

# 基于神光Ⅲ原型的全孔径背反诊断系统光路优化设计

焦春晔 王 峰 蒋小华 刘慎业 杨正华 李三伟 李志超 刘永刚  
陈 铭 张小丁 谷渝秋 丁永坤

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 对神光Ⅲ原型复杂激光光路条件下的背反诊断系统进行了光路改造优化设计。引进菲涅耳透镜和采用真空空间滤波方式,对激光打靶光路终端光学组件中镜片反射的杂散光与非线性效应导致的背反信号进行空间分离,解决了杂散光与非线性散射光同光轴问题。并在神光Ⅲ原型装置上进行了全孔径背反系统实验验证,为激光靶耦合能量平衡精密诊断提供了可能条件和重要参考。

**关键词** 光学设计;全孔径背反;菲涅耳透镜;能量平衡;非线性;受激拉曼散射;受激布里渊散射

**中图分类号** O534 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0522002

## Optimization Design of Full Aperture Backscattering Diagnosis System Based on Shenguang Ⅲ Prototype Laser Facility

Jiao Chunye Wang Feng Jiang Xiaohua Liu Shenye Yang Zhenghua Li Sanwei  
Li Zhichao Liu Yonggang Chen Ming Zhang Xiaoding Gu Yuqiu Ding Yongkun

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

**Abstract** Full aperture backscattering diagnosis system of Shenguang Ⅲ laser prototype facility is optimized under the condition of complex laser optical mirrors. Nonlinear scattering signals are collected by long focus Fresnel lens and focalize at the focus as background light is filtrated by vacuum spatial filter. Nonlinear scattering signals have been separated in space from background light. Then coaxial problem of nonlinear scattering signals with background light is resolved. Scattering light energy and spectrum of full aperture backscattering is measured in hohlraum experimental on Shenguang Ⅲ laser facility. Full aperture backscattering diagnosis system after optimization is validated by the hohlraum experiment, which offers possible condition and important reference for exact laser-target coupling and energy balance precision diagnosis.

**Key words** optical design; full aperture backscattering; Fresnel lens; energy balance; nonlinearity; stimulated raman scattering; stimulated brillouin scattering

**OCIS codes** 220.4830; 290.5820; 120.5820

## 1 引 言

激光等离子体耦合<sup>[1~3]</sup>是激光等离子体点火物理中十分重要的环节之一,也是激光聚变研究长期关注的问题<sup>[4~6]</sup>之一。激光等离子体相互作用过程中,激光能量大部分被产生的等离子体吸收<sup>[7~9]</sup>,另外一部分激光能量在等离子体中激发较强的不稳定性过程<sup>[10,11]</sup>,产生强的散射光<sup>[3,5~6]</sup>。这些散射光降

低激光靶的耦合效率,对聚变点火非常不利。激光等离子体相互作用的散射光以入射激光聚焦透镜范围的背向散射光为主。背向散射光主要包括受激布里渊散射(SBS)和受激拉曼散射(SRS),其中入射激光共振衰变成一个散射光波和一个电子等离子体波,称为SRS,SBS是入射光波参变转换成一个散射光波和一个离子声波的过程。

全孔径背反系统(FABS)测量对象为激光与腔

收稿日期:2010-10-21;收到修改稿日期:2010-12-15

基金项目:国家863计划(2010AA8041009)和中国工程物理研究院科学技术发展基金(2010B0102014)资助课题。

作者简介:焦春晔(1978—),女,硕士,助理研究员,主要从事激光等离子体相互作用方面的研究。

E-mail: cyjiao@gmail.com

靶相互作用过程中打靶透镜收集的散射光能量份额和光谱,主要有两类:一类为波长范围在 450~650 nm 的 SRS;另一类为波长在 351 nm 附近的 SBS。准确测量 SBS 和 SRS 时间光谱与能量份额,从而给出散射激光能量的份额,对分析激光与靶耦合效率相当重要<sup>[12~14]</sup>。监测激光等离子体耦合的 SBS 和 SRS 的光谱和能量的变化,是 ICF 研究中判断激光等离子体耦合状态的重要手段。

