

文章编号 1004-924X(2011)02-0332-08

高功率 XeCl 准分子激光系统前端平滑实验

薛全喜, 赵学庆, 华恒祺, 郑国鑫, 张永生

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘要:为得到物面光强分布均匀、能量尽量大的部分相干 XeCl 准分子激光前端种子光,采用放大自发辐射(ASE)法和散射法开展了前端平滑实验研究。首先,基于一台窄脉冲 XeCl 准分子激光器,研究了种子光的物面光斑均匀性、能量和发散角随光束口径及物面位置的变化规律。然后,分析了影响种子光参数的因素。最后,进行了验证实验。实验结果显示:ASE 法种子光物面光斑不均匀性最小为 2.01%,能量为微焦量级,但发散角在水平和竖直方向有较大差别;散射法种子光物面光斑不均匀性最小为 1.54%,能量为百纳焦量级,发散角为 5.5 mrad,衍射极限倍数处于 14~37 可调。前端泵浦腔尺寸和入射激光能量、散射板上光斑大小、收集透镜焦距分别是影响两种种子光参数的重要因素。经初级放大器放大后,光束物面光斑不均匀性为 2.04%,能量达到 8.0 mJ,满足高功率 XeCl 准分子激光角多路系统建设需求。

关键词:准分子激光;XeCl 激光;光束平滑;均匀性;放大自发辐射;散射

中图分类号: TN248.21 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111902.0332

Seed beam smoothing for high power XeCl excimer laser system

XUE Quan-xi, ZHAO Xue-qing, HUA Heng-qi,
ZHENG Guo-xin, ZHANG Yong-sheng

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest
Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The seed beam smoothing experiments were performed to get a smoothing and partial coherence seed by using Amplified Spontaneous Emission(ASE) and scattering methods. The relationship between the uniformity of seed beam intensity distribution, energy, the divergence of seed beam and the beam diameter and position was investigated based on a short pulse XeCl excimer laser. And then the factors which influenced the parameters of the seed beam were analysed. Experimental results indicate that the lowest nonuniformity of the seed beam produced by ASE method is 2.01%, and the energy is several μJ . But the horizontal divergence of the seed beam is different from the vertical one. The nonuniformity of the seed beam produced by scattering method is 1.54%, the energy is about one hundred nJ as the divergence is 5.5 mrad, and the laser beam diffraction limited times can be adjusted from 14 to 37. Furthermore, the size of the pumping source influences the divergence of the seed produced by ASE, and the input laser energy, laser diameter on scattering board and the focus of the lens

收稿日期:2010-10-08;修订日期:2010-10-30.

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目(No. SKL110904)

for gathering light influence the parameters of scattering seed. After being amplified, the nonuniformity of the source beam is 2.04%, and the energy is about 8.0 mJ. The results mentioned above show that the seed adapts to the high power XeCl excimer laser system.

Key words: excimer laser; XeCl laser; laser beam smoothing; uniformity; Amplified Spontaneous Emission(ASE); scattering

1 引言

激光直接驱动惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)对靶面激光均匀性有很高的要求^[1]。目前,国内外已有多个实验室先后通过多种方法提高了高功率激光对靶面的辐照均匀性^[2-13],包括随机相位板法(Random Phase Plate, RPP)、透镜阵列法、光谱色散平滑法(Smoothing by Spectral Dispersion, SSD)、无阶梯诱导空间非相干法(Echelon Free Induced Spatial Incoherence, EFISI)等。其中,EFISI法由美国教授 R. H. Lehmborg 和 J. Goldhar 于 1987 年提出,是高功率准分子激光系统获得均匀靶面辐照的有效方法^[10]。该方法在本质上是一种投影成像技术,利用部分相干光将前端物面的均匀光强分布通过激光系统逐级传输放大并聚焦成像于靶面上。该技术的关键是像面的高保真放大传递,前提是系统前端物面的光强分布均匀性高。国际和国内最具代表性的高功率准分子激光装置——美国海军实验室的 NIKE 装置和中国原子能科学研究所的“天光一号”装置都采用了该技术,但为得到平滑的部分相干种子源,采用了不同的技术途径。美国海军实验室采用散射法得到了均匀的部分相干种子前端,最终靶面单束靶面辐照不均匀性 < 1.3%,44 束激光叠加后为 0.4%^[11]。中国原子能科学研究所利用前端激光器的放大自发辐射(ASE)得到了不均匀性为 3.57%的种子光,初级放大后其不均匀性达到 1.03%^[12]。本实验室在建的高功率 XeCl 准分子激光平滑化角多路系统拟采用 EFISI 技术,期望得到光强分布均匀、能量尽量大且具有适当的空间相干性(衍射极限倍数处于 20~40)的种子前端。在前期研究的基础上^[14-16],本文利用一台小能量窄脉冲的 XeCl 准分子激光器,分别基于 ASE 法和散射法,开展了准分子激光平滑实验,研究了种子光均匀性、能量和发散角的变化

