm}$	$d'/\text{mm}$	$d''/\text{mm}$	$\theta/(\text{^\circ})$	$N$	$F_n$	$\delta_x/\mu\text{m}$	$\delta_y/\mu\text{m}$	$\Delta X/\mu\text{m}$	$\Delta Y/\mu\text{m}$
1	750	27 700	33.18	24.885	11.61	108.91	75	18.75	900.0	629.85	16.003	34.30
2	750	22 170	26.56	19.920	9.29	108.91	121	15.00	900.2	629.70	19.991	42.87
3	750	14 780	17.70	13.275	6.20	108.91	279	9.998	899.8	630.38	29.998	64.23

## 2 冲击波平面性实验研究结果与讨论

激光状态方程实验中, 主要用条纹相机来对靶背冲击发光信号作时间分辨记录, 平面靶背冲击发光信号前沿的平整度反映了冲击波的平面性, 用发光信号各空间位置的前沿到达时间起伏的标准偏差  $\delta$  来衡量,  $\delta$  越小, 平面性越好, 间接说明靶面辐照激光强度空间分布越均匀。因此, 利用上述 3 套 LA 均匀辐照系统对“神光- II”单路输出的倍频激光进行束匀滑改造, 通过对冲击波平面性的分析来间接地考核这 3 套 LA 均匀辐照系统的均匀化能力和效果。

图 4 给出了“神光- II”单路输出的倍频激光经过这 3 套 LA 均匀辐照系统辐照  $30 \mu\text{m}$  Al 平面靶的靶背冲击发光实验图像, 所有图像均是用条纹相机 2 ns 扫描档记录的, 且均为各自平面性最好时的结果, 各图中的  $\delta$  值均是在  $520 \mu\text{m}$  空间内的统计结果。结果表明, 采用  $N=121$  的第 2 套 LA 均匀辐照系统驱动的冲击波的平面性最好, 基本满足精密状态方程实验对冲击波平面性的要求。采用第 3 套 LA 均匀辐照系统驱动的冲击波的平面性最差, 而采用第 1 套 LA 均匀辐照系统驱动的冲击波的平面性则介于二者之间。从图 4 中可以看出, 随着列阵单元数的增加, 冲击波平面性变好, 但列阵单元数增加到一定的数目后冲击波平面性反而变差。这可能是由于尽管随着列阵单元数的增加, 光束被分割的更小, 但其菲涅耳数会减少, 硬边衍射效应会更明显, 而且

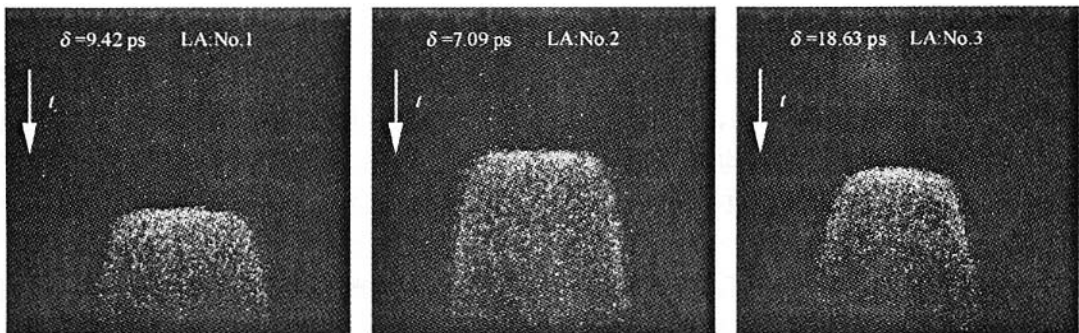


Fig. 4 Shock luminescence from rear surface of  $30 \mu\text{m}$  Al plane target

图 4  $30 \mu\text{m}$  Al 平面靶背冲击发光信号

干涉调制间隔会增大,特别当调制间隔增大到一定程度,激光小尺度自聚焦成丝效应将比较严重,可超过电子热传导横向抹平范围,从而使驱动的冲击波的平面性急剧变差。

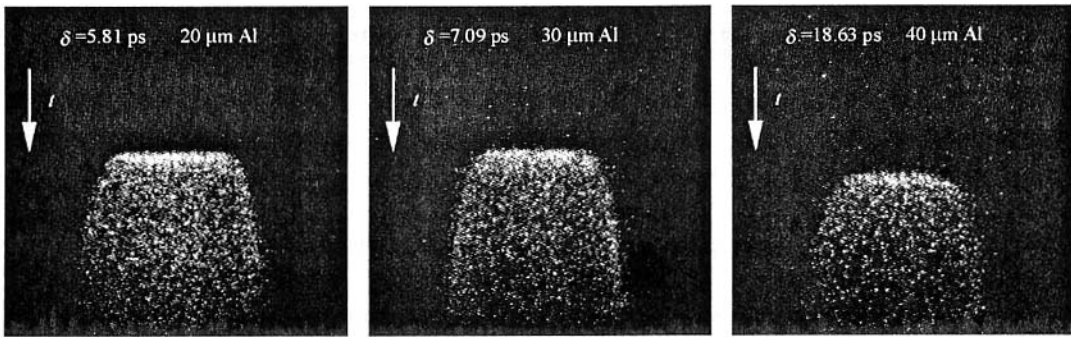


Fig. 5 Shock luminescence from rear surface of Al plane target with different thickness