神光Ⅲ原型激光装置与上海神光Ⅱ激光装置的终端光学组件结构不同<sup>[5]</sup>,基频主激光经过伺服全反射镜后,通过二倍频(SHG)和三倍频(THG)晶体进行倍频,产生打靶需要的 THG 激光。这种终端光学组件组合的激光光路,打靶时产生更多的基频和 SHG 杂散光。2007 年的原型黑腔实验背反测量表明背反光路中的基频和剩余 SHG 杂散光太强,并且激光光路(终端光学组件)中镜片反射而来的杂散光与需要的非线性效应导致的背反信号同光轴掩盖了需要测量的散射光信号<sup>[8]</sup>。因此,采用上海神光Ⅱ激光装置上的全口径背反诊断系统的方式是行不通的。就目前的激光打靶光路条件下,为正确地确定激光靶耦合的能量平衡,需要对神光Ⅲ原型激光装置上的全口径背反诊断系统进行升级改造。

本文对神光Ⅲ原型复杂激光光路条件下的背反诊断系统进行了光路改造优化设计。解决了激光光路(终端光学组件)中镜片反射而来的杂散光与需要的非线性效应导致的背反信号同光轴问题,对背反信号进行空间分离,并在原型黑腔物理实验进行了全口径背反系统实验验证,为激光靶耦合能量平衡

精密诊断提供了可能条件和重要参考。

## 2 全口径背反系统工作原理

图 1 为优化前的原型全口径背反系统光路示意图。基频主激光经伺服反射镜 5 后通过 SHG 晶体 4 和 THG 晶体 3,转化为 THG 打靶激光,经过打靶透镜 2 入射到靶上。激光在等离子体中的背反散射光经过图 1 中伺服反射镜后面的光束收光束缩系统进入到最后的背反能量测量系统。全口径背反系统主要指在每路伺服反射镜后加上收光系统,收光系统由缩束系统、反射光路系统、散射光频率分离系统和光束会聚透镜等组成,其中散射光频率分离系统由反射镜 8,9 和收集透镜 10,11 组成。反射镜 8,9 表面镀膜 351~353 nm 的窄带高反射膜,反射率为 85%。SRS 散射光可以穿透反射镜 8,被收集透镜 10 收集,进入 SRS 能量卡计 13;SBS 散射光经过反射镜 8,9 两次反射后被收集透镜 11 收集,进入 SBS 能量卡计 14。采用能量卡计对 SRS,SBS 散射光能量进行时间积分测量。SBS 能量卡计测量 351 nm 附近的光,SRS 能量卡计测量 400~700 nm 范围中的背反 SRS 光。

散射光光谱测量借助光纤将散射光信号引至光学多道分析器(OMA)谱仪,再配光学条纹相机,测量时间分辨的散射光谱,信号用光学 CCD 记录。OMA 谱仪由输入光学系统、狭缝、光谱色散元件、光学成像系统和记录系统构成。收光系统加 150 mm OMA 谱仪配接条纹相机构成的系统测量时间分辨的 SRS 散射光谱。

