

100 kJ 激光装置集束平台的散射光诊断系统及实验

徐涛^{*}, 理玉龙, 刘欣城, 刘祥明, 李志超, 龚韬, 彭晓世, 李平, 杨冬, 王峰^{**}, 杨家敏

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 为了在输出能量为 100 kJ 的激光装置集束平台上开展激光等离子体不稳定性(LPI)实验研究, 建设了基于集束构型的散射光诊断系统。该诊断系统使用漫反射板作为主要拦光、反射、取样元件, 利用成像方式将散射光分别成像至 iCCD(intensifier Charge Coupled Device)相机等记录部件, 采取取样测量方式得到散射光的空间分布、能量大小、光谱及时间波形等。在集束物理实验中, 该系统获得了较完备的物理数据, 与物理模拟计算程序的计算结果较为吻合, 表明在当前条件下散射光的主要机制为子束机制, 其作用过程主要集中于等离子体未排空的前期。

关键词 激光光学; 散射光; 漫反射板; 成像; 几何光学

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0514003

Backscatter Diagnostic System Implemented on Cluster Platform of 100 kJ Laser Facility and Experiment

Xu Tao^{*}, Li Yulong, Liu Xincheng, Liu Xiangming, Li Zhichao, Gong Tao,

Peng Xiaoshi, Li Ping, Yang Dong, Wang Feng^{**}, Yang Jiamin

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

Abstract In order to carry out the experimental study of laser plasma instability (LPI) on the laser device cluster platform with an output energy of 100kJ, a scattered light diagnosis system based on cluster configuration is built. The diagnosis system uses the diffuse reflector as the main light blocking, reflection, and sampling element, the imaging method is used to image the scattered light to the recording components such as iCCD (intensifier Charge Coupled Device) camera, and the sampling measurement method is used to obtain the spatial distribution, energy, spectrum, and time waveform of the scattered light. In the cluster physics experiment, the physical data obtained by the system are in good agreement with the results obtained by the physical simulation program. It shows that the scattering mechanism is mainly subbeam mechanism under the current conditions, and its action process mainly concentrates on the early stage before the plasma empties.

Key words laser optics; scattered light; diffuse plate; imaging; geometric optics

1 引言

以实现点火为目标的激光驱动惯性约束聚变(ICF)装置,其激光输出能量需达数兆焦耳。由于单束激光输出能量有限,故激光装置必须具备足够的激光束才能满足要求,为此构建了将多个激光子束“捆绑”进行打靶的集束构型。集束构型能减小

激光光学终端的体积,避免靶室开孔过多,降低工程实施难度,这是美国国家点火装置(NIF)^[1-3]、法国兆焦耳激光(LMJ)装置^[4-5]以及中国未来巨型激光装置等的共同特点。

ICF的关键物理过程是激光与等离子体的相互作用过程,此过程存在以受激散射为主的激光等离子体不稳定性(LPI)问题^[6-7]。LPI会造成激光能量

收稿日期: 2021-07-25; 修回日期: 2021-08-09; 录用日期: 2021-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(12005205)

通信作者: *xutzo@163.com; **xiaozei7566@163.com

损失、破坏黑腔辐射对称性和加热内爆靶丸等负面问题,为此需对其加以规避^[8-10]。由于 LPI 对等离子体的初始扰动条件非常敏感,而且其增长和反馈过程的计算量大,目前还缺乏完全可靠的 LPI 理论计算程序,一般通过实验来摸索和总结其规律并与理论预估方法进行校验和比对以修正理论模型中的问题。显而易见的是,集束构型中的 LPI 是不同于单子束的。尽管多个子束采用近乎相同的角度入射至黑腔,使激光在黑腔等离子体中的路径和条件大致相似,但从细节来看,各子束的激光条件和等离子体路径均有差别,束间散射差异可能较大,不可能简单等同于“同一集束”这种整体机制下的 LPI。各子束间的激光交叉及分离情况与单子束差别很大,甚至有可能产生不常见的多光束 LPI 问题,包括共用等离子体波、共用散射光以及发生明显的束间能量转移等。

