

甚多束激光直接驱动靶面辐照均匀性研究

邓学伟 周维 袁强 代万俊 胡东霞 朱启华 景峰

Capsule illumination uniformity illuminated by direct laser-driven irradiation from several tens of directions

Deng Xue-Wei Zhou Wei Yuan Qiang Dai Wan-Jun Hu Dong-Xia Zhu Qi-Hua Jing Feng

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 195203 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.195203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.195203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I19>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

球形黑腔辐射输运问题的蒙特卡罗模拟

Monte Carlo simulation of the radiation transport of spherical holraum

物理学报.2015, 64(14): 145203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.145203>

氘气-塑料靶丸变收缩比内爆物理实验研究

Variations of implosion performance with compression ratio in plastic DD filled capsule implosion experiment

物理学报.2015, 64(12): 125203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.125203>

基于神光 III 原型的整形激光直接驱动准等熵压缩实验研究

Quasi-isentropic experiment based on Shen Guang-III prototype laser facility with laser direct drive illumination

物理学报.2015, 64(8): 085202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.085202>

玻璃微球内氘结晶行为研究

Crystallization behaviors of deuterium in glass microsphere

物理学报.2015, 64(1): 015202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.015202>

基于焦斑空间频率全域优化的偏振匀滑设计

Polarization smoothing design for improving the whole spatial frequency at focal spot

物理学报.2014, 63(21): 215202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.215202>

## 甚多束激光直接驱动靶面辐照均匀性研究\*

邓学伟 周维 袁强 代万俊 胡东霞† 朱启华 景峰

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2015年3月19日收到; 2015年6月11日收到修改稿)

针对甚多束激光辐照下的直接驱动靶面光强均匀分布开展了系统研究. 利用球谐模分析选定了可实现均匀辐照的靶面弹着点极角分布, 并通过数值模拟确定了以等效48束激光直接驱动辐照下靶面三环弹着点极角位置分别为 $22.4^\circ$ ,  $47.7^\circ$ 和 $73.6^\circ$ . 基于特定装置构型分析了实现极向直接驱动时对各路激光指向的修正, 并对光束截面焦斑进行了优化, 实现了极向直接驱动下的靶面均匀辐照.

**关键词:** 靶面辐照均匀性, 极向直接驱动, 惯性约束聚变

**PACS:** 52.57.-z, 42.60.-v, 42.60.Jf

**DOI:** 10.7498/aps.64.195203

## 1 引言

激光惯性约束聚变(ICF)是目前人类研究可控核聚变的主要技术途径之一<sup>[1,2]</sup>, 需要建设百万焦耳量级的巨型激光驱动器, 从多个方向均匀辐照靶丸, 实现靶丸的对称压缩. 激光辐照方式包含间接驱动<sup>[3]</sup>和直接驱动<sup>[4]</sup>两种. 目前世界上用于ICF研究的主要激光驱动器均采用了间接驱动的构型, 如美国的国家点火装置(NIF)、法国的兆焦耳激光装置(LMJ)和中国的神光系列激光装置. 但NIF建成后的一系列实验表明, 间接驱动会引入严重的激光等离子体相互作用(LPI)效应<sup>[5]</sup>, 导致激光能量损失, 降低了束靶耦合效率, 甚至预热靶丸. 以实现点火为主要目标的美国国家点火攻关计划最终未能实现点火目标<sup>[6]</sup>, 其主要原因就是间接驱动中黑腔内能量耦合效率较低, 靶丸吸收能量不足.

尽管主要激光驱动器均采用了间接驱动的构型设计, 直接驱动方案从早期就未被完全放弃, 甚至NIF在早期的设计中, 还考虑了兼顾直接驱动的设计<sup>[7]</sup>. 而后续研究发展出的快点火<sup>[8]</sup>与冲击点火<sup>[9]</sup>两种新型直接驱动方式, 能以较少能量和更好

的流体力学稳定性实现点火. 由于现役装置基本都采用间接驱动构型, 激光注入孔主要分布在靶球两极区域, 并不适合向心辐照的直接驱动, 研究人员又提出了极向直接驱动(PDD)的辐照方式<sup>[10]</sup>. 其最大优势是仅需改变光束指向和束间能量分布, 即可实现类似直接驱动的均匀压缩. 这样在间接驱动构型的驱动器上也可以先期开展直接驱动关键技术的研究.