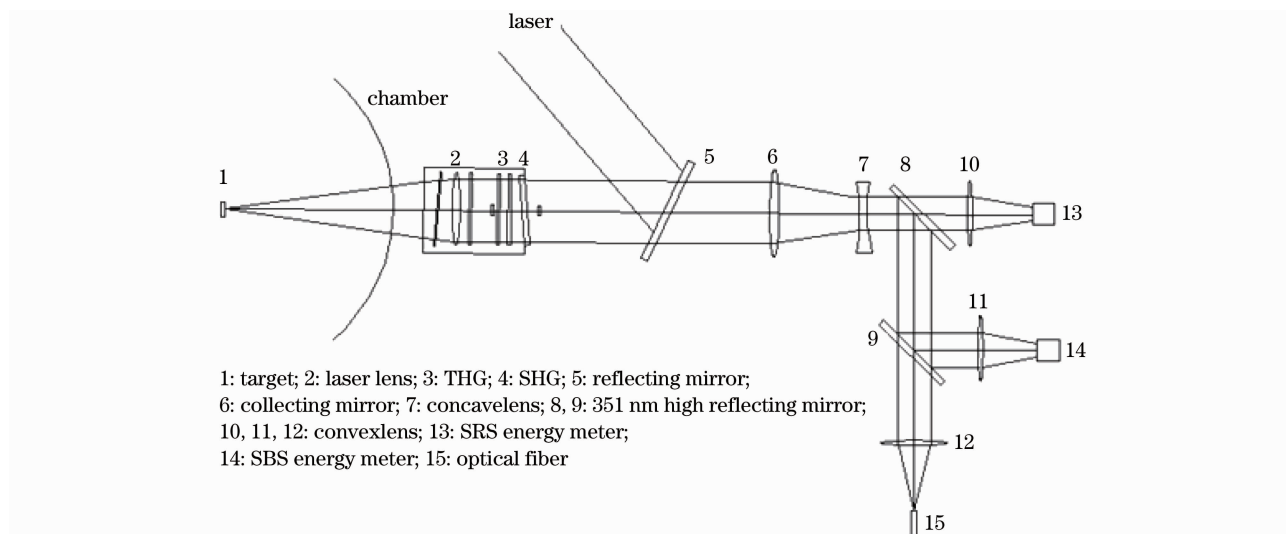


图 1 优化前的全口径背反系统光路示意图

Fig. 1 Scheme of full aperture backscattering system before optimization

但此种全孔径背反系统设计存在一些弊端。对神光Ⅲ原型激光装置来说,基频主激光先经过伺服全反射镜后,再通过 SHG 和 THG 晶体进行倍频,产生打靶需要的 THG 激光。这种终端光学组件组合的激光光路,基频光倍频为 THG 激光,产生更多的基频和 SHG 杂散光。这些杂散光经过光学组件中镜片反射后通过伺服反射镜与激光在等离子体中的散射光一起进入全孔径收光系统,杂散光与散射光均被收光透镜收集,两者是同光轴的。在激光打靶光路条件不变的条件下,为了准确地测量激光打靶时产生的散射光份额,确定激光靶耦合的能量平衡,神光Ⅲ原型激光装置上的全孔径背反诊断系统已经不能满足物理诊断的需求,需要进行升级改造。

### 3 光路优化设计物理思想

全孔径背反系统光路优化设计的物理思想:对

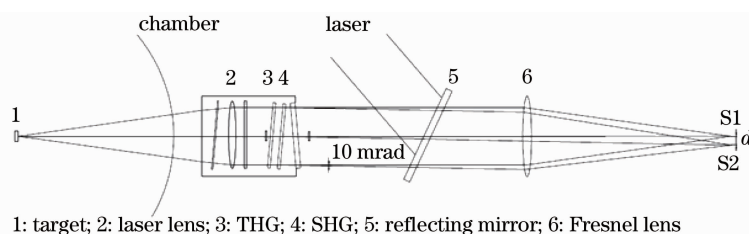


图2 全孔径背反系统光学元件倾斜光路示意图

Fig. 2 Scheme of optical lens leaning of FABS

全孔径背反收光系统收集的主要是 SRS 和 SBS 散射光,SBS 散射产生的是波长在 351 nm 附近的光,而 SRS 散射产生的是 400~700 nm 的光谱。因此,全孔径背反收光系统收集的散射光束最细的地方即光腰处,为长焦距收光透镜对散射光的聚焦点 S1 处。如果散射光束在 S1 处光腰控制在 10 mm 以下,则 S1,S2 在空间上可以分开。

2) 引进  $\phi 420$  mm 的大口径菲涅耳透镜,取代传统的玻璃透镜收集散射光。为对杂散光进行滤波,使用长焦距的收集透镜对散射光进行聚焦。传统的玻璃加工成口径  $\phi 420$  mm,焦距 2000 mm 的透镜,成本很高,加工周期较长,且加工成的玻璃透镜质量较大,搬运起来极为不便。采用菲涅耳透镜可以加工成大口径且很薄(厚度为 2 mm),质量轻,搬运方便,且成本很低,不影响散射光收集和会聚。

为模拟散射光经过激光打靶光路,进入全孔径背反收光系统的长焦距收光透镜后的聚焦情况,选用光学软件 Tracepro,采用光学追迹的方法对散射光经过长焦距菲涅耳透镜后的聚焦情况进行了模拟。打靶产生的散射光包括波长 351 nm 附近的

激光打靶终端光学组件中镜片反射而来的杂散光与需要的非线性效应导致的背反信号进行空间分离。采取以下技术路线:

1) 在安装激光光路终端组件光学元件时,光学元件中产生反射的镜片倾斜 10 mrad 安装。激光打靶时产生的散射光经打靶透镜收集后,通过伺服反射镜进入全孔径背反收光系统,其光路沿打靶透镜的轴向方向,经过长焦距收光透镜后进行聚焦,汇聚于 S1 处,如图 2 所示。激光终端光学组件中镜片反射回来的杂散光进入全孔径背反收光系统,经过同一长焦距收光透镜后,汇聚于 S2 处。长焦距收光透镜的焦距为  $f$ ,散射光聚焦汇集点 S1 和杂散光聚焦汇集点 S2 的距离为  $d$ ,假设长焦距收光透镜的焦距  $f=2000$  mm,则散射光聚焦汇集点 S1 和杂散光聚焦汇集点 S2 的偏离距离  $d=20$  mm。

