

# 神光Ⅲ原型全孔径背向散射测量系统研制及应用

彭晓世 王 峰 徐 涛 刘慎业 魏惠月 刘永刚 梅 雨 陈 铭

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 为了测量激光与等离子体相互作用产生的散射光份额, 获得黑腔耦合效率实验中的激光注入率, 研制了基于神光Ⅲ原型装置的全孔径背向散射测量系统。该系统利用聚焦透镜收集散射光, 通过离轴抛物面镜进行缩束, 并采用二向色镜将散射光分为两个支路后分别进行受激布里渊散射和受激拉曼散射光的能量、时间过程和光谱测量。实验测量了有、无束匀滑条件下的散射光份额。结果表明, 在当前实验条件下, 通过束匀滑可有效降低散射光份额, 提高激光注入率。

**关键词** 测量; 激光等离子体; 全孔径背向散射测量系统; 受激布里渊散射; 受激拉曼散射

**中图分类号** O536; O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0812003

## Development and Application of Full Aperture Backscattering Station Measurement System on Shenguang-III Prototype Laser Facility

Peng Xiaoshi Wang Feng Xu Tao Liu Shenye Wei Huiyue  
Liu Yonggang Mei Yu Chen Ming

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

**Abstract** In order to measure the fraction of laser-entrance energy, which is carried out mainly through the measurement of the fraction of backscattering light, a full aperture backscattering station measurement system is developed on the Shenguang-III prototype laser facility. The system collects backscattering light from the laser-plasma interactions by the focusing final lens and decreases the beam caliber by the off-axial parabolic mirror. Stimulated Brillouin and Raman backscattering light are separated by single-edge dichroic beam splitter. The backscattering light's energy, history and spectra can be detected by the system. The energy fraction of backscattering light is measured with and without beam smoothing. The results indicate that the fraction of laser-entrance energy will increase and the energy fraction of backscattering light will decrease with beam smoothing.

**Key words** measurement; laser plasma; full aperture backscattering station measurement system; stimulated Brillouin scattering; stimulated Raman scattering

**OCIS codes** 120.5820; 220.4830; 290.5820

## 1 引 言

在激光惯性约束聚变(ICF)研究中,对激光与等离子体耦合过程的吸收、散射和各种非线性相互作用过程的研究是激光与等离子体相互作用研究的基本内容。由于散射光和等离子体的状态密切相关,散射光的特性反映了等离子体状态随时间的演化过程,因此精确诊断激光与等离子体耦合条件下激光等离子体的吸收、散射和非线性相互作用的变

化规律将会深化对激光与等离子体相互作用的物理模型及物理规律的认识<sup>[1~4]</sup>,同时也为校验激光与等离子体相互作用数值模拟程序提供了基础物理数据。此外,通过对散射光的能量进行测量还可推算腔靶散射光的总能量份额,从而获得激光能量吸收率,这将为黑腔能量学实验研究提供重要的数据支撑。

激光与等离子体相互作用将激发大量的不稳定性如受激布里渊散射(SBS)和受激拉曼散射(SRS)

**收稿日期**: 2012-02-14; **收到修改稿日期**: 2012-03-30

**基金项目**: 国家自然科学基金(10805041)资助课题。

**作者简介**: 彭晓世(1981—),男,硕士,助理研究员,主要从事惯性约束聚变物理诊断及设备研发等方面的研究。

E-mail: xiaoshi1025@sohu.com

等,这些不稳定性将会散射入射激光能量,降低激光靶的耦合效率并影响辐射场的对称性<sup>[5~7]</sup>。研究表明在等离子体均匀的情况下,SBS和SRS在激光入射的背向比较锐利,在入射激光聚焦透镜范围内及其附近的散射占主导地位,因此需要建立相应的背向散射测量系统以实现背向散射光能量及时间特性的精确测量。

本文介绍了基于神光Ⅲ原型装置<sup>[8,9]</sup>的全孔径背向散射测量系统<sup>[10,11]</sup>。该系统主要用于测量聚焦透镜范围内的背向散射光特性,利用聚焦透镜进行散射光收集,通过离轴抛物镜进行缩束并消除了SRS支路的色差。采用空间滤波器<sup>[12]</sup>滤除了来自终端光学组件的反射光。利用该系统对原型束匀滑<sup>[13~15]</sup>的效果进行了验证,实验结果表明在当前实验条件下,通过束匀滑可有效减少散射光份额,提高激光注入率。