国际上, NIF及LMJ装置上均开展了PDD技术研究<sup>[11,12]</sup>. 而我国研究人员也在已建成的万焦耳级ICF激光驱动装置上开展了相关研究<sup>[13]</sup>. 随着我国ICF工程建设的进展, 国内初步具备了100 kJ量级的激光驱动平台, 可以稳步开展间接或直接激光驱动的各项关键技术研究. 由于我国一系列激光驱动器均属于间接驱动构型设计, 基于这些装置开展直接驱动研究时, 必须对光束指向、能量分布甚至焦斑形态等进行优化设计. 100 kJ级激光装置具有数十束激光, 在靶面上下半球须以多环分布的方式排列, 因而必须对每环光束的指向和环间能量分布同时进行优化设计. 相比我国早期万焦耳级激光驱动平台上激光在靶面上下半球均只有一环分布的情况而言<sup>[13]</sup>, 基于十万焦耳级激光驱动平台

\* 国家高技术研究发展计划资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dongxia.hu@163.com

的直接驱动靶面光强优化, 具有光路更多、指向更复杂、优化变量更多的难点.

本文将对其多束激光辐照下的直接驱动靶面光强均匀性开展研究, 提出一种用于其多束激光直接驱动靶面均匀辐照的通用优化方法. 首先分析直接驱动下的靶面弹着点分布与靶面光强均匀性的关系, 获得靶面弹着点的优化设计; 其次基于间接驱动辐照构型, 对靶面光强分布进行分析, 从改变光束指向和焦斑形态等角度探索利用间接驱动装置开展直接驱动技术研究的可能性, 为未来相关研究的发展奠定基础.

## 2 靶面弹着点设计

### 2.1 球谐模分析

目前世界主流激光驱动器均采用间接驱动构型, 从两级方向对靶丸进行辐照. 为研究基于间接驱动装置的直接驱动靶面辐照均匀性, 首先要对直接驱动下的靶面光束排布进行优化. 早期开展的直接驱动靶面光强分布仅考虑了光束完全对称分布的情况<sup>[14]</sup>, 实际上, 由于工程及装置安全的考虑, 必须避免光束注入孔间的光束对穿, 因此必须对光束排布进行优化设计. 本文的优化过程将光束数量选取为48束, 实际上对于其多束激光而言, 采用组束聚焦的方式, 将多束激光聚焦在同一点, 可等效为优化过程中的一束光, 如NIF就采用4束聚焦为一点的方式, 192路激光从48个方向辐照靶丸, 可等效为48束激光辐照. 考虑48束激光在球形靶丸上按平行于靶面赤道的环分布, 相应环的极角为 $\theta_r$ , 则极角越大, 环上相应分布的光斑数量就越多, 环上排布的光束数量 $n$ 与环极角 $\theta_r$ 的关系满足 $n \propto \cos\theta_r$ . 对于48束光的排布, 选择靶丸每个半球分布3环较为合理, 从极向到赤道方向每环光束分布为4, 8, 12束. 在选择各环极角时, 通常利用球谐模分析靶面光强的均匀性. 对均匀性影响最大的为2阶球谐模<sup>[15]</sup>:

$$P_2(\theta_r) = \frac{3}{2} \cos^2(\theta_r) - \frac{1}{2}, \quad (1)$$

则靶丸每个半球上的三环光束叠加效果为

$$P = 4P_2(\theta_{r1}) + 8P_2(\theta_{r2}) + 12P_2(\theta_{r3}), \quad (2)$$

要使靶面光强分布最为均匀, 应使总的二阶球谐模等于零. 利用(2)式首先对三环角度分布的组合

进行选择, 每一个1, 2环极角的组合都对应一个确定的3环极角使总的2阶球谐模趋于零, 结果如图1(a)所示. 这一系列的三环角度分布构成了优化靶面光束排布的基础. 图1(b)给出了图1(a)中一环角处于 $10^\circ$ 到 $30^\circ$ 、二环角处于 $30^\circ$ 到 $60^\circ$ 区间内的球谐模分布. 其中的暗区对应了球谐模趋于0的区域, 也是从球谐模角度考虑靶面三环光束极角分布的最优选择.