SBS 和 400~700 nm 范围内的 SRS,实验时选取波长 526 nm 的可见光来标定 SRS 光路,因此模拟时选择波长分别为 351 nm 和 526 nm 的两种波长的光线进行光学追迹。

如图 3(a)所示,模拟了从靶点产生的散射光通过终端光学组件,被菲涅耳收光透镜收集,进入小孔滤波器。光学追迹表明,打靶的散射光完全被菲涅耳透镜收集并聚焦。菲涅耳透镜对不同波长的散射光的聚焦情况如图 3(b)所示,波长 351 nm 的光先聚焦,526 nm 的光后聚焦,针对焦距为 2000 mm 的菲涅耳透镜来说,两个焦点之间的距离为 74 mm。散射光会聚时,光束最细的地方(光腰)为 8 mm,与设计的光腰控制在 10 mm 以下的要求一致,即散射光与杂散光在空间上是可以分开的。

3) 选择真空空间滤波器进行滤波,精细选择空间滤波器小孔的尺寸<sup>[15]</sup>,使来自靶点的 SRS 和 SBS 散射光正好全部通过,而将直接返回的 SHG 和 THG 的杂散光滤掉,从而最终获得 SRS 和 SBS 信号。

通过空间滤波的方式把散射光和杂散光分开,需要长焦距菲涅耳透镜对散射光进行聚焦,焦点尽

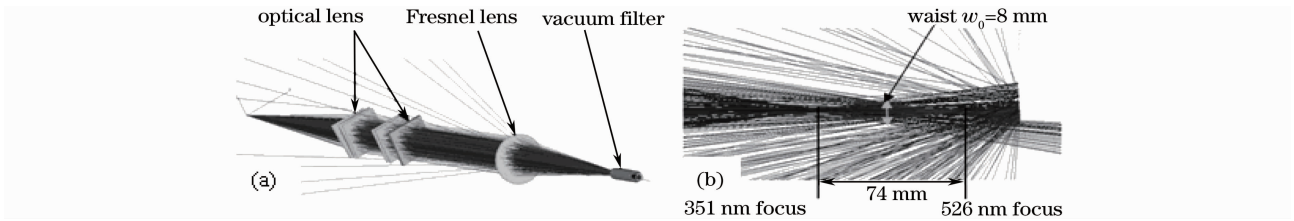


图 3 长焦菲涅耳透镜对散射光聚焦情况模拟。(a)设计的全孔径背反光路图,(b)菲涅耳透镜对 SRS 和 SBS 的聚焦点  
Fig. 3 Simulation of scattering focusing by long focal-length Fresnel lens. (a) designed full aperture system scheme, (b) SRS and SBS waist focused by Fresnel lens

可能小,单波长焦点控制在 2 mm 以内。假设神光 III 原型每路激光为  $1000 \text{ J}/1 \text{ ns}/3\omega_0$ ,SBS 和 SRS 的份额分别为 30%,经过靶室窗口(透射率  $T=90\%$ )、伺服镜( $T=70\%$ )、菲涅耳透镜( $T=90\%$ )、白板玻璃( $R=8\%$ )、Al 反射镜( $R=80\%$ )后的能量为 10.88 J,激光脉宽  $\tau=1 \text{ ns}$ ,焦斑处功率密度为  $3.46 \times 10^{11} \text{ W}/\text{cm}^2$ 。在如此高激光功率密度条件下聚焦,散射光容易击穿空气打火。

为防止聚焦后的散射光将空气击穿,产生打火,

采用真空空间滤波器。图 4(a)为空间滤波器的结构图,滤波的小孔光阑位于散射光的光腰处,小孔光阑的几何结构采用锥角结构设计,在小孔光阑处设计观察窗口便于实验调节。小孔光阑具有二维平动结构(X,Y 方向),其轴线方向调节通过整体移动空间滤波器来实现。真空系统由真空机组和钛泵组成,真空度能达到  $10^{-3} \text{ Pa}$ 。图 4(b)模拟了杂散光通过空间滤波器小孔光阑的情况,结果显示杂散光没有穿过小孔光阑,完全被滤掉。