规律,分析了影响种子光参数的因素,利用散射法种子光和系统初级放大器开展了验证实验,最终得到了满足系统建设需求的平滑前端。

2 实验方法

2.1 主要实验设备

实验所用窄脉冲 XeCl 准分子激光器为德国产 ATLEX-SI 激光器,泵浦腔为 6 mm×4 mm×380 mm,激光波长为 308 nm,振荡器能量约为 8 mJ,脉冲宽度为 6~8 ns,光束发散角约为 2 mrad×1 mrad。Spricon 光束质量分析仪为光斑均匀性测量仪器,其 CCD 型号为 COHU4812,感光光谱为 185~1 100 nm,光敏面积为 8.8 mm×6.6 mm,分辨率为 512×480。种子光放大验证实验所用系统初级放大器为一台脉宽约为 200 ns 的放电泵浦激光器,放电截面尺寸约为 50 mm×20 mm。

2.2 实验方案

采用 ASE 法和散射法开展了前端平滑实验。其中,ASE 法实验方案如图 1 所示:调节激光器前腔镜使激光器工作于失谐状态,将一口径可变物孔置于激光出口不同距离位置处截取 ASE 得到种子光。透过物孔的种子光被分成 3 路,分别用来测量种子光能量、均匀性和远场光斑。

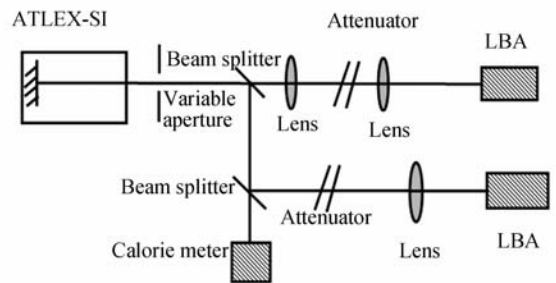


图 1 ASE 法实验光路图

Fig. 1 Experimental setup of seed produced by ASE

散射法光路如图 2 所示。激光器以振荡器状

态工作,将口径 4 mm 小孔置于激光器出口,利用像传递透镜组将通过该孔的激光聚焦于聚四氟乙烯板上,得到直径为 1 mm 的激光光斑。然后,在散射板法线方向,利用透镜收集散射光并使其照亮一可变物孔,通过物孔的光束即为种子光。种子光参数测量方法与 ASE 法相同。

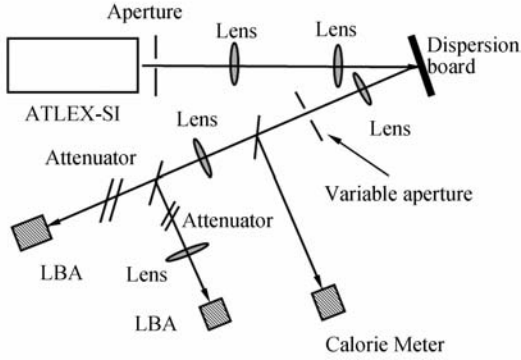


图 2 散射法实验光路

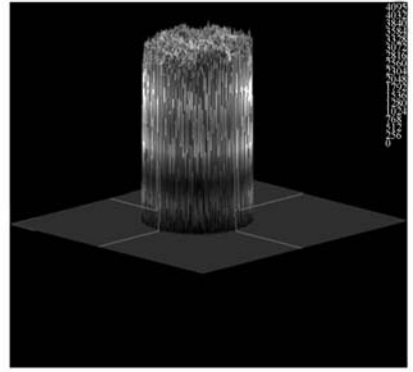
Fig. 2 Experimental setup of seed produced by scattering