为此,在输出能量为 100 kJ 的激光装置上新建了基于集束构型的激光打靶平台,用来开展 LPI 实验研究,研究集束构型的受激散射光表现和作用机制以校验辐射流体程序的计算结果,摸清未来巨型装置的 LPI 研究方法和规律。

本文简要介绍了集束验证平台的基本光学参数,阐述了基于非定向测量方式的散射光诊断系统

的设计思路、总体布局 and 具体诊断结构,并给出和初步分析了基于该平台的 LPI 实验的散射光测量结果。

2 集束平台简介

集束平台使用输出能量为 100 kJ 的激光装置中的 A1 束组作为激光输入,该平台将钎玻璃基频激光(频率为 ω , 波长为 1053 nm)传递进入集束靶场,经编组后形成“九宫格”排列,如图 1 所示。8 个子束进入同一终端光学组件(FOA),FOA 中每个子束的光路均包含束匀滑相位板、倍频晶体(二倍频和三倍频)、取样光栅和防溅射片等光学元件。倍频晶体将基频激光转换为三倍频激光(频率为 3ω , 波长为 351 nm),并经各自光路内面型和楔角不同的楔形透镜(WFL)将不同子束会聚至靶室中心,各子束同步时间误差不大于 10 ps(均方根, RMS),焦点位置偏移量不大于 $80 \mu\text{m}$ (RMS)。激光近场光束的口径为 $360 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$,三倍频光的焦距为 12020 mm,偏折角为 2.38° ;剩余二倍频光的焦距为 12431 mm,偏折角为 2.30° ;剩余基频光的焦距为 12740 mm,偏折角为 2.25° 。经过束匀滑处理后的远场光斑直径约为 $700 \mu\text{m}$,3 ns 束匀滑处理后的单束能量最大可达 3750 J。

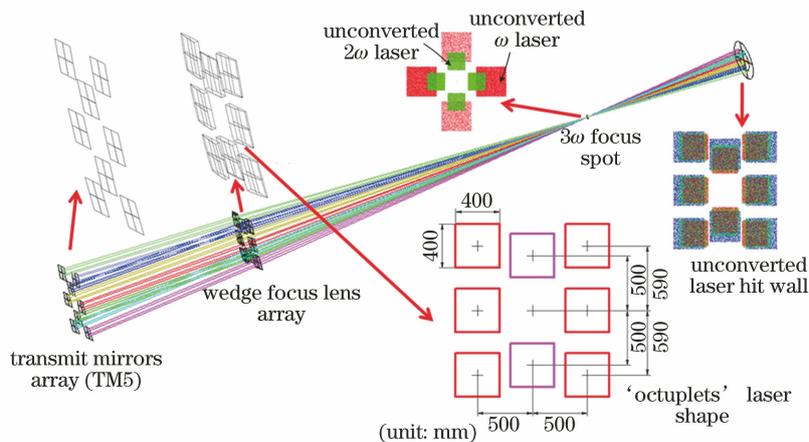


图 1 集束平台激光的几何光学排布示意图

Fig. 1 Geometric optical arrangement diagram of laser beam platform

3 散射光诊断系统

输出能量为 100 kJ 的激光装置亦有配备散射光诊断系统,该系统利用大口径的金属曲面反射镜来收集散射光,使散射光严格按照既定设计的光路(二次曲面反射光路)进行会聚、传递及分光探测^[11-13]。但由于金属反射镜的损伤阈值较低,元件

膜层易出现损伤的情况。诊断光路的对准要求高,甚至有些异形或者复杂结构的黑腔散射光出射位置偏离靶心的现象非常多,这会导致部分光学元件阻挡散射光,使其无法完全通过诊断系统中的记录设备记录,而且整体光路结构又较为庞大,使用不便。因此,该系统在集束构型多个子束排列较为紧密的情况下适用性较差。此外由于集束构型中,LPI 的