## 2 系统原理

打靶激光到腔壁的传播过程会被腔内低密度等离子体中的各种散射影响。在等离子体中,入射光波能共振地衰变为一个背向散射光波和一个等离子体中的本征波模——离子声波或电子等离子体波。入射激光在离子声波上的散射为SBS,在电子等离子体波的散射为SRS。由于离子声波频率远小于电子等离子体波频率,因此SBS与SRS的散射光频率差别较大,可利用这一性质对散射光进行频率分离。离子声波频率较小,发生SBS时散射光频率在入射光(中心波长为351 nm)频率附近,因此可在光路中利用特殊设计的滤片将散射光分为SBS和

SRS两支路分别进行测量。在本系统中利用了Semrock公司的二向色镜进行色分离,其在330~400 nm波段反射率大于98%,在415~950 nm波段透射率大于93%。

## 3 全孔径背向散射测量系统研制

### 3.1 系统技术路线

全孔径背向散射测量系统主要由收光系统、缩束系统、分频系统和记录系统组成。其系统图如图1所示,激光打靶时产生的来自于靶点的背向散射光经终端光学组件内的打靶透镜收集,由注入反射镜M<sub>1</sub>透射后进入长焦离轴抛物面镜M<sub>2</sub>。散射光经由楔形平板M<sub>3</sub>和反射镜M<sub>4</sub>、M<sub>5</sub>组成的折转模块进行光束折转后进入二向色镜BS<sub>1</sub>,通过改变楔形平板和反射镜的膜层设计,折转模块可用于调节不同实验条件下的信号强度。通过二向色镜BS<sub>1</sub>对散射光进行色分离将光路分为SRS和SBS两个支路,空间滤波器SF<sub>1</sub>和SF<sub>2</sub>分别放置于SRS和SBS支路,滤波小孔均位于离轴抛物面镜焦点处,将终端光学组件内的平面元件(如倍频晶体)倾斜放置后,通过长焦离轴抛物面镜和空间滤波器可有效消除来自终端光学组件内的元件表面反射光,提高散射光测量精度。由离轴抛物面镜M<sub>2</sub>和两组透镜L<sub>1</sub>、L<sub>3</sub>组成的系统则用于对散射光的SRS支路和SBS支路进行缩束以减小光束口径,降低系统成本。对于SRS支路,由于来自靶点的二倍频杂散光与信号光的时间、空间和光谱均重合,无法通过光路进行滤除,因此在SRS支路加装了陷波滤光片F<sub>1</sub>(526±8 nm波段反射率大于99%)滤除杂散光。陷波滤光片将导致

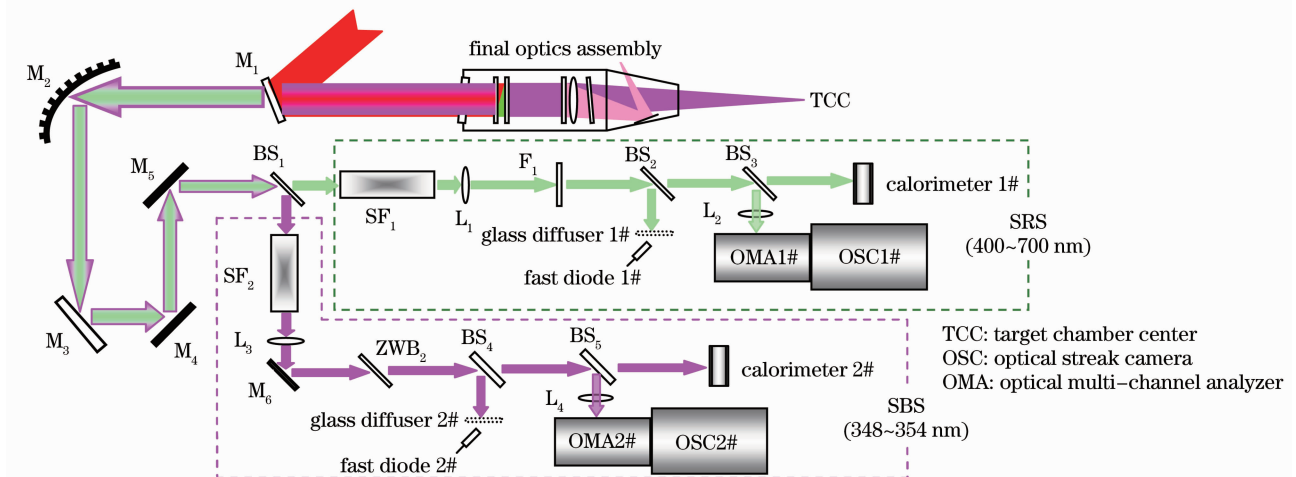


图1 全孔径背向散射测量系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the full aperture backscatter station measurement system