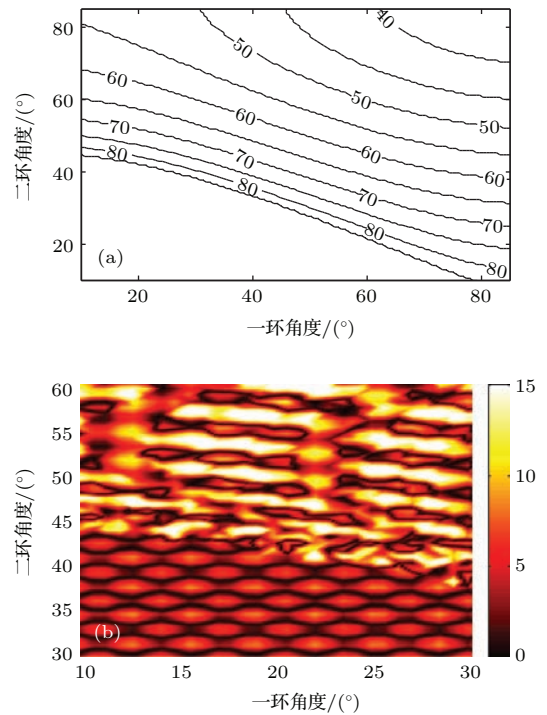


图1 (网刊彩色) (a) 靶面三环光束极角分布图; (b) 对应角度分布下的二阶球谐模

Fig. 1. (color online) (a) The polar angle distribution of the three rings on the target; (b) the corresponding 2<sup>nd</sup> order spherical mode distribution.

### 2.2 靶面辐照角优化

在针对某一特定装置进行辐照角度优化前, 首先考虑光束向心辐照时的靶面光强分布, 以确定优化的靶面三环光束极角分布. 计算方法为, 将不同方向向心入射的激光投影到靶面, 使各束光在靶面非相干叠加, 通过计算靶面光强分布的均匀性, 决定最优的向心辐照角分布. 实际上, 激光能量被靶丸吸收的部分与激光等离子相互作用过程密切相关, 与等离子体状态有很大关系. 目前对于该吸收效率特性尚没有明确结论, 因此本文涉及的模拟计算并未考虑激光与等离子相互作用的过程, 仅考虑靶丸静态情况下的靶面光强分布. 使用的激光焦斑在靶丸附近的横截面强度分布为5阶超高斯型. 由

于靶丸相对于聚焦透镜半径非常小, 在其半径范围内均可忽略光束口径及焦斑细节的变化. 对直接驱动而言, 较小的焦斑不利于靶面光强分布的均匀性, 因此需要使用合适的连续位相板 (CPP) 扩大焦斑尺寸 [16], 使不同焦斑合理叠加, 形成均匀光强分布. 通常选择焦斑尺寸比靶丸尺寸略小为宜 (约 0.9 倍靶丸尺寸) [7].

考虑所有光束辐照强度一致的情况下, 按照图 1 给出的三环极角分布计算靶面光强均匀性, 结果如图 2 (a) 所示. 结合图 1 和图 2 可以看出, 在球谐模分布相对稳定的区域, 即图 1 (a) 中的左下角区域内, 靶面光强分布随极角变化有一个突变的边界 (图 2 (a) 中的虚线). 这是由于随着二环光束向一环靠近, 其对二阶球谐模的贡献与一环光束趋同, 导致二阶球谐模对二环角度变化不敏感. 从图中可以看到, 靶面光强均匀性小于 1% 的区域大部分分布在该边界之外. 因此直接驱动靶面光束极角设计应避免该边界包围的区域. 依据图 2 所示的靶面光强优化结果, 可将三环角度确定为  $22.4^\circ$ ,  $47.7^\circ$  和  $73.6^\circ$ , 此时计算所得的靶面光强不均匀度为 0.29%, 符合直接驱动条件下靶面光强均匀性优于 1% (RMS 值) 的要求.