图 5 不同厚度的 Al 平面靶背冲击发光信号

随后,对冲击波平面性随靶厚的变化情况进行了实验研究,采用均匀化效果最好的第 2 套 LA 进行实验,实验结果如图 5 所示,各图中的  $\delta$  值也均是在  $520 \mu\text{m}$  空间内的统计结果。结果表明,Al 平面靶厚度从  $20 \mu\text{m}$  增加到  $40 \mu\text{m}$  时,平面性起伏  $\delta$  从  $5.81 \text{ ps}$  变差到  $18.63 \text{ ps}$ ,说明随着靶厚的增加,冲击波平面性变差,而且平面区也变小。其原因是:首先,尽管采取了 LA 束匀滑措施,但靶面激光强度空间分布也不可能绝对均匀,依然存在小尺度范围的强度调制,必然导致冲击波强度和冲击波速度的空间分布依然是不均匀的,冲击波阵面传播存在先后涨落,而且随着靶厚度的增加,冲击波阵面在时间上的涨落会更明显,因此,靶背冲击发光信号前沿的时间起伏就更明显,冲击波平面性会更差。同时,随着靶厚的增加,冲击波边侧稀疏效应越明显,将导致冲击平面区减小。但从实验结果来看,冲击波的平面性变差与靶厚度的增加并不呈线性关系,说明冲击波的平面性可能还跟驱动激光波形等有关,需作进一步的细致研究。

从 LA 的匀滑原理我们知道,当靶面适当离焦时,干涉条纹各主极大之间的次级大的强度会迅速增长,从而使条纹细密度增加,会提高靶面的辐照均匀性,因此,对冲击波的平面性随靶面离焦位置的变化规律进行研究也是必要的。首先采用第 2 套 LA 进行实验,图 6 给出了  $30 \mu\text{m}$  Al 平面靶在不同离焦位置时的靶背冲击发光信号图像,各图中的  $\delta$  值均是在  $490 \mu\text{m}$  空间内的统计结果。结果表明,随离焦量的增加,冲击波平面性呈一定的周期性变化,焦点处的冲击波平面性最好。而采用第 1 套 LA 进行实验时,焦后  $150 \mu\text{m}$  处的冲击波平面性最好。说明对于不同的 LA 均匀辐照系统,冲击波平面性最好时的靶面离焦位置是不一样的。

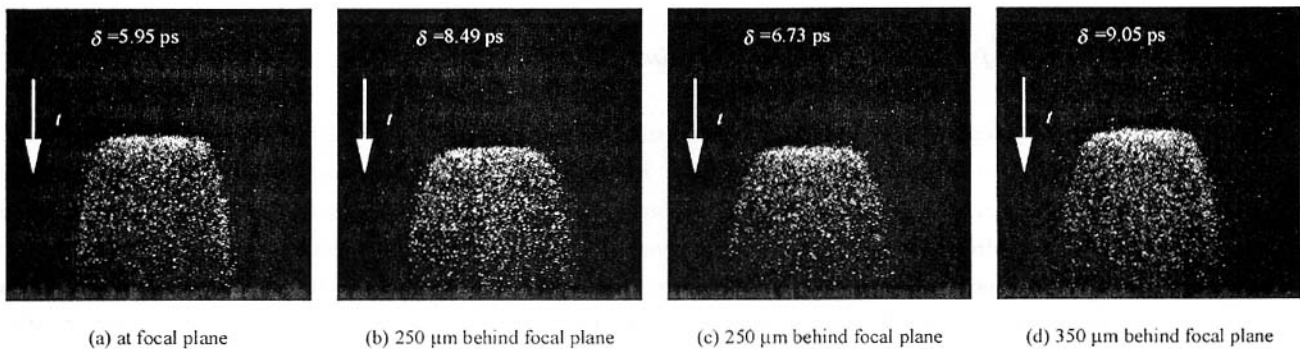


Fig. 6 Shock luminescence from rear surface of Al plane target at different position

图 6 处于不同位置的 Al 平面靶背冲击发光信号

### 3 结 论

根据 LA 的均匀化原理及“神光-Ⅱ”输出激光近场分布,设计了 3 套倍频激光的 LA 均匀辐照系统,并进行了实验考核。结果表明,采用列阵元数  $N=121$  的第 2 套 LA 进行激光束匀滑驱动的冲击波平面性最好,间接说明它的均匀化效果最好,靶面激光强度空间分布最均匀。另外,实验也表明,随着靶厚的增加,冲击波平面性变差,平面区变小。冲击波平面性随靶面离焦位置的变化成一定的周期性变化,列阵元数为 121 的 LA 焦点处的冲击波平面性最好。