SRS光的能量损失,因此在数据处理时需根据SRS谱对损失的能量进行估算。在SBS支路中,为了消除经二向色镜反射的剩余SRS光,在其光路中加装了不透SRS光的ZWB<sub>2</sub>玻璃。为测量背向散射光的时间过程、光谱信息和能量,在SRS和SBS两个支路中各利用了两片分束镜(BS<sub>2</sub>~BS<sub>5</sub>)进行取样测量。在本系统中通过快光电管配示波器进行背向散射光的时间特性测量,通过谱仪配条纹相机测量时间分辨的光谱图像,通过能量计进行背向散射光能量测量。

### 3.2 系统研制要点

前期的实验表明,部分入射激光会经终端光学组件中的平面光学元件反射后进入全孔径背向散射测量光路,进行背向散射能量测量时,来自终端光学组件的反射光对测量的干扰较大。为消除背向反射光对测量的影响,将终端光学组件内的光学元件倾斜放置,由于来自靶点的散射光与来自光学组件内反射光的角度不同,经长焦离轴抛物面镜聚焦后,在焦点处可实现散射光与反射光的空间分离,利用空间滤波器可将反射光滤除。由于神光Ⅲ原型装置上的散射光能量较大,在离轴抛物面镜焦点处的激光功率密度很高,为防止聚焦后的散射光将空气击穿产生打火,影响实验测量,采用了真空空间滤波器。

由于离轴抛物面镜焦距较长,为减小全系统的尺寸,便于该系统在靶场的排布及安装,利用了由一片楔形平板和两片反射镜组成的折转模块进行光路折转。楔形平板主要用于衰减散射光能量并同时避免后表面的反射光进入测量光路。通过改变楔形平板和反射镜的膜层设计,折转模块还可用于调节不同实验条件下的信号强度。

将散射光分为SBS和SRS两个支路的色分离元件是本系统中的关键元件,选用了Semrock公司的二向色镜,其典型的透射率曲线如图2所示。由图2可知,采用二向色镜进行分光,在SRS支路中可完全滤除SBS光,但在SBS支路中还存在剩余的SRS光。为滤除剩余的SRS光,在SBS支路中加装了ZWB<sub>2</sub>玻璃,其典型的透射率曲线如图3所示。对于SRS支路,虽然无剩余的SBS光,但由于来自靶点的二倍频杂散光与信号光的时间、空间的光谱均重合,无法通过光路进行滤除,因此在SRS支路加装了526 nm陷波滤光片进行杂散光滤除,其典型的透射率曲线如图4所示。由图4可知,陷波滤光片在SRS波段的透射率较为平坦,尽管陷波滤光片会导致SRS光的能量损失,但在数据处理时可根

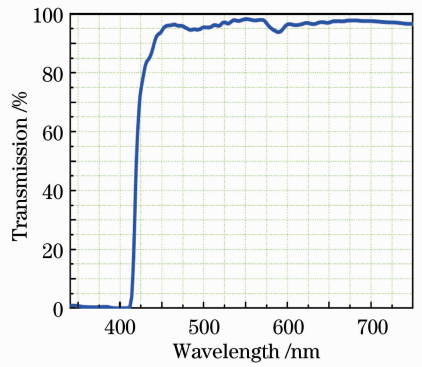


图2 二向色镜透射率随波长的变化曲线  
Fig. 2 Transmission of dichroic beam splitter varying with wavelength

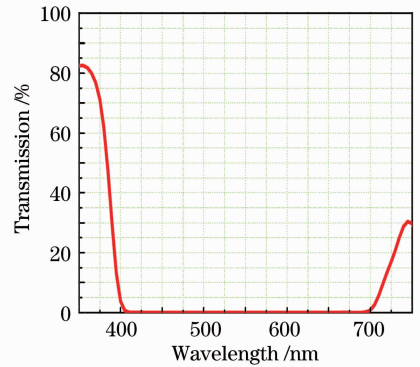


图3 ZWB<sub>2</sub>透射率随波长的变化曲线  
Fig. 3 Transmission of ZWB<sub>2</sub> varying with wavelength