物理研究主要集中于判断散射光的主要机制,故对于散射光空间分布状态的诊断相对迫切,而定向传递散射光的诊断方式则偏向能量份额的诊断,因此需要研发一种结构较为紧凑、偏重空间分布诊断的方法。

针对上述情况,研发了一个以高反射率的漫反射板为主要反射元件的非定向散射光诊断系统,用于研究受激布里渊散射(SBS,光谱范围为 349~353 nm)和受激拉曼散射(SRS,光谱范围为 400~700 nm)。系统采用成像测量的方式来记录散射光在反射元件上的空间分布图像,通过标定图像计数与能量之间的绝对定量关系并利用图像强度来间接给出散射光的能量,不再采用能量卡计直接测量能量的方式。系统采用局部拦光取样的方式来测量非定量的散射光光谱及功率。

受激散射光主要沿激光传输光路反向进行传

播,其传播孔径角约为激光孔径角的 2 倍以上^[11-13]。为了不阻挡和干扰打靶激光,散射光诊断系统分为测量激光光束口径外的近背向散射光诊断系统和测量激光光束口径内的全孔径背向散射光诊断系统。在集束构型和靶室相对较小的限制下,散射光诊断系统又进一步划分为三个子系统。位于直径为 1.2 m 的靶室内部的近背向散射光诊断子系统 1 号(NBS1),用于测量集束整体口径之外的散射光;位于连接靶室和终端光学组件的真空锥桶段内的近背向散射光诊断子系统 2 号(NBS2),用于测量各子束之间的散射光;位于激光器传输反射镜(TM)后的全孔径背向散射光诊断子系统(FABS),用于测量各子束内部的散射光。系统的总体布局如图 2 所示,其中 BS 为分束镜,记录设备为 Andor istar DH334T 型 iCCD (intensifier Charge Coupled Device)。

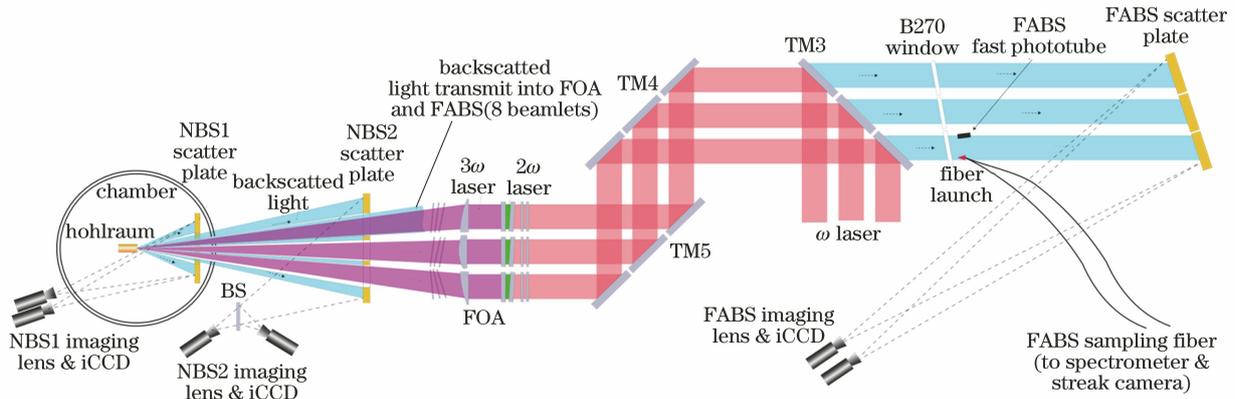


图 2 集束平台散射光诊断系统的总体布局示意图

Fig. 2 General layout diagram of cluster platform scattered light diagnostic system