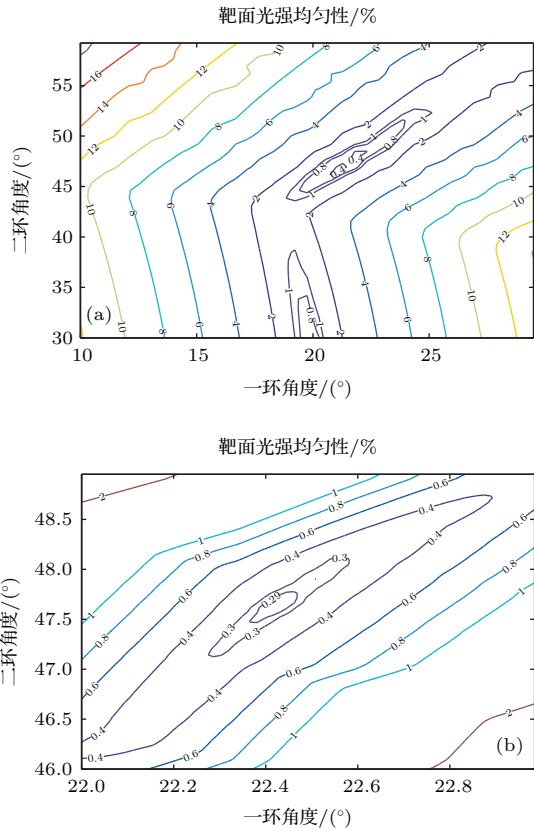


图 2 (网刊彩色) 靶面辐照角优化结果 (a) 较大区域的优化结果; (b) 较小区域的优化结果  
Fig. 2. (color online) The optimization result of the polar angles: (a) in a larger angle range; (b) in a smaller angle range.

### 3 基于特定辐照角的 PDD 优化设计

当甚多束激光指向分布不满足上节中最优的三环分布时, PDD 优化过程需增加对光束指向的调整, 将间接驱动构型下的四环光束在靶面变为三环分布. 此外, 还需改变焦斑强度分布, 以抵消指向变化带来的靶面光强变化.

#### 3.1 光束指向调整

PDD 优化设计需要激光初始辐照角作为输入条件. 考虑 48 束激光从靶室的上下两极注入, 激光注入孔在靶室的上下半球各有四环分布, 四环的极角分别为  $28.5^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $49.5^\circ$  和  $55^\circ$ , 对应的光束数量分别为 4 束、4 束、8 束和 8 束 [17]. 下半球与上半球的光束分布满足平面内的旋转对称关系, 如图 3 (a)

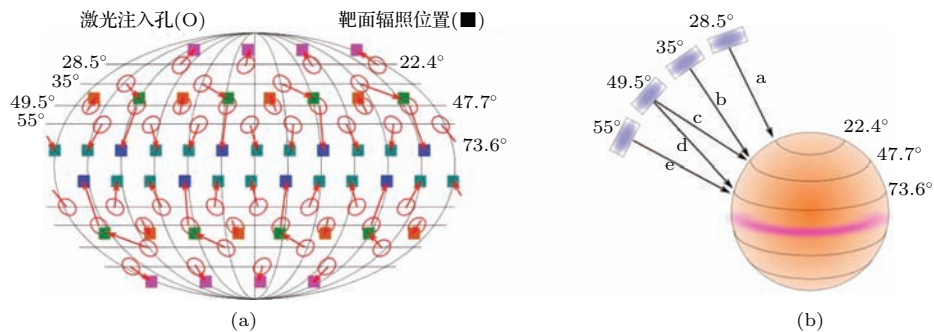


图 3 (网刊彩色) 光束指向调整示意图 (a) 光束注入位置及瞄靶位置调整图; (b) 原四环注入光束指向新的靶面三环位置  
Fig. 3. (color online) Repoint the lasers in polar direct drive scheme: (a) laser entrance holes and the corresponding redirections; (b) four rings of lasers are rearranged to three rings on the target.