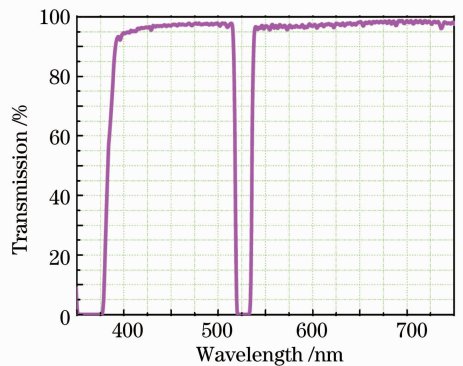


图4 526 nm陷波片透射率随波长的变化曲线  
Fig. 4 Transmission of 526 nm notch filter varying with wavelength

据SRS谱对损失的能量进行估算。

## 4 全孔径背向散射光测量

### 4.1 实验条件

为了对新研制的全孔径背向散射测量系统进行

评估并同时验证神光Ⅲ原型装置束匀滑的物理效果,利用该系统对原型实验中的散射光特性进行了测量。实验中8路351 nm激光分为上下两簇经终端光学组件聚焦后入射到柱形腔靶上,激光脉宽为1 ns,每路激光能量约为800 J,分别测量了有束匀滑和无束匀滑条件下的散射光特性。全孔径背向散射测量系统主要参数如下:离轴抛物面镜离轴45°,焦距为3000 mm,直径为500 mm;SBS和SRS支路的空间滤波器小孔尺寸分别为20 mm×20 mm和25 mm×25 mm;快光电管时间分辨率优于200 ps;光学多道分析仪焦距150 nm,利用600 lp/mm的光栅进行分光,闪耀波长为500 nm;相机狭缝宽度为100 μm,时间分辨率优于10 ps,全屏记录时间为5 ns。

#### 4.2 测量结果及分析

无束匀滑条件下测得的时间分辨SRS光谱和SBS光谱分别如图5和图6所示,图中横向为波长方向,波长范围为150~820 nm,纵向为时间方向,自下而上进行扫描,扫描时间窗口为5 ns。由图5可知,无束匀滑条件下的SRS光谱范围为415~615 nm,利用陷滤波片可有效消除来自靶点的二倍频杂散光,在SRS支路中无波长在351 nm附近的SBS光。在图5中不同波长的SRS光并非同时出现,主要原因是利用10 m长的光纤进行引光时,由于折射率不同导致不同波长的光在光纤中的传播时间不同。由图6所示的SBS光谱可知,通过ZWB<sub>2</sub>玻璃可有效滤除SBS支路中剩余的SRS光,出现在长波方向的光为SBS光二级光谱。束匀滑条件下测得的SRS光谱如图7所示。由图7可知,束匀滑条件下的SRS光谱范围明显变窄为475~590 nm,主要是由于束匀滑条件下的焦斑分布更为均匀,打靶时产生的等离子体状态也更为稳定所致。

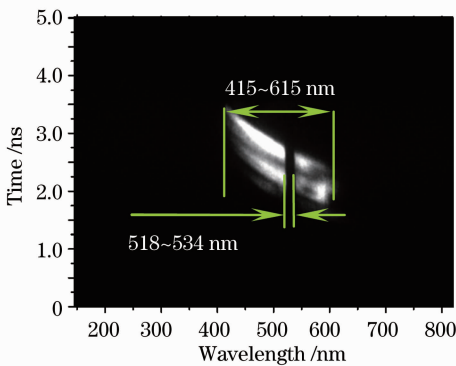


图5 无束匀滑条件下的时间分辨SRS光谱  
Fig. 5 Time-resolved spectrum of SRS without beam smoothing

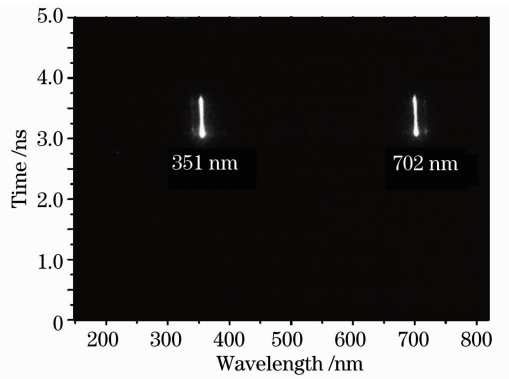


图6 无束匀滑条件下的时间分辨SBS光谱  
Fig. 6 Time-resolved spectrum of SBS without beam smoothing