每个子系统均采用乳白色的漫反射板来拦截并反射散射光。该板采用 Labsphere 公司的 Spectralon 漫反射标准板,其在 SBS 及 SRS 波段内的反射率均不小于 99%,在波长为 1064 nm 处的标称损伤阈值为 3 J/cm²,近似理想的朗伯分布。相关文献的测试表明,该板在波长为 351 nm 处的有效损伤阈值大于 1 J/cm²,线性反射区宽,是一种较理想的高损伤阈值材料^[14]。

按照散射光的空间分布情况及激光束的排布特点,设计了对应的漫反射板结构,各部分的反射板结构如图 3 所示。NBS1 的漫反射板为方形开孔结构,尺寸为 305 mm × 305 mm,方孔尺寸为 90 mm × 90 mm,板面距离靶室中心 550 mm,板面与集束光轴垂直;NBS2 的漫反射板为井字形结构,由尺寸为 610 mm × 610 mm 的标准平板裁剪而成,

裁剪的孔洞为激光通道,板面距离激光光束截面边缘大于 10 mm,其他板面则用于填充子束间区域,板面距离靶室中心 5480 mm,并与集束光轴垂直;FABS 采用漫反射板阵列分别拦取各子束激光通道内返回的散射光,由于反射板板面与光束截面存在约 40°~45°的夹角,因此每块漫反射板的尺寸均为 440 mm × 610 mm,使其能完全拦截尺寸为 400 mm × 400 mm (最大投影面大小约为 400 mm × 565 mm)的散射光束。

NBS1 主要具有散射光的空间分布成像诊断功能,漫反射板位于靶室内部,故需要通过诊断法兰窗口来观察,因此设计了两组排列非常紧凑的成像镜组对漫反射板进行成像。由于在激光注入法兰直穿方向没有可观测窗口,故在与激光注入法兰对穿的 30°法兰外安装两台相机,物面(漫反射板平面)与相

机光轴存在一定的水平向(赤道面)夹角,分别为 19.8° (SBS) 和 15.2° (SRS)。记录设备为 Andor istar DH334T 型 iCCD,其阴极面大小为 $\Phi 18$ mm,与镜组的成像放大倍数匹配。在漫反射板的板面前安装一块未镀膜的肖特 B270 材料防溅射玻璃,厚

度约为 5 mm。为了防止防溅射玻璃未镀膜面受残余反射光的干扰,玻璃在竖直方向上倾斜了 15° ,使其残余反射光偏离镜组的孔径范围。NBS1 的诊断光路结构如图 4 所示。

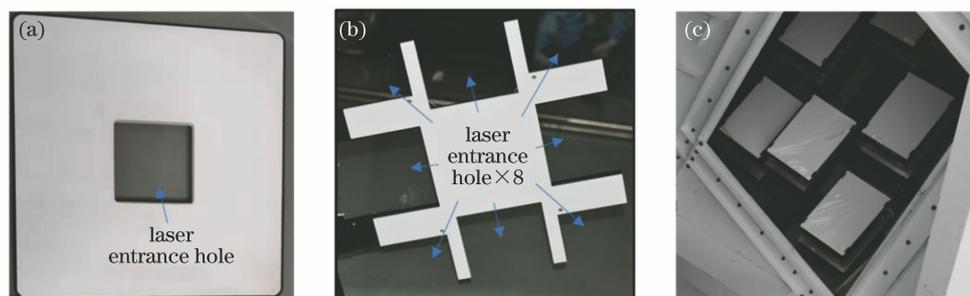


图 3 不同子系统使用的漫反射板结构。(a) NBS1;(b) NBS2;(c) FABS

Fig. 3 Diffuse reflector structure used by different subsystems. (a) NBS1; (b) NBS2; (c) FABS