## 参考文献:

- [1] DaSilva L B, Celliers P, Collins G W, et al. Absolute equation of state measurements on shocked liquid deuterium up to 200 GPa (2 Mbar) [J]. *Phys Rev Lett*, 1997, **78**(3): 483-486.
- [2] Batani D, Balducci A, Beratta D, et al. Equation of state data for gold in the pressure range  $<10$  TPa[J]. *Phys Rev B*, 2000, **61**(14): 9287-9294.
- [3] Fu S Z, Gu Y, Wu J, et al. Laser-driven shock stability in Al and shock compressibilities of Fe up to 0.8 TPa and SiO<sub>2</sub> up to 0.4 TPa[J]. *Phys Plasmas*, 1995, **2**(9): 3461-3465.
- [4] Kato Y, Mima K. Random phase shifting of laser beam for absorption profile smoothing and instability suppression in laser produced plasma [J]. *Appl Phys B*, 1982, **29**(3): 186-187.
- [5] Lehmborg R H, Obenschain S P. Use of induced spatial incoherence for uniform illumination of laser fusion targets[J]. *Opt Commun*, 1983, **46**(1): 27-31.
- [6] Dixit S N, Lawson J K, Manes K R, et al. Kinoform phase plates for focal plane irradiance profile control[J]. *Opt Lett*, 1994, **19**(6): 417-419.
- [7] Deng X, Liang X, Chen Z, et al. Uniform illumination of large targets using a lens array[J]. *Appl Opt*, 1986, **25**(3): 377-381.
- [8] 邓锡铭, 梁向春, 陈泽尊, 等. 用透镜阵列实现大焦斑面的均匀照射[J]. 中国激光, 1985, **12**(5): 257-260. (Deng X M, Chen Z Z, Liang X C, et al. Uniform illumination of large focal targets using a lens array. *Chinese Journal of Lasers*, **12**(5): 257-260)
- [9] 陈泽尊, 梁向春, 邓锡铭. 用透镜阵聚焦实现均匀辐照的计算机分析[J]. 中国激光, 1986, **13**(2): 65-70. (Chen Z Z, Liang X C, Deng X M. Computer analysis by lens array for uniform illumination. *Chinese Journal of Lasers*, 1986, **13**(2): 65-70)
- [10] 丘悦, 邓锡铭. 列阵均匀照明系统的优化设计[J]. 强激光与粒子束, 1997, **9**(4): 207-510. (Qiu Y, Deng X. Optimization design of the optical array uniform illumination systems. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, **9**(4): 507-510)
- [11] 顾援, 王永刚, 傅思祖, 等. 实验测定铜在 0.4~0.8 Tpa 压力范围内的冲击绝热线[J]. 强激光与粒子束, 1991, **3**(1): 1-11. (Gu Y, Wang Y G, Su S Z, et al. Shock adiabat measurements on copper in the pressure range from 0.4 TPa to 0.8 TPa. *High Power Laser and Particle Beams*, 1991, **3**(1): 1-11)
- [12] Gu Y, Fu S Z, Wu J, et al. Equation of state studies at SILP by laser-driven shock wave[J]. *Laser and Particle Beams*, 1996, **14**(2): 157-169.

## Experimental researches on planarity of shock wave directly driven by $2\omega$ laser beam of “Shenguang- II ” facility

HUANG Xiu-guang<sup>1</sup>, FU Si-zu<sup>1</sup>, WU Jiang<sup>1</sup>, GU Yuan<sup>1</sup>, MA Min-xun<sup>2</sup>,  
SHU Hua<sup>1</sup>, ZHOU Hua-zhen<sup>1</sup>, YE Jun-jian<sup>1</sup>, HE Ju-hua<sup>1</sup>, WANG Shi-ji<sup>1</sup>

(1. *National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Laser Plasma, CAEP, P. O. Box 800-229, Shanghai 201800, China;*

2. *Department of Basic Science, Shanghai Institute of Electric Power, Shanghai 200090, China)*

**Abstract:** Three sets of lens array (LA) uniform illumination system were designed, which were used in double-frequency laser direct drive experiments on “Shenguang-II” laser facility. Experimental investigations on shock planarity were carried out. The results show that the shock planarity has strong relationship with the LA's parameters, plane target's thickness and target's position. The shock planarity driven by the LA with 121 elements is the best, and which indirectly indicates that the illumination of the 121-element LA is the most uniform, too. Moreover, with the target thickness increasing, the shock planarity becomes worse, and the planar area becomes smaller. Also, the shock planarity shows some periodical change with the target's position, and the shock planarity at focal plane is the best for 121-element LA.

**Key words:** Laser equation of state; Lens array; Shock wave; Planarity