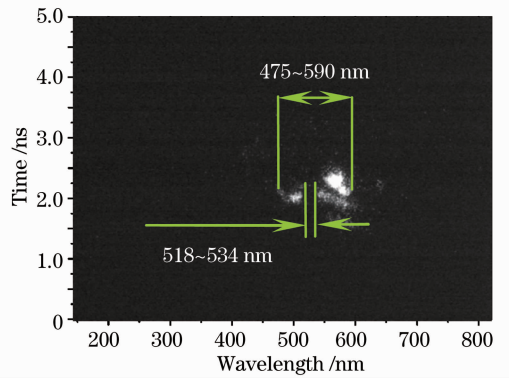


图7 束匀滑时的时间分辨SRS光谱  
Fig. 7 Time-resolved spectrum of SRS with beam smoothing

背向散射光谱的测量结果说明在条纹相机记录时间窗口内,在SBS和SRS支路中测得的是对应的散射光信号,两者之间不会产生干扰。由于本系统中散射光能量是通过能量计积分测量获得的,来自条纹相机记录时间窗口外的杂散光信号(如倍频晶体表面的反射光)也可能被能量计所记录,因此在本

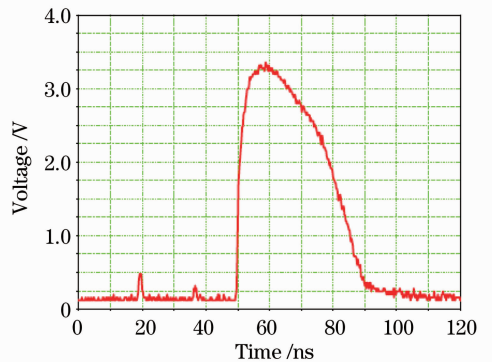


图8 背向散射光时间过程实验测量结果  
Fig. 8 Experimental result of backscattered light history measurement



系统中还利用快光电管配示波器对散射光的整个时间过程进行了测量,测量结果如图8所示。由图8可知,在信号光之前存在着强度很弱的杂散光信号,但杂散光对实验测量的影响可以忽略。根据两者之间的光程差可知杂散光主要来自于打靶激光在倍频晶体和光束取样光栅表面的反射。测得的信号光脉冲宽度远大于打靶激光的脉冲宽度,这是由光电探头饱和所致,杂散光很弱则表明将平面元件倾斜放置后,利用长焦离轴抛物面镜和空间滤波器能有效抑制来自终端光学组件内的反射光,杂散光主要来自于反射光在空间滤波器内壁的散射。

表1 背向散射光能量份额测量结果

Table 1 Experimental result of energy fraction of backscattered light measurement

Without beam	Energy of incidence laser /J	752	783	809	784	801	712	777	801	720
smoothing	Energy fraction of backscattered light /%	25.67	23.64	23.44	23.46	31.26	28.99	28.03	24.95	27.48
With beam	Energy of incidence laser/J	832	737	793	787	815	815	771	840	911
smoothing	Energy fraction of backscattered light /%	3.14	2.03	2.80	2.73	2.62	2.25	2.82	3.71	4.14

## 5 结 论

在ICF研究中,散射光的特性反映了等离子体状态随时间的演化过程,此外,通过散射光的能量可推算激光能量的吸收率。为了测量激光与等离子体相互作用产生的散射光份额,研制了基于神光Ⅲ原型装置的全孔径背向散射测量系统。该系统利用聚焦透镜收集散射光,通过离轴抛物面镜进行缩束,并采用二向色镜将散射光分为两个支路后分别进行SBS光和SRS光的能量、时间过程和光谱测量。在神光Ⅲ原型装置上通过实验对其进行了评估。背向散射光谱的测量结果表明在该系统的SBS和SRS支路中测得的是对应的散射光信号,两者之间不会产生干扰;散射光的时间过程测量结果则表明通过长焦离轴抛物面镜和空间滤波器能有效抑制来自终端光学组件内的反射光。利用该系统对神光Ⅲ原型装置束匀滑的物理效果进行了验证。实验结果表明,束匀滑条件下的等离子体状态更均匀,SRS光谱范围明显变窄,散射光份额也由无束匀滑时的约26%变为约3%。