3 实验结果

实验测量了不同光束口径部分相干种子光物面光斑的均匀性、能量和远场光斑,其口径为 1.5 ~ 5 mm。

3.1 物面光斑均匀性

散射法种子光物面光斑典型结果如图 3 所示,其平顶、均匀且有清晰边界。利用 LBA 软件按 86.5% 的环围能量计算了种子光像面光斑均匀性,得到物面光斑均匀性与物孔大小、位置的关系,如图 4 所示。由图 4 可知,ASE 法种子光和散射法种子光最小不均匀性分别达到 2.01% 和



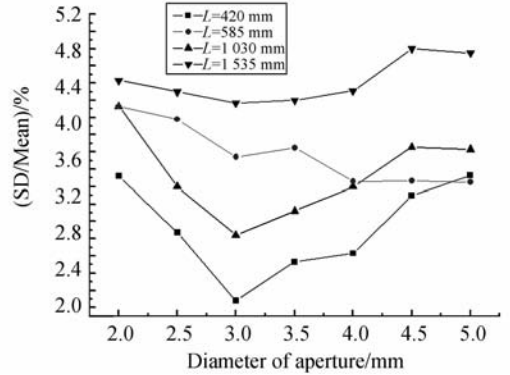
(b) 三维

(b) 3D

图 3 散射法种子光物面光斑

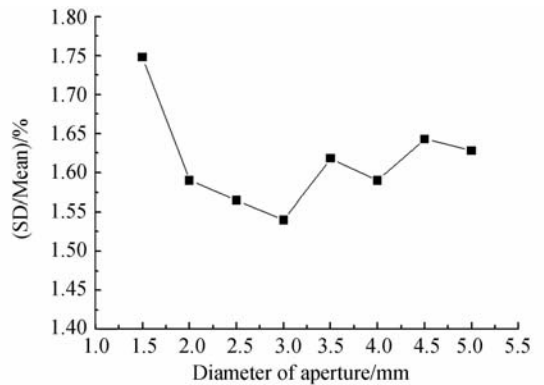
Fig. 3 Radiation distribution of seed beam by scattering

1.54%。随物孔到激光器出口距离的增大,ASE 法种子光物面光斑均匀性下降。



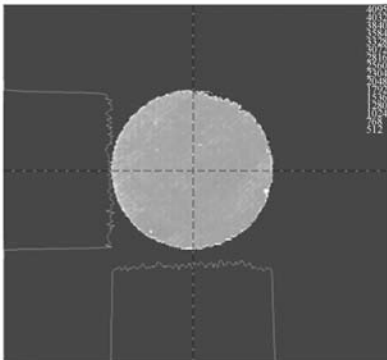
(a) ASE 法

(a) ASE method



(b) 散射法

(b) Scattering method



(a) 二维

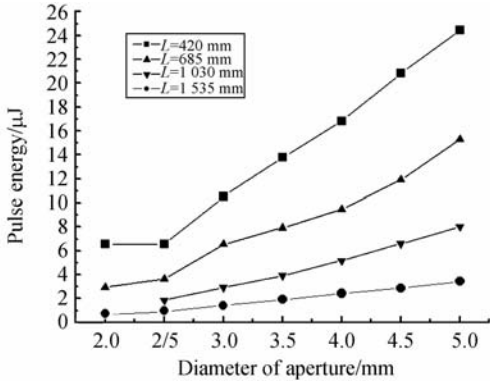
(a) 2D

图 4 种子光物面不均匀性与物孔大小、位置的变化关系

Fig. 4 Nonuniformity of seed on aperture versus its diameter and position

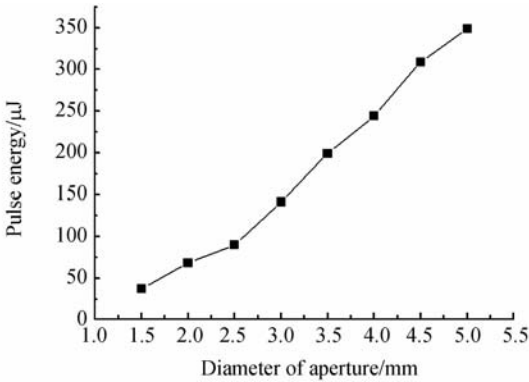
3.2 能量

种子光能量与物孔位置、大小的关系如图 5 所示:ASE 法和散射法种子光能量分别为微焦和百纳焦量级,约与物孔口径的平方成正比;随物孔到激光出口距离的增大,ASE 法种子光的能量减小。