所示. 要将这四环光束分别投射到靶面极角为  $22.4^\circ$ ,  $47.7^\circ$  和  $73.6^\circ$  的三环内, 意味着所有光束都不会指向靶心, 而是偏离一定的距离, 如图 3(b) 所示. 考虑到激光注入孔的具体分布, 图 3(a) 给出了激光指向调整的具体方案.  $28.5^\circ$  环上的四束注入激光均指向靶面  $22.4^\circ$  环位置;  $35^\circ$  环上四束光与  $49.5^\circ$  环上的四束光指向靶面  $47.7^\circ$  环位置;  $49.5^\circ$  环上剩余四束光与  $55^\circ$  环上的八束光共同指向靶面  $73.6^\circ$  环的位置. 从北极至赤道, 可将原来北半球的 24 束激光分为五组, 指向调整的具体方案如图 3(a) 中箭头指向的方块所示. 其中指向调整最大的为  $49.5^\circ$  环上的光束, 其指向在靶面极角的改变为  $24.1^\circ$ .

### 3.2 焦斑优化

光束截面强度在靶面的投影决定了最终落在靶面的激光强度. 当同一注入孔的光束指向极轴不同位置时, 落在靶面的光强分布也会发生显著变化. 因此, 采用向心辐照获得的最优角度, 并不对应 PDD 情况下的最优角度. 考虑到焦斑尺寸小于靶丸尺寸, 可以通过改变焦斑形态, 使 PDD 辐照下的靶面光强分布与向心辐照下的靶面光强分布一致, 如图 4 所示. 向心辐照下的光束在靶面形成新的强度分布, 从极向入射的光束如果完全覆盖该区域, 则可以通过逐点一一对应的方式将原有向心

辐照的光束截面强度分布转换到 PDD 辐照光束的截面上. 这种转换只能在光斑小于靶丸尺寸的情况下进行, 否则由于靶丸自身的遮挡效应, PDD 光束无法完全覆盖向心辐照光束照射的区域. 优化过程中, 焦斑尺寸为靶丸尺寸的 0.9 倍, 其可允许的 PDD 辐照角与向心辐照角之间的最大夹角(即图 4 中极向光束与向心光束间的夹角)为  $25.8^\circ$ . 对图 3(a) 所示构型来说, 最大夹角为  $24.1^\circ$ , 因此可以通过改变焦斑形态完全模拟向心辐照时的靶面光强分布.

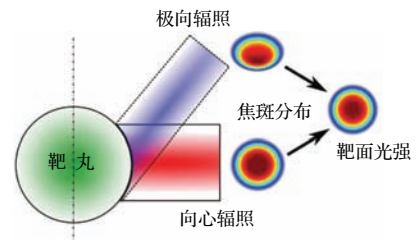


图 4 (网刊彩色) 利用 PDD 辐照模拟向心辐照靶面光强分布示意图

Fig. 4. (color online) Schematic of simulating direct drive radiation field with a polar drive laser.

按照图 3(b) 所示的 5 组光束入射到靶面三环的示意图, 很容易得到每一组 PDD 辐照光束与对应向心辐照光束间的夹角, 即可通过空间坐标变换获得 PDD 辐照的光束截面光强. 考虑直接驱动靶丸半径为  $0.87 \text{ mm}$  的情况<sup>[18]</sup>, 图 4 给出了图 3(b)