## 参 考 文 献

- 1 J. Lindl. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain[J]. *Phys. Plasma.*, 1995, **2**(11): 3933~4024
- 2 J. D. Lindl, P. Amendt, R. L. Berger *et al.*. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility[J]. *Phys. Plasma.*, 2004, **11**(2): 339~491
- 3 D. H. Froula, L. Divol, R. A. London *et al.*. Pushing the limits of plasma length in inertial-fusion laser-plasma interaction

散射光能量通过能量计进行测量,能量计测量不确定度较小,约为3%。散射光能量测量的不确定度主要来源于光路衰减系数标定的不确定度,由于实际打靶光束与标定光束在空间分布、能量密度等多方面均存在显著不同,通过标定获得的光路衰减系数不确定度约为20%。有束匀滑和无束匀滑条件下的背向散射光能量份额测量结果如表1所示。由表1可知,在当前实验条件下,通过束匀滑可有效抑制背向散射光份额,提高激光注入率,散射光份额可由无束匀滑时的约26%变为约3%。

- experiments [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100**(1): 015002
- 4 D. E. Hinkel, D. A. Callahan, A. B. Langdon *et al.*. Analyses of laser-plasma interactions in National Ignition Facility ignition targets[J]. *Phys. Plasma.*, 2008, **15**(5): 056314
- 5 J. C. Fernandez, B. S. Bauer, J. A. Cobble *et al.*. Measurements of laser-plasma instability relevant to ignition hohlraums[J]. *Phys. Plasma.*, 1997, **4**(5): 1849~1856
- 6 D. H. Froula, L. Divol, N. B. Meezan *et al.*. Laser beam propagation through inertial confinement fusion hohlraum plasmas [J]. *Phys. Plasma.*, 2007, **14**(5): 055705
- 7 Li Zhichao, Zhang Xiaoding, Yang Dong *et al.*. Energy fraction measurements of stimulated Brillouin scattering and stimulated Raman scattering on Shenguang-III prototype laser facility [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(8): 1891~1895  
李志超, 张小丁, 杨冬等. 神光Ⅲ原型受激拉曼与受激布里渊散射份额测量 [J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(8): 1891~1895
- 8 Sun Zhihong, Wang Wenyi, Liu Hua *et al.*. Power balance measurement technique of multi-beam laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1493~1497  
孙志红, 王文义, 刘华等. 多路激光功率平衡测量技术 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1493~1497
- 9 Dai Wanjun, Hu Dongxia, Yang Zeping *et al.*. Wavefront closed loop correction for entire beam path of technical integration experiment line [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 414~417  
代万俊, 胡东霞, 杨泽平等. 神光Ⅲ原型装置全光路像差闭环校正实验研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 414~417
- 10 D. H. Froula, D. Bower, M. Chrisp *et al.*. Full-aperture backscatter measurements on the National Ignition Facility [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(10): 4168~4170
- 11 J. D. Moody, P. Datte, K. Krauter *et al.*. Backscatter measurements for NIF ignition targets [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, **81**(10): 10D921
- 12 Li Jinghui, Zhang Hujie, Zhou Shenlei *et al.*. Effect of smoothing by spectral dispersion considering the hole used in special filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 827~832  
李菁辉, 张晓杰, 周申蕾等. 空间滤波器小孔对谱色散匀滑使用效果的影响 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 827~832

- 13 Xie Jie, Fan Wei, Li Xuechun *et al.*. Spatial laser beam shaping using binary panels[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1959~1966  
谢 杰, 范 薇, 李学春 等. 二元振幅型面板用于光束空间整形[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1959~1966
- 14 Y. Lin, T. J. Kessler, G. N. Lawrence. Design of continuous surface-relief phase plates by surface-based simulated annealing to achieve control of focal-plane irradiance[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(20): 1703~1705
- 15 Li Ping, Ma Chi, Su Jingqin *et al.*. Analysis of laser optimized spectrum for smoothing the focused spot by temporal and spatial method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 534~538  
李 平, 马 驰, 粟敬钦 等. 时域与空域结合实现光束匀滑的光谱优化分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 534~538

栏目编辑: 何卓铭