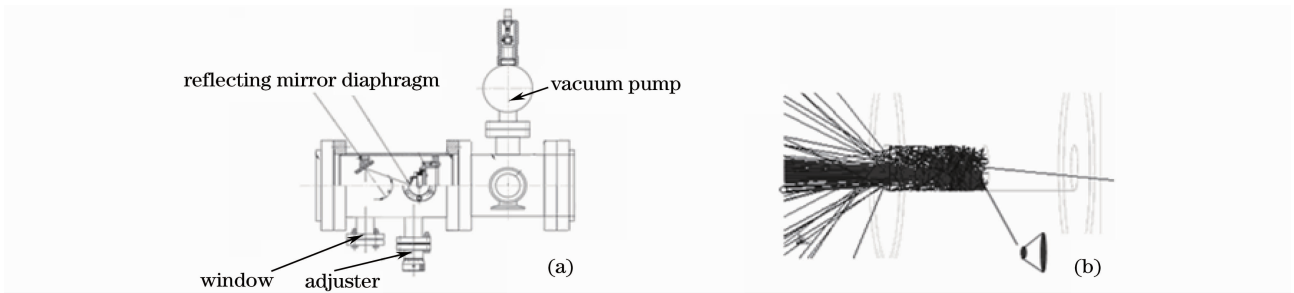


图 4 真空空间滤波器的结构及光学模拟。(a)结构图,(b)光学模拟

Fig. 4 Structure profile and simulation of vacuum special filter. (a) structure profile, (b) optical simulation

4)对原诊断系统的机械结构重新设计,通过白板玻璃和 Al 反射镜把诊断光路方向由倾斜  $45^\circ$  向上转换为水平方向,便于实验测量。同时,考虑到激光光路的终端光学组件中镜片反射而来的杂散光非

常强,菲涅耳收光透镜后面的白板玻璃起到了衰减散射光的作用。

根据上述设计对原型全孔径背反诊断系统进行了优化,改造后的背反诊断系统如图 5 所示。

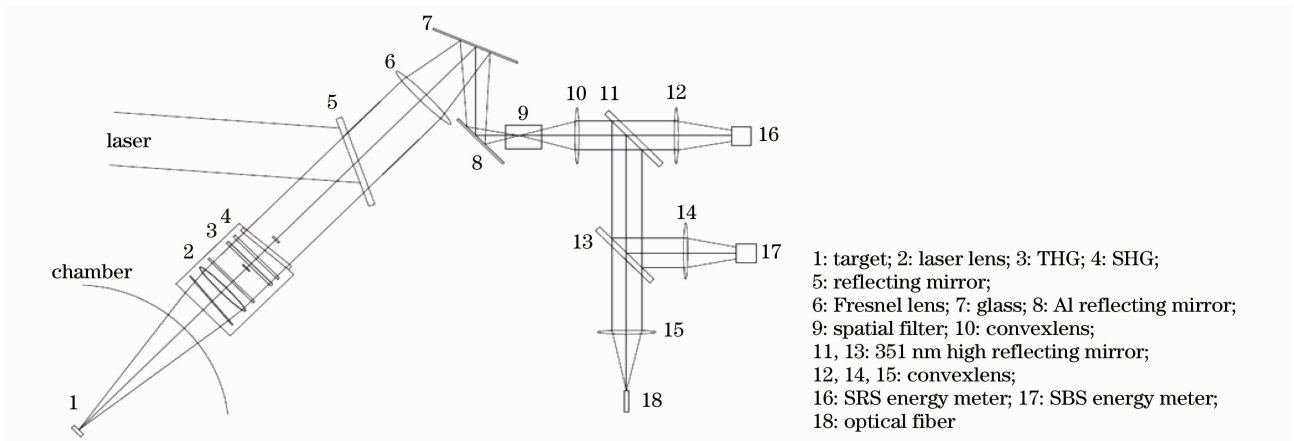


图 5 优化后的全孔径背反系统光路示意图

Fig. 5 Scheme of full aperture backscattering system after optimization

## 4 系统应用验证

实验在神光Ⅲ原型装置上进行。8路激光从上方呈 $45^\circ$ 方向入射,单端注入腔靶。全孔径背反系统放置在靶室外面南4光路的伺服镜后面,对打靶产生的散射光进行测量,系统排布如图5所示。实验所用Au半腔靶的尺寸为 $\phi 1000\ \mu\text{m} \times 800\ \mu\text{m}$ ,激光注入孔(LEH)为 $\phi 650\ \mu\text{m}$ ,腔壁厚度为 $35\ \mu\text{m}$ 。实验中打靶激光波长 $351\ \text{nm}$ ,波型为 $1\ \text{ns}$ 方波,激光在注入口聚焦入射,焦斑尺寸为 $250\ \mu\text{m} \times 350\ \mu\text{m}$ 。