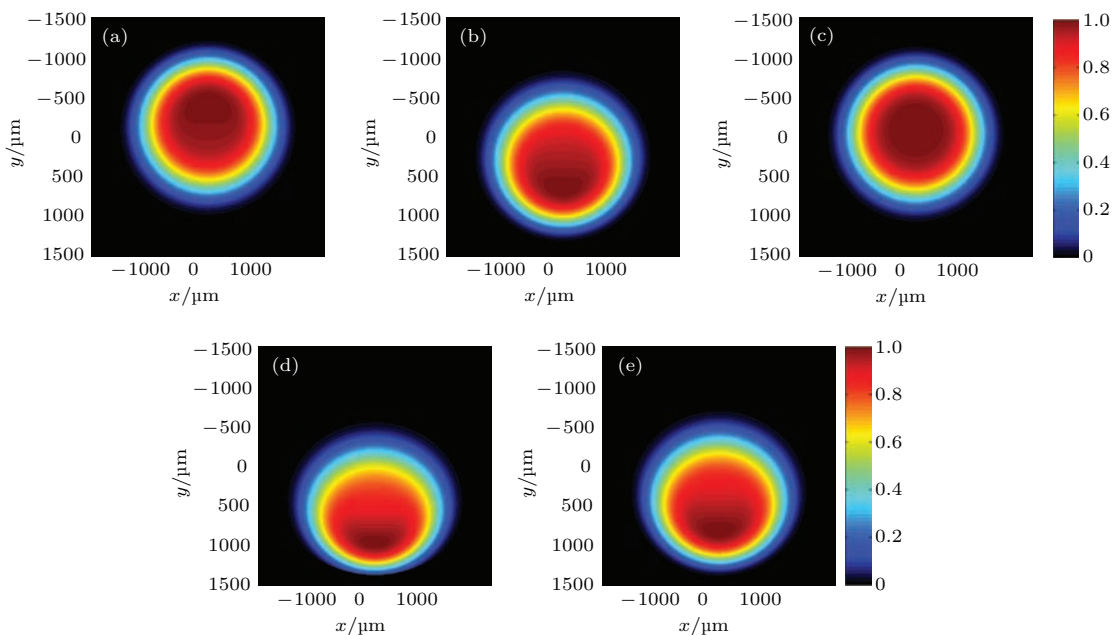


图 5 (网刊彩色) PDD 辐照优化焦斑形态

Fig. 5. (color online) Optimized laser focal spots.

中 a, b, c, d, e 五组光束所需的截面焦斑形态. 焦斑变换后, 对各组光束能量的需求也发生了变化. 如果向心辐照所需单光束能量为 1, 则五组 PDD 光束所需的单光束能量分别为 1.01, 1.03, 1.00, 1.12 和 1.07. 考虑各组含有的光束数量, 采用图 5 所示的异形焦斑使整个驱动器输出能量的利用率降为 95%. 这种能量利用率的降低是可以接受的. 但异形焦斑具有特殊的空间分布, 如图 5 (d) 所示的焦斑下边缘强度快速下降, 这对 CPP 的设计加工提出了更高的要求.

### 3.3 优化效果分析

按照图 3 (a) 所示注入孔分布和前文优化的极向直接驱动靶面弹着点分布及焦斑形态, 可以模拟计算靶面光强分布情况. 相关计算参数中, 聚焦透镜半径为 4 m, 靶丸半径仍采用 0.87 mm. 在不使用异形焦斑的情况下, 极向入射光截面光强分布仍为 5 阶超高斯形态时, 靶面光强分布如图 6 (a) 所示. 此时靶面光强仍存在显著的光强分布不平衡, 赤道及两极光强分布偏弱, 而中间区域较强, 整体

光强分布不平衡达到 3.52% (RMS 值), 而赤道区域与极角 40° 区域的能量分布差值更是达到了 11.9% (PV 值), 图 6 (c) 中的实线给出了靶面能量随极角分布的情况. 这样显著的靶面能量分布不均匀会导致靶丸压缩的不对称甚至破裂. 当采用图 5 所示的异形焦斑时, PDD 下的靶面光强分布得到了明显优化. 图 6 (b) 显示了采用异形焦斑下的靶面光强分布情况, 可以看出靶面获得了较好的平滑度. 此时靶面能量随极角分布情况如图 6 (c) 中虚线所示, 可见靶面获得了均匀的光强分布, 靶面光强不均匀度为 0.27% (RMS 值), 优于直接驱动对光强均匀性 1% (RMS 值) 的要求. 这样, 靶面较为均匀的光强分布可以保障靶丸在吸收激光能量后实现均匀压缩.

## 4 结 论

本文针对直接驱动靶面光强均匀性开展了研究, 提出一种用于间接驱动甚多束激光辐照下实现 PDD 靶面光强均匀分布的优化设计方法. 在不考虑激光等离子相互作用的情况下, 从纯光学设计的角度分析了靶面弹着点优化、焦斑形态优化对 PDD 情况下的靶面光强分布影响. 首先利用二阶球谐模分析可获得靶面三环弹着点分布的极角优化组合, 再通过数值模拟的方法从这些组合中选取靶面光强不均匀性最小的三环极角值, 将其确定为直接驱动靶面弹着点优化位置; 其次对极向不同角度入射光束的焦斑进行优化, 获得了优化的焦斑形态, 并最终实现 PDD 辐照下的靶面光束均匀分布. 尽管尚未考虑等离子体吸收曲线对最终靶丸表面能量沉积均匀性的影响, 但本文提出的基于间接驱动装置的 PDD 均匀辐照优化方法为未来的直接驱动研究提供了基础, 也为甚多束激光辐照下的靶丸压缩对称性研究提供了思路.