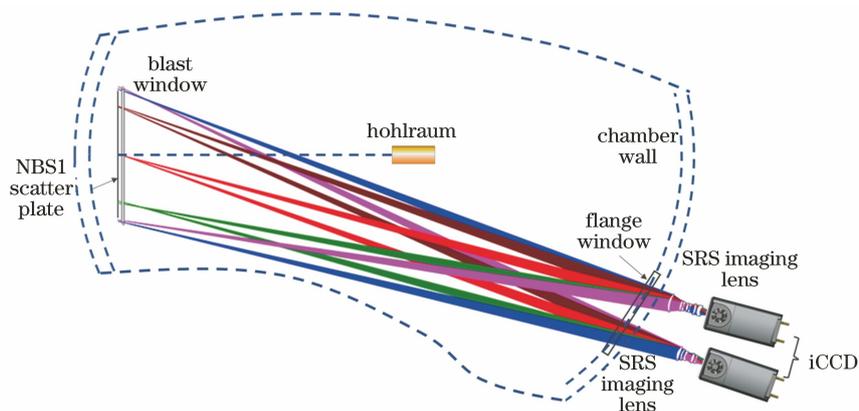


图 4 NBS1 的诊断光路结构

Fig. 4 Diagnostic optical path structure of NBS1

NBS2 主要具有散射光的空间分布成像诊断功能,漫反射板位于连接 FOA 和靶室的真空锥桶内部,其精确地卡在激光通道中间,此处需通过密封法兰窗口来观察。观察位置与反射板具有较大的夹角,对此设计了两组针对大倾斜物面成像的镜组。镜组以漫反射板的反射面为物面,物面法线与镜组光轴的夹角为 45° ,两组镜组通过诊断包内的 BS 来分谱段测量,使用的记录设备为 Andor istar DH334T 型 iCCD。

FABS 具有三种诊断功能,包括子束散射光的空间分布成像、时间分辨光谱及时间波形。漫反射板位于 TM3 的后端,中间隔有一个基底为 B270、厚度约为 15 mm、镀制单层宽谱化学增透膜的出射平板窗口。在空间分布成像诊断方面,FABS 的成像镜组对 8 个漫反射板同时成像,物面相对于相机光轴的倾斜角度为 42° (SBS) 和 45° (SRS),使用的记录设备为 Andor istar DH334T 型

iCCD。在时间分辨光谱及时间波形诊断方面,通过局部拦光的方式对散射光进行取样,具体是在出射平板窗口处分别安装 SBS/SRS 的快光电管及光纤取样端口,使其在记录位置或取样位置能伸入散射光光束中以截取部分散射光。快光电管型号为滨松 R1328U-53,感光面直径为 10 mm,响应波长范围为 $300\sim 850$ nm,上升时间约为 60 ps;光纤为 $200\ \mu\text{m}$ 芯径的熔石英光纤,数值孔径为 0.22,长度约为 15 m;光谱仪采用了 Princeton Instruments 生产 ISO Plane 160 型的 SRS 光谱仪(光栅线对数为 300)及 SP2756 型的 SBS 光谱仪(光栅线对数为 2400),条纹相机使用自研的宽阴极可见光条纹相机。在光谱测量的过程中,使条纹相机的狭缝垂直于光谱仪的狭缝,并使其对准光谱对焦清晰的位置。NBS2 及 FABS 的诊断光路结构如图 5 所示。NBS1、NBS2 和 FABS 中成像镜组的几何光学参数如表 1 所示。