(a) ASE 法

(a) ASE method



(b) 散射法

(b) Scattering method

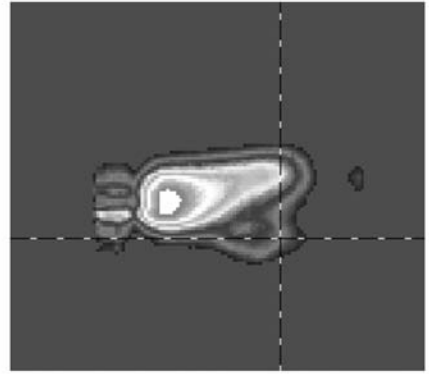
图 5 种子光能量与物孔大小、位置的关系

Fig. 5 Source laser energy versus diameter and position of aperture

3.3 发散角

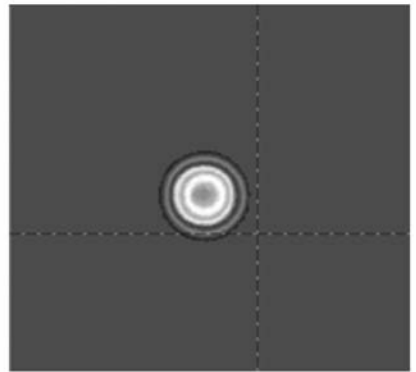
实验测得的种子光远场焦斑典型结果如图 6 所示:ASE 法种子光的水平方向空间模式多于纵向。散射法种子光远场焦斑为近高斯分布,各向发散角相等。

由激光远场焦斑计算得到了种子光发散角,其变化规律如图 7 所示:ASE 法种子光水平方向



(a) ASE 法

(a) ASE method



(b) 散射法

(b) Scattering method

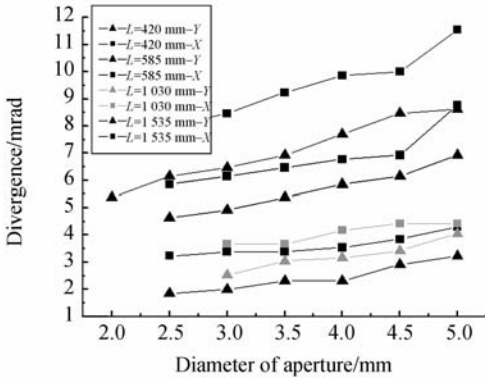
图 6 种子光远场焦斑典型结果

Fig. 6 Typical results of far-field pattern of seed beam

(X)发散角大于竖直方向(Y)发散角,随物孔口径增大或物孔距激光器出口距离减小而增大。散射法种子光发散角为 5.5 mrad,各向相等,与物孔大小无关;而其衍射极限倍数与口径成正比,处于 14~37 之间。

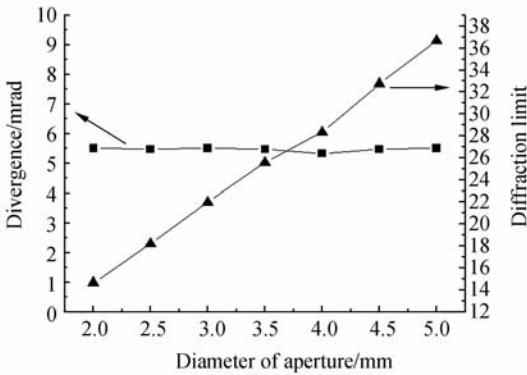
由以上结果知:ASE 法种子光物面光斑均匀性较好、能量较大,但发散角大小与方向有关。散射法种子光物面光斑均匀性最好,不均匀性最小为 1.54%;能量较小,百纳焦量级;发散角为常数,衍射极限倍数与光束口径成正比,在一定范围内可调。

高功率 XeCl 准分子激光角多路系统最末两级放大器泵浦区为圆柱形,柱形光束对放大器的填充最好,因此各向发散角相等的散射法种子光更适用于系统。



(a) ASE 法

(a) ASE method



(b) 散射法

(b) Scattering method

图 7 种子光发散角随物孔口径、位置的变化关系

Fig. 7 Divergence of seed beam versus diameter and position of aperture

4 分析讨论

由以上实验结果可知,影响 ASE 法种子光参数的影响因素有物孔大小和物孔位置等;散射法种子光能量与物孔大小有关,光斑不均匀性和发散角基本为常数。以下主要就影响种子光参数的因素做简要分析。