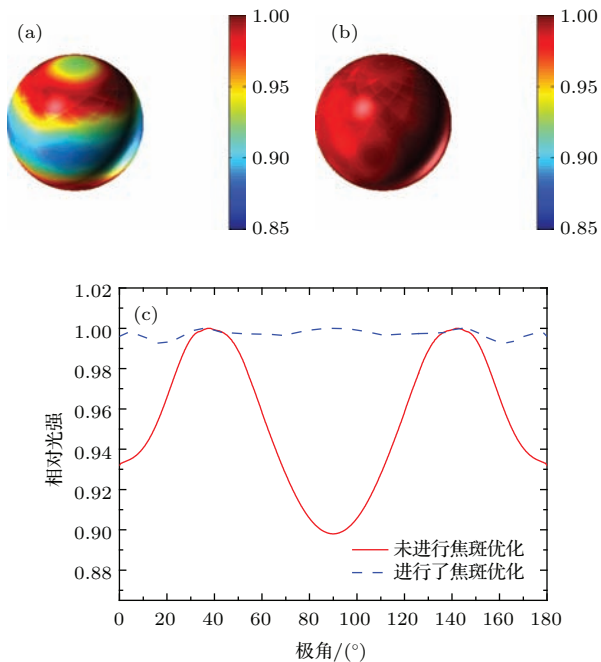


图 6 (网刊彩色) 优化角度的 PDD 辐照下, 采用异形焦斑前后的光强分布对比 (a) 未采用异形焦斑时的靶面光强分布; (b) 采用异形焦斑时的靶面光强分布; (c) 两种情况下靶面能量随极角分布的对比

Fig. 6. The comparison of the laser intensity uniformity on the target before and after optimization in the polar direct drive scheme: (a) without; (b) with optimized focal spots; (c) the laser intensity distributions versus the polar angle.

### 参考文献

- [1] Basov N G 1993 *Quantum Electron* **23** 262
- [2] Wang G C 1987 *Chin. J. Lasers* **14** 641
- [3] Nakai S, Mima K 2004 *Rep. Prog. Phys.* **67** 321
- [4] Bodner S E, McCrory R L, Afeyan B B 1998 *Phys. Plasmas* **5** 1901
- [5] Froula D H, Divol L, London R A, Berger R L, Döppner T, Meezan N B, Ralph J, Ross J S, Suter L J, Glenzer S H 2010 *Phys. Plasmas* **17** 056302

- [6] Brumfiel G 2012 *Nature* **491** 170
- [7] Eimerl D 1995 LLNL UCRL-ID-120758
- [8] Betti R, Zhou C D, Anderson K S, Perkins L J, Theobald W, Solodov A A 2007 *Phys. Rev Lett.* **98** 155001
- [9] Tabak M, Hammer J, Glinsky M E, Kruer W L, Wilks S C, Woodworth J, Campbell E M, Perry M D, Mason R J 1994 *Phys. Plasmas* **1** 1626
- [10] Skupsky S, Marozas J A, Craxton R S, Betti R, Collins T J B, Delettrez J A, Goncharov V N, McKenty P W, Radha P B, Boehly T R, Knauer J P, Marshall F J, Herding D R, Kilkenny J D, Meyerhofer D D, Sangster T C, McCrory R L 2004 *Phys. Plasmas* **11** 2763
- [11] Weilacher F, Radha P B, Collins T J B, Marozas J A 2015 *Phys. Plasmas* **22** 032701
- [12] Temporal M, Canaud B, Garbett W J, Ramis R, Weber S 2014 *High Power Laser Science and Engineering* **2** 12
- [13] Li P, Zhao R C, Wang W, Geng Y C, Pu Y D, Su J Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 085206 (in Chinese) [李平, 赵润昌, 王伟, 耿远超, 蒲昱东, 粟敬钦 2014 物理学报 **63** 085206]
- [14] Xiao J, Lü B D, Feng G Y, Yuan X D 1998 *Acta Opt. Sin.* **18** 1646 (in Chinese) [肖峻, 吕百达, 冯国英, 袁晓东 1998 光学学报 **18** 1646]
- [15] Pollaine S M, Haan S W 1997 UCRL-LR-105821-98-1
- [16] Li P, Jia H T, Wang F, Liu L Q, Su J Q 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 318 (in Chinese) [李平, 贾怀庭, 王芳, 刘兰琴, 粟敬钦 2009 中国激光 **36** 318]
- [17] Wang M C, Zhu M Z, Chen G, Wu W K, Fu X N 2013 *Laser & Optoelectronics Progress* **50** 011403 (in Chinese) [王美聪, 朱明智, 陈刚, 吴文凯, 傅学农 2013 激光与光电子学进展 **50** 011403]
- [18] Yuan Q, Hu D X, Zhang X, Zhao J P, Hu S D, Huang W H, Wei X F 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 015202 (in Chinese) [袁强, 胡东霞, 张鑫, 赵军普, 胡思得, 黄文会, 魏晓峰 2011 物理学报 **60** 015202]