### 4.1 杂散光与背反信号同光轴问题

为了直观观察杂散光与散射光信号的空间分离情况,在散射光进入空间滤波器的窗口前放置场图感光纸。图6(a)、(b)为单束激光能量 $400\ \text{J}$ ,实验靶型分别为金球靶和Au半腔靶时的场图。图6(a)上出现两个光斑,图6(b)出现三个分开的光斑。根

据神光Ⅱ的测量知道,SRS的产生阈值随等离子体的密度标长 $L_n$ 的增加而降低<sup>[3~6]</sup>。在激光能量较低时,金球靶的等离子体温度较低,其等离子体密度标长较小,非线性过程阈值较高,SRS和SBS散射没有被激发;而对于半腔靶来说,由于腔壁的约束等离子体温度很快升高,使等离子体密度标长变长,非线性过程阈值降低,从而SRS和SBS散射被激发。因此,图6(a)的两个光斑为打靶光路终端光学组件中的镜片反射回来的杂散光,由图6(a)可知,图6(b)图中下面两个光斑为背景杂散光。图6(b)上面颜色较浅的为激光在等离子体中的散射光信号,并且杂散光信号比非线性散射光信号强。图6(c)为全孔径背反系统优化前在Al反射前得到的场图,图中3个光斑重叠在一起,即散射光与杂散光同光轴,均进入全孔径背反诊断系统。

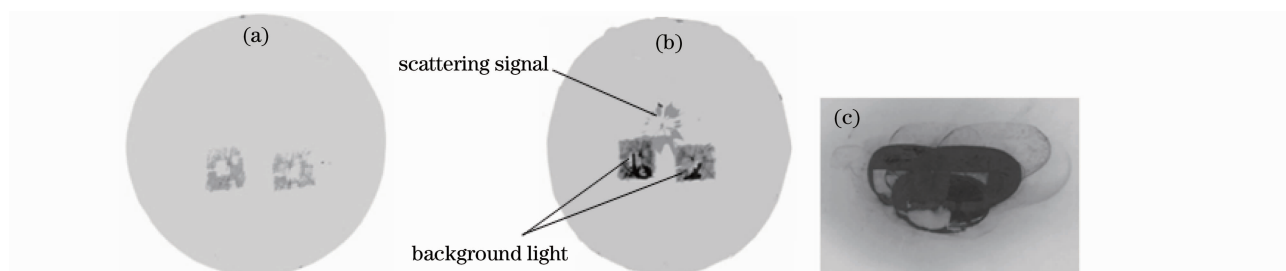


图6 原型实验背反系统的场图纸信号。(a)金球靶,(b)半腔靶,(c)背反系统优化前的场图  
Fig. 6 Sensitive profiles of FABS on shenguang III. (a) gold ball target, (b) half hohlraum, (c) sensitive profile of FABS before optimization

### 4.2 空间滤波器小孔光阑滤光

为清楚原型全孔径背反散射光通过真空空间滤波器小孔光阑的情况,在空间滤波器小孔光阑位置放置场图纸,并在上面开一个 $\phi 10$ 的小孔,该孔与小孔光阑尺寸相同。图7为打靶时的场图,可以看出:在小孔光阑位置处3个光斑完全分开,并且散射光全部穿过小孔。小孔光阑的锥角结构设计则可以把散射光滤掉,该实验结果与空间滤波器的光学模拟情况完全一致。