4.1 ASE 法

泵浦腔中某点在单位体积、 $d\nu$ 的频率范围内,介质自发辐射速率为

$$\frac{\Delta N^* \sigma(\nu) d\nu}{\tau_R}$$

其中, Δ 为归一化常数, $\sigma(\nu)$ 为自发辐射截面, N^* 为激发态粒子数目, τ_R 为自发辐射寿命。在空间 (x, y, z) 处,体积为 dV 的介质向观察点

(x_0, y_0, z_0) 处发射的光子流为

$$dI = h\nu \frac{\Delta N^* \sigma(\nu) d\nu dV}{\tau_R 4\pi r^2}, \quad (1)$$

式中 $r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2$, 则无反射镜和物孔限制时,观察点处放大自发辐射为^[17]

$$dI_{ASE} = dI \exp\left(\int \left[g(x', y', z') \frac{\sigma(\nu)}{\sigma(\nu_0)} - \alpha \right] dl'\right), \quad (2)$$

其中 g 为谱线中心增益, α 为非饱和吸收系数, dl' 为光子流在介质中的路径长度。

实验中,前端激光器保留了后腔镜。因此,其 ASE 包含单程 ASE 和双程 ASE,由式(2)可知,ASE 大小与光程成指数关系,可认为双程 ASE 远大于单程 ASE。

激光器泵浦腔空间尺寸、可变物孔位置如图 8 实线所示。为便于比较,将泵浦腔水平截面与竖直截面表示在同一平面上,斜线区域为激光泵浦腔的纵向截面。即 D 为泵浦腔长度, D_1 和 D_2 分别为泵浦腔的水平和竖直截面尺寸, D_3 为可变物孔直径, L 为可变物孔到激光器出口的距离。将泵浦腔相对反射镜做镜像处理,相当于泵浦腔长度增大一倍。由可变物孔、泵浦腔的几何关系计算得到 ASE 的水平方向发散角 θ_1 和竖直方向发散角 θ_2 分别为

$$\theta_1 = \frac{D_1 + D_3}{(2D + L)}, \quad (3)$$

$$\theta_2 = \frac{D_2 + D_3}{(2D + L)}. \quad (4)$$

由公式(3)和公式(4)知,种子光发散角在水平方向和竖直方向有较大差别,是由泵浦腔尺寸导致的。

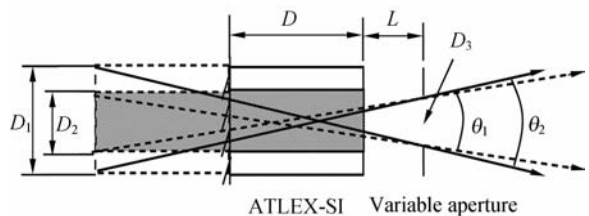


图 8 ASE 形成分析

Fig. 8 Analysis of ASE formation

可见,前端泵浦腔尺寸是影响种子光发散角的重要因素。

4.2 散射法

散射法改变了入射激光原有发散角且有良好均匀性的原因在于:散射后,激光原有的空间频率和相位消失。每个散射点散射出的激光相当于一个点光源,经透镜收集后变成相位随机的平行光束,叠加后不会出现明显干涉。由几何光学可计算种子光的发散角,如图 9 所示。种子光发散角为各平行光束间最大夹角:

$$\theta = \frac{d}{f}. \quad (5)$$

其中 θ 为种子光发散角, f 为收集透镜焦距, d 为散射板上散射斑口径。由式(5)知,散射斑口径和收集透镜的焦距决定了种子光发散角的大小,改变这两个参量中的任何一个均可以改变种子光发散角; f 和 d 确定后,种子光发散角为常数,与光束口径大小无关,其衍射倍率因子与光束口径大小成正比。由式(5)还可得到,散射板上散射斑为圆形时,种子光发散角各向相等。种子光源能量为透过可变物孔的能量,与入射激光的能量、可变物孔口径成正比,与收集透镜的焦距平方成反比

$$E \propto E' \times \frac{1}{f^2} \times d'^2 \propto \frac{E'}{d^2} \times \theta^2 \times d'^2. \quad (6)$$

其中, E 为种子光能量, E' 为入射激光能量, f 为收集透镜焦距, d' 为种子光口径。由式(6)知,在种子光发散角、口径一定的前提下,提高散射斑的激光功率密度可提高种子光能量。