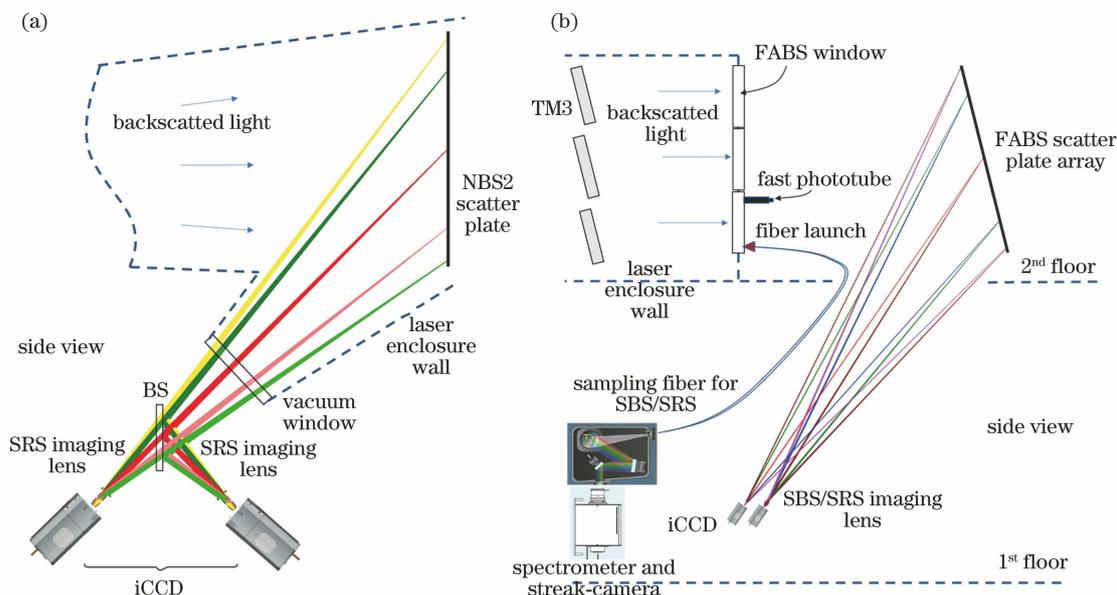


图 5 NBS2 及 FABS 的诊断光路结构。(a) NBS2;(b) FABS

Fig. 5 Diagnostic optical path structure of NBS2 and FABS. (a) NBS2; (b) FABS

表 1 三种诊断子系统中成像镜组的几何光学参数

Table 1 Geometrical optical parameters of imaging mirror arrays in three diagnostic subsystems

Lens group	Object filed / (mm × mm)	Magnification ratio	Working distance / mm	Object resolution / mm
NBS1-SBS	305 × 305	0.0400	1415	>0.160
NBS1-SRS	305 × 305	0.0400	1360	>0.250
NBS2-SBS	610 × 610	0.0200	1850	>0.625
NBS2-SRS	610 × 610	0.0200	1850	>0.625
FABS-SBS	2600 × 1640	0.0045	6000	>1.200
FABS-SRS	2600 × 1640	0.0045	6000	>1.200

在测量谱段选择和杂散信号屏蔽方面,为了分别测量 SBS/SRS,在每个记录设备前均采用带通滤片对光谱进行选择,SBS 采用的是紫外(ZWB2)玻璃,SRS 采用的是 400~800 nm 波段的带通滤片,并配备(532±13)nm 的陷波滤片来隔绝光路中可能剩余的 2ω 激光。同时,每个子系统中各支路的 iCCD 采用了不同的门控曝光时间来隔绝非散射光信号(主要为剩余激光或者鬼激光,包括激光元件、靶室内部的结构件散射或反射的激光),NBS1 的门宽设置为 10 ns,NBS2 的门宽设置为 15 ns,FABS 的门宽设置为 30 ns,并相应地设置了相对于主激光的不同延时,使得杂散信号被隔离在记录时间之外。

由于标定灵敏度的原因,本文采用将图像计数与能量之间进行绝对定标的方式,可以将测量得到的空间分布图像进行反推积分计算,能够得到散射光能量(由于涉及标定的篇幅较长,另文讨论)。