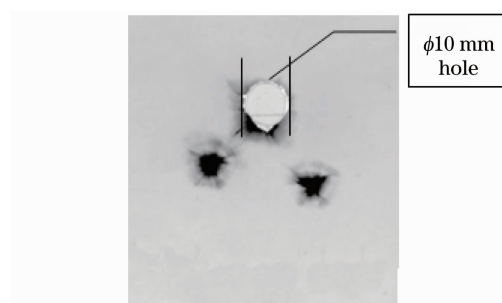


图7 小孔光阑位置  
Fig. 7 Diaphragm position

### 4.3 非线性SRS、SBS散射光谱

通过光纤把散射光引到光谱仪上,分别进行SRS和SBS光谱测量。采用150光谱仪接C979条纹相机测量SRS时间分辨光谱,如图8(a)所示。横坐标为波长方向,从右到左为短波到长波方向;纵坐标为时间方向,从上到下扫描。从SRS时间分辨图中可以看出散射光谱先在长波出现,并随着时间逐渐向短波方向移动,直到SRS散射光结束。时间分辨谱中的 $526\ \text{nm}$ 锐光来源于入射激光在倍频过程中产生的SHG光,此次原型实验是单端激光脉冲驱动,SHG光穿过激光脉冲前沿产生的等离子体,因此在时间上比早期散射光晚。图8(b)为采用750光谱仪测量的SBS积分光谱。横坐标为波长方向,纵坐标为光谱在CCD上的位置,可以看出SBS光谱的波长在 $351\sim 352\ \text{nm}$ 。

### 4.4 非线性能量份额统计情况

在背反诊断系统后面,对S4路2个激光能量卡计对SRS、SBS散射光能量进行积分测量。激光打靶光路终端光学组件中用于测量打靶激光能量的方

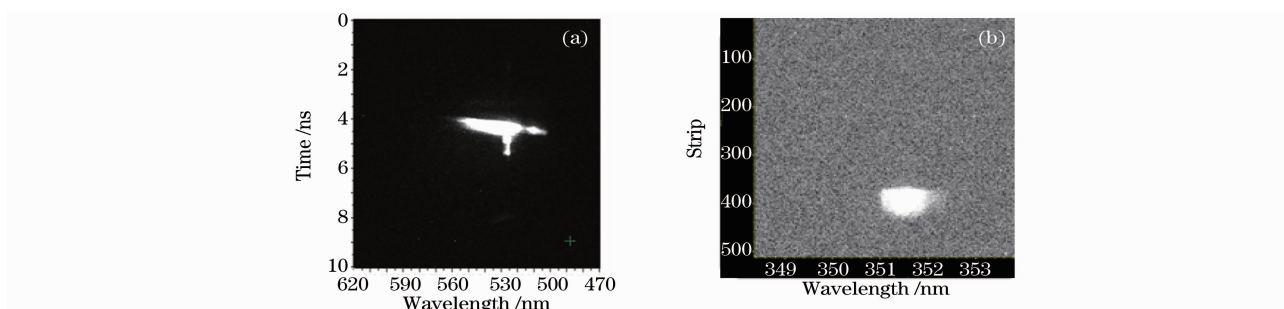


图 8 实验测量的 SRS、SBS 散射光谱。(a)SRS 时间分辨光谱,(b)SBS 时间积分光谱

Fig. 8 SRS and SBS spectrum measured experimentally. (a) SRS time-resolved spectrum, (b) SBS time-integral spectrum

形取样板,会挡掉光路的部分能量,方形取样板的面积约占打靶光束面积的 1/9,计算能量时取方形取样板挡掉散射光能量的 10%。

由上海神光 II 激光装置实验结果可知:SRS, SBS 在全空间内的能量与打靶透镜直接收集的 SRS, SBS 能量之比,即透镜对 SRS, SBS 的收光系数。因此,我们处理时对同种靶型所有发次各路背反系统收集到的 SRS, SBS 能量份额加起来平均,再乘以透镜的收光系数。原型装置打靶透镜的  $F$  数(透镜焦距与光束口径之比)为 5.4,上海实验用的是  $F/3$  打靶透镜,所以原型打靶透镜的收光立体角为上海实验用的打靶透镜收光立体角的 1/3。

考虑了上述几个方面,靶型为  $\phi 1000 \mu\text{m} \times 800 \mu\text{m}$  Au 半腔靶时, SRS 约占 10%、SBS 约为 10%,非线性散射光总份额约为 20%,这与文献 [16] 利用 PIN 阵列探测器拟合外推法给出的散射光总份额 35% 偏低。可能原因是打靶光路中用于测量打靶激光能量的方形取样板的面积占打靶光束面积的 1/9,但散射光在空间分布不均匀,即方形取样板挡掉散射光的能量要大于 10%,从而引起散射光能量份额偏低。在打靶光路中存在方形取样板的条件下,精确计算散射光能量份额需要考虑散射光的空间分布,进行解析计算。