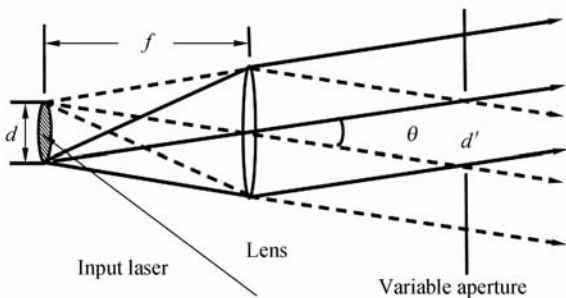


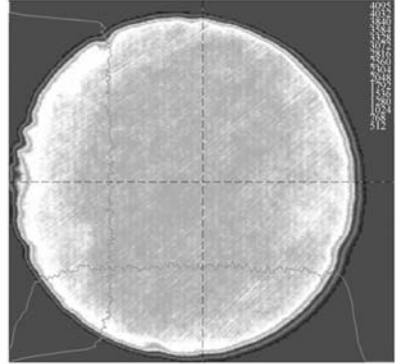
图 9 激光散射叠加过程

Fig. 9 Formation of scattering source

5 验证实验

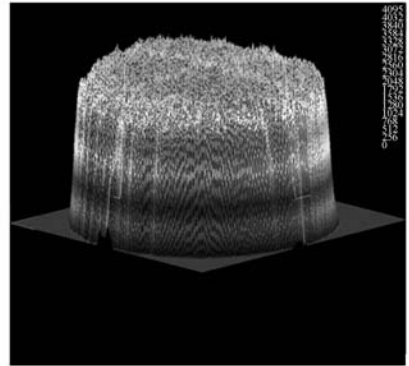
利用散射法种子前端在高功率 XeCl 准分子

激光平滑化角多路系统初级放大器上开展了放大验证实验。选用种子光参数为:光束口径 3 mm,物面光斑不均匀性 1.54%,能量 140 nJ,发散角 5.5 mrad,衍射极限倍数 22。经初级放大器放大后,激光能量为 8.0 mJ,物面光斑不均匀性达到 2.04%,光强分布图如图 10 所示。实验中放大器填充比例与设计结果相符。



(a) 二维

(a) 2D



(b) 三维

(b) 3D

图 10 放大后物面光强分布

Fig. 10 Radiation distribution of aperture illuminated by amplified laser

6 结论

本文利用 ASE 法和散射法均得到了均匀性良好的种子光。ASE 种子光物面光斑不均匀性最小为 2.01%,能量为微焦量级,但发散角在水平方向和竖直向有较大差别。散射法种子光物面光斑不均匀性最小为 1.54%,能量为百纳焦量

级,发散角为 5.5 mrad,光束衍射极限倍数在 14~37 可调。前端泵浦腔尺寸和入射激光能量、散射板上光斑大小、收集透镜焦距分别是影响两种种子光参数的重要因素。验证实验中,散射法种

子前端对放大器填充效果良好,能量得到了高倍放大,物面光斑均匀性保持良好。由此可见,实验得到的平滑化前端达到高功率 XeCl 准分子激光平滑化角多路系统建设需求。

参考文献:

- [1] 方智恒,王伟,贾果,等. 高温烧蚀初始印记及其瑞利-泰勒不稳定性发展的研究[J]. 物理学报, 2009,58(10):7057-7061.
FANG ZH H, WANG W, JIA G, *et al.*. Imprinting and consequent Rayleigh-Taylor growth[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(10): 7057-7061. (in Chinese)
- [2] 邓锡铭,梁向春,陈泽尊,等. 用透镜列阵实现大焦斑面的均匀辐照[J]. 中国激光,1984,12(5):257-260.
DENG X M, LIANG X CH, CHEN Z Z, *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1984, 12(5): 257-260. (in Chinese)
- [3] STEVENSON R M, NORMAN M J, BETT T H, *et al.*. Binary-phase zone plate arrays for the generation of uniform focal profiles [J]. *Optics letters*, 1994, 19(6):363-365.
- [4] TSUBAKIMOTO K, NAKATSUKA M, NAKANOH, *et al.*. Suppression of interference speckles produced by a random phase plate using a polarization control plate[J]. *Opt Commun*, 1992, 91(1): 9-12.
- [5] LEHMBERG R H, OBENSCHAIN S P. Use of induced spatial incoherence for uniform illumination of laser fusion targets[J]. *Opt Commun*, 1983, 46(1):27-36.
- [6] SCHMITT A J, GARDNER J H. Illumination uniformity of laser fusion pellets using induced spatial incoherence[J]. *J Appl Phys*, 1986, 60(1):6-13.
- [7] 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):507-510.
QIU Y, DENG X M. Optimization design of the optical array uniform illumination systems [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, 9(4):507-510. (in Chinese)
- [8] 刘增水,王润文,路敦武,等. 无规位相板在实现靶面均匀辐照方面的性能分析[J]. 光学学报,1998,18(7):943-949.
LIU Z SH, WANG R W, LU D W, *et al.*. Analysis on performances of random phase plate in realization of uniform irradiation on target plane[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(7): 943-949. (in Chinese)
- [9] MATSUSHIMA I, OWADANO Y, MATSUMOTO Y, *et al.*. Beam smoothing by broadband random-phase irradiation [J]. *Opt Commun*, 1991, 84(3):175-178.
- [10] LEHMBERG R H, GOLDHAR J. Use of incoherence to produce smooth and controllable irradiation profiles with KrF fusion lasers[J]. *Fusion Technology*, 1987, 11(5):532-541.
- [11] OBENSCHAIN S P, BONDNER S E, COLOMBANT D, *et al.*. The Nike KrF laser facility: performance and initial target experiments [J]. *Phys Plasmas*, 1996, 3(5):2098-2107.
- [12] 向益淮,单玉生,龚堃,等. 高功率 KrF 准分子激光光束平滑实验技术研究[J]. 原子能科学与技术,2003,37(2):101-105.
XIANG Y H, SHAN Y SH, GONG K, *et al.*. Experimental investigations of beam smooth technique for high power KrF laser system[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2003, 37(2): 101-105. (in Chinese)
- [13] 向益淮,高智星,佟小惠,等. “天光一号”平滑化角多路系统的建立[J]. 强激光与粒子束,2006,18(5):795.
XIANG Y H, GAO ZH X, TONG X H, *et al.*. Development of new angular multiplexing for “Heaven I”[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(5):795-798. (in Chinese)
- [14] 赵学庆,谢永杰,袁孝,等. 部分相干源实验研究[J]. 强激光与粒子束,2002,14(3):408-410.
ZHAO X Q, XIE Y J, YUAN X, *et al.*. Experimental study on partial coherence source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(3): 408-410. (in Chinese)
- [15] 赵学庆,薛全喜,郑国鑫,等. 准分子激光前端光束形态控制技术研究[J]. 中国工程科学,2009,11(8):52-57.

ZHAO X Q, XUE Q X, ZHENG G X, *et al.*. The shape control over the front-end of excimer laser beam[J]. *China Engineering Science*, 2009, 11(8):52-57. (in Chinese)

[16] 谢永杰,赵学庆,王立君,等. 液晶散射法产生部分相干光实验[J]. *强激光与粒子束*, 2001, 13(3): 191-194.

XIE Y J, ZHAO X Q, WANG L J, *et al.*. The experimental study of partially coherence light source produced by liquid crystal[J]. *High Power*

Laser and Particle Beams, 2001, 13(3):191-194. (in Chinese)

[17] 张春斌,龙滔. 天光一号预放大器中的放大自发辐射效应[J]. *强激光与粒子束*, 2002, 14(9): 651-654.

ZHANG CH B, LONG T. Effect of amplified spontaneous emission in Heaven-I pre-amplifier [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(9):651-654. (in Chinese)

作者简介:

薛全喜(1980—),男,山东日照人,助理研究员,2004年于兰州大学获得学士学位,2007年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事高功率激光技术和激光等离子体物理方面的研究。E-mail: quanxixue@163.com

赵学庆(1966—),男,河北衡水人,高级工程师,1989年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2005年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事高功率激光技术和激光等离子体物理方面的研究。E-mail: zqxq. hb@163.com

华恒祺(1980—),男,江苏无锡人,助理研究员,2002年于浙江大学获得学士学位,2006年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光测量和光路自动准直方面的研究。E-mail: dan-nisqi@sina.com

郑国鑫(1979—),男,陕西安康人,助理研究员,2003年于兰州大学获得学士学位,主要从事高功率激光技术的研究。E-mail: zgxlean@163.com

张永生(1973—),男,辽宁朝阳人,副研究员,1995年、1998年于长春光学精密机械学院分别获得学士、硕士学位,主要从事气体激光技术及其应用方面的研究。E-mail: zhangysh_2006@yahoo.com.cn