4 实验的诊断结果及分析

4.1 实验设计和理论预估

对于靶,以封底 Au 腔靶为主要靶型,其为圆柱形结构,采用单端敞口和相对端封底的设计,腔直径为 2.5 mm,长度为 5 mm,腔靶材料为高 Z 材料 Au,壁厚为 25 μm。采用点火靶常用的黑腔内充气方式来阻滞腔壁 Au 等离子体堵腔效应,气体成分为辛戊烷,压强为 0.6 atm(1 atm=100 kPa),在开口端贴有厚度为 0.5 μm 的聚酰亚胺封口膜来保持气体压强。在激光参数方面,脉冲波形由烧膜脉冲、零功率槽和方波主脉冲组成,功率密度为 0.8 × 10¹⁵~1.6 × 10¹⁵ W · cm⁻²。实验用靶及激光功率密度随时间的变化曲线如图 6 所示。

采用 LARED-JC 模拟程序计算了激光能量在 10 kJ 的条件下不同时刻的等离子体条件,如图 7 所示,其中 n_e 为电子密度,V_e 为电子纵向速度,T_e 为电子温度,T_i 为离子温度,c 为光速。时间零点为

激光烧膜脉冲的起点,因此 1.3 ns 指主脉冲入射约为 0.3 ns,其余类推。图中横轴 z 为腔轴方向的位置,以腔底为坐标零点,纵轴 r 为腔径方向的位置,以腔底圆心为坐标零点,激光从右至左入射。图 7 表现出了两个典型情况:一是在主脉冲的作用下,腔内的等离子体被加热,随着时间的增加,在热压梯度的驱动下位于激光光路上的等离子体被排开并向腔壁运动,在主脉冲后期出现等离子

体被排空的现象,激光路径上多数区域的电子密度在 $0.04n_c$ (n_c 为等离子体临界密度) 以下;二是随着激光烧蚀 Au 等离子体的膨胀,黑腔底部 Au 泡内的等离子体电子密度显著降低,甚至远低于被 Au 泡挤压的原气体等离子体电子密度,这会导致激光与合适密度的等离子体作用长度变短。综上,这两种情况均会使散射光的反射率在主脉冲后期呈大幅度下降。

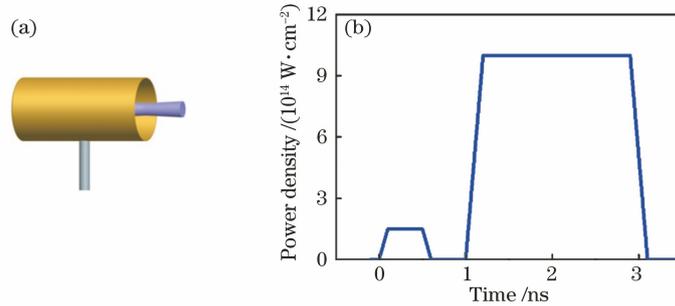


图 6 集束物理实验靶及激光功率参数。(a)封底 Au 腔;(b)激光功率密度随时间的变化曲线
Fig. 6 Cluster physics experiment target and laser power parameters. (a) Back cover Au cavity;
(b) laser power density curve with time