# Capsule illumination uniformity illuminated by direct laser-driven irradiation from several tens of directions\*

Deng Xue-Wei Zhou Wei Yuan Qiang Dai Wan-Jun Hu Dong-Xia<sup>†</sup>  
Zhu Qi-Hua Jing Feng

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

( Received 19 March 2015; revised manuscript received 11 June 2015 )

## Abstract

Capsule illumination uniformity obtained by direct driving lasers from several tens of directions is studied systematically. The best polar angles of the three focal spot rings on the capsule are determined to be  $22.4^\circ$ ,  $47.7^\circ$ , and  $73.6^\circ$  by a spherical-harmonic mode analysis and a numerical simulation. Based on the configuration of indirect laser driven facility, we have optimized the beam re-directions and the focal spot distributions for polar direct drive, which smooth successfully the illumination distribution on the capsule.

Laser driven inertial confinement fusion is an important way to achieve controllable nuclear fusion for human beings, which includes two laser-driven schemes—directly driving and indirectly driving scheme. Since the indirect driving scheme considerably relaxes the strict requirements for laser performance and decreases the engineering difficulties, the main laser facilities around the world have adopted the indirect driving scheme, such as the National Ignition Facility in the U. S., the Laser Megajoule in France, and the SG series laser drivers in China.

Meanwhile, scientists keep developing the key technologies for directly driving and have made great progress. For example, the fast ignition and shock ignition are two new methods to achieve fusion ignition in the direct driving scheme, which attracted lots of attention in the past few years. However, the main laser drivers for inertial confinement fusion research are configured as indirect drivers, which are not suitable for direct driving experiments. So a compromising suggestion was proposed that by redirecting the lasers, changing the laser energy distributions, designing new type of targets, and so on, a radiation field which is very close to a direct driving radiation field can be simulated in a laser facility that is configured as an indirect driver. This is the so called polar direct drive method that provides a feasible way for primary researches on direct driving technologies in an indirect laser driver. Such experiments have already been conducted in the National Ignition Facility.

In China, the large indirect laser driver with an output capability in the level of hundreds kilojoule will finish its engineering construction and routinely operate for physical experiments soon. To achieve a good polar direct drive performance in this laser facility is much more difficult than in previous smaller laser drivers. In this paper, capsule illumination uniformity by directly driving laser from several tens of directions is studied systematically. The best polar angles of the three focal spot rings on the capsule are determined to be  $22.4^\circ$ ,  $47.7^\circ$ , and  $73.6^\circ$  by a spherical-harmonic mode analysis and a numerical simulation. Based on the configuration of indirect driving laser facility, we have optimized the beam re-directions and the focal spot distributions for polar direct drive, which successfully smoothes the illumination distribution on the capsule.

**Keywords:** capsule illumination uniformity, polar direct drive, SG-III laser facility

**PACS:** 52.57.-z, 42.60.-v, 42.60.Jf

**DOI:** [10.7498/aps.64.195203](https://doi.org/10.7498/aps.64.195203)

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [dongxia.hu@163.com](mailto:dongxia.hu@163.com)