神光 III 原型黑腔实验的全孔径背反诊断系统测量结果表明,激光终端光学组件中镜片反射而来的杂散光与需要的非线性效应导致的背反信号已经空间上分开,精细选择空间滤波器小孔光阑的几何形状和尺寸大小,成功地通过空间滤波的方式把散射光滤掉,使靶点返回的 SRS 和 SBS 光正好全部通过,并且进行了非线性 SRS、SBS 散射光谱和能量份额测量。

## 5 结 论

根据神光 III 原型打靶激光光路终端光学组件组

合方式,提出了对激光打靶终端光学组件中镜片反射而来的杂散光与需要的非线性效应导致的背反信号进行空间分离的设计物理思想,引进了菲涅耳透镜和采用真空空间滤波方式,对原型全孔径背反诊断系统进行了优化设计改造。光学模拟和实验结果表明,优化后的系统解决了激光光路中镜片反射而来的杂散光与非线性背反信号同光轴问题,并进行了非线性散射光谱和能量份额测量。由于原型打靶激光光路终端光学组件中用于测量打靶激光能量的方形取样板,会挡掉散射光路的一部分能量,在计算散射光能量时需要结合考虑散射光的空间分布,给出准确的能量份额。

## 参 考 文 献

- 1 John Lindl. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain[J]. *Phys. Plasmas.*, 1995, **2**(11): 3933~4024
- 2 John Lindl, Peter Amendt, Richard L. Berger *et al.*. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility[J]. *Phys. Plasmas.*, 2004, **11**(2): 339~491
- 3 Juan C. Fernandez, Bruno S. Bauer, James A. Cobble *et al.*. Measurements of laser-plasma instability relevant to ignition hohlraums[J]. *Phys. Plasmas.*, 1997, **4**(5): 1849~1856
- 4 Qi Langying, Jiang Xiaohua, Zhao Xuewei *et al.*. Studies on the production and suppression mechanism of the hot electrons produced by short wavelength laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(3): 492~496  
祁兰英, 蒋小华, 赵雪薇等. 短波长激光超热电子产生与抑制机理的研究[J]. *物理学报*, 2000, **49**(3): 492~496
- 5 Jiao Chunye, Wang feng, Liu Shenye *et al.*. Full aperture backscatter signal analysis of laser with hohlraum on Shenguang II laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(11): 2603~2607  
焦春晔, 王 峰, 刘慎业等. 基于神光 II 的激光黑腔靶全孔径背反散射光信号[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(11): 2603~2607
- 6 Froula D. H., Divol L., Meezan N. B. *et al.*. Laser beam propagation through inertial confinement fusion hohlraum plasmas[J]. *Phys. Plasma.*, 2007, **14**(5): 055705
- 7 Stevenson R. M., Suter L. J., Oades K. *et al.*. Effects of plasma composition on backscatter, hot electron production, and propagation in underdense plasmas[J]. *Phys. Plasma.*, 2004, **11**(5): 2709~2715

- 8 Li Sanwei, Yi Rongqing, Jiang Xiaohua *et al.*. Experimental study of radiation temperature for gold hohlraum heated with 1 ns, 0.35  $\mu\text{m}$  lasers on SG-III prototype laser facility[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(5): 3255~3261  
李三伟, 易荣清, 蒋小华等. 神光 III 原型 1 ns 激光驱动黑腔辐射温度实验研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(5): 3255~3261
- 9 Froula D. H., Divol L., London R. A. *et al.*. Pushing the limits of plasma length in inertial-fusion laser-plasma interaction experiments[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100**(1): 015002
- 10 Hinkel D. E., Callahan D. A., Langdon A. B. *et al.*. Analyses of laser-plasma interactions in National Ignition Facility ignition targets[J]. *Phys. Plasma*, 2008, **15**(5): 056314
- 11 Wang Chunke, Jiang Xiaohua, Liu Shenye *et al.*. Stimulated Raman scattering from interaction of 2 ns, 351 nm laser with hohlraum[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(7): 1113~1116  
王传珂, 蒋小华, 刘慎业等. 2 ns, 351 nm 激光黑腔靶受激 Raman 散射实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(7): 1113~1116
- 12 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
- 13 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
- 14 Wang Wenyi, Su Jingqin, Li Yangchun *et al.*. Power-balance numerical analysis of high-power laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s1): 73~77  
王文义, 粟敬钦, 李阳春等. 高功率激光功率平衡的数值分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s1): 73~77
- 15 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, 张琥杰, 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
- 16 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