

# 激光空间整形实现直接驱动惯性约束聚变 球靶均匀辐照

李 勇 吕志伟 朱成禹 巴德欣 刘述杰

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 在保持间接驱动光束排布结构及束数不变的条件下,通过对各路入射光横截面强度分布进行调整,消除多光束叠加后球靶表面光强大尺度的不均匀性。建立了描述球靶表面多光束叠加分布的计算机模拟平台。根据光束入射条件,计算出多束光在靶面叠加后的光强分布及其不均匀度。利用加权平均的思想,得出实现均匀强度叠加所需要的各入射光焦面强度分布状态。根据激光传输理论,计算出可实现球靶均匀辐照的进入靶室聚焦透镜之前的光电场分布。

**关键词** 激光物理; 激光直接驱动聚变; 均匀辐照; 激光传输; 空间整形

中图分类号 O437.1 文献标识码 A

## Spatial Shape the Laser Beams to Achieve the Uniform Irradiation Required for Laser Direct-Driven Fusion

Li Yong Lü Zhiwei Zhu Chengyu Ba Dexing Liu Shujie

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Optic-Electronic, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** The nonuniformity of the irradiation on the target is eliminated by adjusting the intensity distribution on the cross section of the incident laser beams while keeping the position and direction of the beams that are used for indirect-driven laser fusion unchanged. A simulating program that can calculate the intensity distribution on spherical target with several beams irradiating on it is written. The intensity distribution on the target and its nonuniformity are worked out according to the condition of the incident beams. Then the distribution on the focal plane of the beams is educed by using the principle of weighted average. Finally the laser's electric field distribution before the lens that is necessary for the uniform irradiation is obtained based on the laser transmission theory.

**Key words** laser physics; laser direct driven fusion; uniform irradiation; laser transmission; spatial shaping

### 1 引 言

激光驱动惯性约束聚变(ICF)中心点火模型包含直接驱动与间接驱动两种方式<sup>[1,2]</sup>。相对于间接驱动,直接驱动方式具有更高的内爆增益和效率。激光直接驱动的惯性约束聚变将多束高功率激光直接聚焦在填有氘氚燃料的球靶上,烧蚀靶壳,产生等离子体喷射,利用其反冲作用驱动靶丸内爆,使燃料在惯性约束下发生聚变。但在直接驱动中为实现球

对称内爆和高增益,靶面辐照必须具有高度的均匀性。在设计多光束辐照系统中,一个主要任务就是要把靶面的辐照不均匀度控制在 1% 以下<sup>[3]</sup>。影响靶面辐照均匀性的因素很多,如光束数、光束的空间排布、光束间的功率平衡和光束的光强分布、聚焦位置、靶面的完善程度等<sup>[4,5]</sup>。

当前,国内外很多大型 ICF 装置都是按间接驱动模式设计的,其靶室光束排布均非均匀对称结构,

**基金项目:** 中国工程物理研究院外协项目,哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助课题。

**作者简介:** 李 勇(1985—),男,江西人,硕士研究生,主要从事激光空间整形及非线性光学技术等方面的研究。

E-mail: liyongbest@yahoo.com.cn

**导师简介:** 吕志伟(1961—),男,辽宁人,教授,主要从事非线性光学和固体激光技术等方面的研究。

E-mail: zhiweilu@yeah.net

在不改变入射光横场分布的情况下无法兼容直接驱动工作模式。本文保持间接驱动光束排布结构及束数不变的条件下,对各路入射光横截面光强分布作适当调整,消除多光束叠加后球靶表面大尺度的非均匀强度分布,从而为开展直接驱动工作提供可能,再结合消相干措施,即可进一步满足直接驱动均匀辐照的要求。

## 2 多光束在靶球叠加

由于分析的是把球表面大尺度的光强分布,而多束光的相干叠加或非相干叠加主要影响在小尺度上是否有相干条纹。而且在直接驱动装置中,一般都要对入射光进行消相干处理<sup>[6-8]</sup>。

假设有一间接驱动装置,其入射光束数是8束,经过透镜聚焦到靶球上,透镜大小为200 mm×200 mm,焦距为4000 mm。各光束光轴入射角 $l(\theta, \varphi)$ 分别为 $l_1\left(\frac{\pi}{4}, 0\right)$ ,  $l_2\left(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}\right)$ ,  $l_3\left(\frac{\pi}{4}, \pi\right)$ ,  $l_4\left(\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{2}\right)$ ,  $l_5\left(\frac{3\pi}{4}, 0\right)$ ,  $l_6\left(\frac{3\pi}{4}, \frac{\pi}{2}\right)$ ,  $l_7\left(\frac{3\pi}{4}, \pi\right)$ ,  $l_8\left(\frac{3\pi}{4}, \frac{3\pi}{2}\right)$ 。靶球直径为200  $\mu\text{m}$ ,采用离焦打靶方式,使各束光切聚焦辐照于靶球表面上。为分析靶球表面辐照情况,可假设透镜前端面有一光电场使得激光传输至靶球赤道面上均匀光强为 $I_0$ 。由公式 $I' = I \cos \theta$ ( $\theta$ 为靶

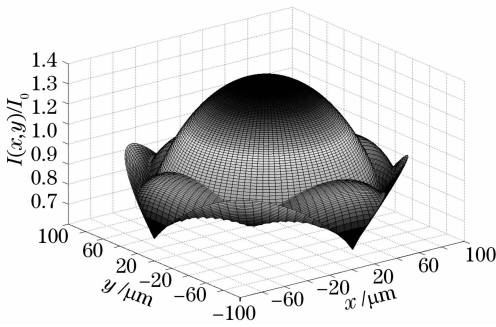


图1 靶球表面光强分布

Fig. 1 Light intensity distribution on the spherical target

球表面上点的法线与入射光线的夹角),可以计算出单束光在靶球表面上的光强分布。然后,根据各入射光的入射角等条件,计算出入射光横截面上光强均匀分布时各光束在靶球表面叠加后光强分布 $I(x, y, z)$ 。

## 3 实现均匀辐照所需入射光

分析各束光叠加后的光强分布 $I(x, y, z) = I_0 K(x, y, z)$ ,可令 $p(x, y, z) = [K(x, y, z)]^{-1}$ ,则若每束入射光的空间分布函数均满足 $I_l(x, y, z) = I_0 p(x, y, z)$ ,则靶球表面各光束叠加后的光强在整个球面上都等于 $I_0$ 。因此,根据入射光横截面均匀入射时靶面光强分布,经过分析计算,并进行坐标变换可以得出,当入射光在靶球赤道面上时光强分布为 $I(x', y') = I_0 p(x', y')$ ,可以实现靶面的大尺度完全均匀辐照。入射光在靶球赤道面上光强分布如图2所示。

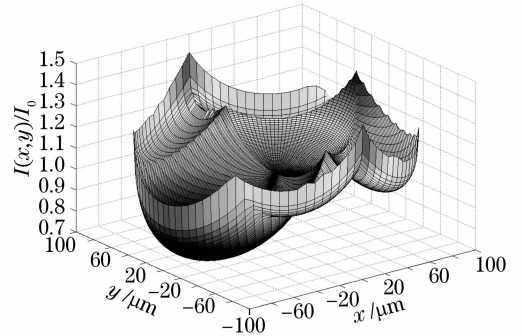


图2 入射光束横截面上的光强分布

Fig. 2 Intensity distribution on the cross section of the incidence laser beams

因为入射光只有在进入靶室之前才方便调整,所以需要给出透镜前的电场分布。在这里使用广义衍射积分理论来分析<sup>[9,10]</sup>。假设透镜前光电场为 $E_1(x_1, y_1, 0)$ ,透镜等效光程为 $-(x_1^2 + y_1^2)/2f$ , $f$ 为透镜焦距,则透镜后 $z$ 处光电场为

$$E_2(x_2, y_2, z) = \frac{1}{i\lambda z} \exp(ikz) \exp\left(ik \frac{x_2^2 + y_2^2}{2z}\right) \times \iint E_1(x_1, y_1, 0) \exp\left[ik \frac{f-z}{2zf}(x_1^2 + y_1^2)\right] \exp\left(-ik \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2}{z}\right) dx_1 dy_1, \quad (1)$$

式中 $\lambda$ 为激光波长, $k = 2\pi/\lambda$ 为波矢常量。由(1)式可以推出,当已知透镜后 $z$ 处光电场 $E_2(x_2, y_2, z)$ 时

$$E_1(x_1, y_1, 0) = -\frac{1}{i\lambda z} \exp(-ikz) \exp\left[-ik \frac{f-z}{2zf}(x_1^2 + y_1^2)\right] \times \iint E_2(x_2, y_2, z) \exp\left(-ik \frac{x_2^2 + y_2^2}{2z}\right) \exp\left(ik \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2}{z}\right) dx_2 dy_2, \quad (2)$$

取最简单的情况,令靶球赤道面处为电场  $E_2$  等相位面,则

$$E_2(x_2, y_2, z) = \left[ \frac{I_2(x_2, y_2, z)}{I_0} \right]^{1/2} E_0, \quad (3)$$

式中  $E_0 = \sqrt{2I_0/c\epsilon_0}$  为  $I_0$  对应的电场,  $c$  为真空光速,  $\epsilon_0$  为真空介电常量。将(3)式代入(2)式可以求得透镜前的光电场分布  $E_1(x_1, y_1, 0)$ 。因电场是复数,比较难用三维图表示,而电场复数的模表示电场的振幅  $A_1(x_1, y_1, 0)$ ,易于用三维图表示,如图3所示。图中  $z$  轴表示电场的振幅比  $A_1(x_1, y_1, 0)/A_0$ ,其中  $A_0 = |E_0|$ 。

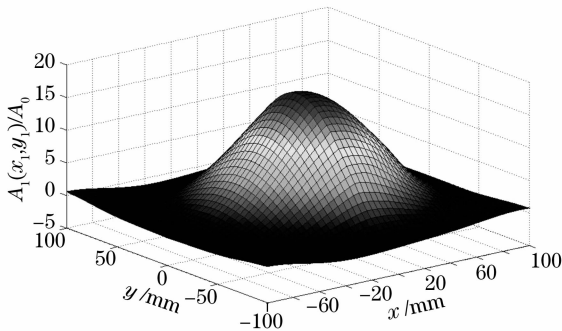


图3 入射光在聚焦透镜前的电场振幅分布

Fig. 3 Electric field distribution of incident beam before focusing lens

## 4 结 论

利用计算程序计算了8束光辐照在靶球上的光强分布,计算出能实现均匀辐照所需的入射光在靶球赤道面的光强分布,并给出了相应的透镜前端面的光电场分布。在实验中真正实现靶球的均匀辐照尚需解决一个关键的问题,即如何实现所需的光电场分布,可能的解决方法是二元光学设计。本计算程序实用有效,并可扩展至更多光束的情况,用于计算12束光、48束光等不同入射条件下靶球上的光强分布。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Ganchang. Inertial confinement fusion [J]. *Scientific Chinese*, 1995, **1**(5): 1~6  
王淦昌. 惯性约束核聚变[J]. *科学中国人*, 1995, **1**(5): 1~6
- 2 Yong Tao. The actuality and achievement of america inertial confinement fusion project [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2000, **37**(7): 1~3  
咏涛. 美国惯性约束核聚变计划的现状与成就[J]. *激光与光电子学进展*, 2000, **37**(7): 1~3
- 3 Stanley Skupsky, Kotik Lee. Uniformity of energy deposition for laser driven fusion[J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(7): 3662~3671
- 4 Xiao Jun, Lü Baida, Zhang Bin. Perfectly uniform irradiation of spherical targets for laser direct driven fusion [J]. *Laser Technology*, 1999, **23**(4): 244~248  
肖俊,吕百达,张彬. 激光直接驱动聚变球靶的完全均匀辐照[J]. *激光技术*, 1999, **23**(4): 244~248
- 5 Li Keyu, Jia Huaiting, Wang Chengcheng *et al.*. Output-ability analysis of high-intensity third harmonic generation system for ICF driver[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 903~909  
李恪宇,贾怀庭,王成程等. 惯性约束核聚变驱动器高强度三倍频系统输出能力分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 903~909
- 6 Liu Bo. Research on the application of the beam shaping technology in ICF laser system [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006. 4~13  
刘波. 光束匀滑技术在ICF激光系统中的应用研究[D]. 成都: 四川大学, 2006. 4~13
- 7 Yang Xiangtong, Fan Wei. Spatial laser beam shaping using birefringent lenses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1698~1704  
杨向通,范薇. 用双折射透镜组实现激光束空间整形[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1698~1704
- 8 Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan. Optimization of diffractive optical element used with smoothing by spectral dispersion technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 781~785  
谭峭峰,严瑛白,金国藩. 与光谱色散匀滑技术联用的衍射光学器件的优化设计[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 781~785
- 9 Lu Yaxiong, Yang Yapei, Cheng Shufen. *Laser Transmission and Transform Technology* [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Publishing House, 1999. 40~51  
卢亚雄,杨亚培,陈淑芬. *激光束传输与变换技术*[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1999. 40~51
- 10 Lü Baida. *Laser Optics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. 126~133  
吕百达. *激光光学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 126~133