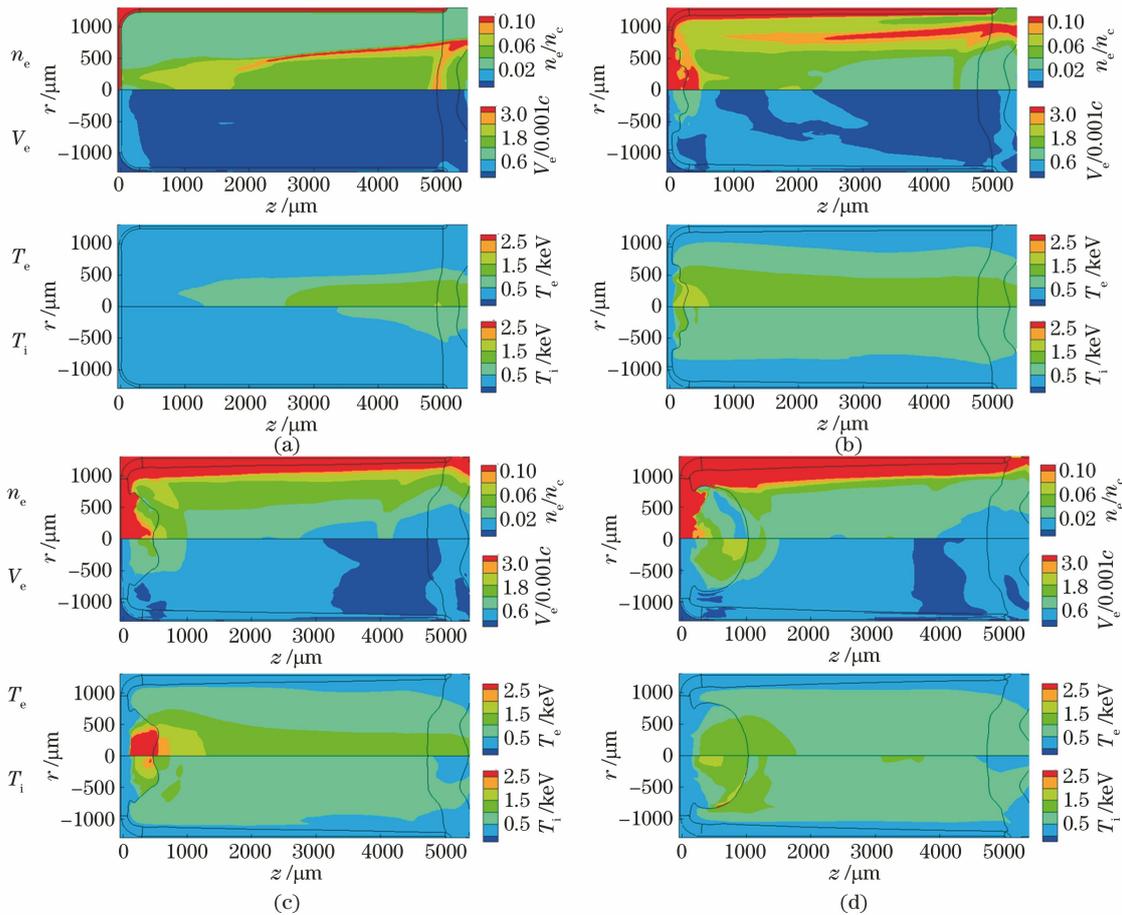


图 7 不同时刻下等离子体条件的计算结果。(a) 1.3 ns;(b) 2.3 ns;(c) 3.3 ns;(d) 4.3 ns
Fig. 7 Calculation results of plasma conditions at different moment. (a) 1.3 ns; (b) 2.3 ns; (c) 3.3 ns; (d) 4.3 ns

采用 LAP3d 模拟程序计算了在激光总能量为 10 kJ、不同机制条件下 SBS 散射光的空间分布结果,如图 8 所示,其中虚线框表示楔形透镜中各激光光子束的激光通道,即各激光光子束的 FABS 通道,而相邻虚线框间的部分则为 NBS2。计算结果表明,不同机制下 SBS 散射光的空间分布差异明显。子束机制下,SBS 散射光分布在各子束的口径内,主要进入 FABS 中;集束机制下,SBS 散射光的空间分布为一个整体,子束分布不明显,NBS2 分布图的中间位置会有较强的散射光分布;如果共用等离子体波

或散射光,SBS 散射光的空间分布又会呈现出相应的其他分布,包括可能某些束的 FABS 散射光会出现对称性地增强或减弱,而 NBS2 分布图的中间位置会出现不同强度的散射光。显而易见的是,空间分布的测量对于辨识集束构型中单子束、多光束或集束的 LPI 机制具有相当的重要性,特别是 FABS 与 NBS2 的空间分布对于散射光作用机制的判断最为关键,NBS2 与 FABS 在散射光能量分布上的比例可以作为关键参考。

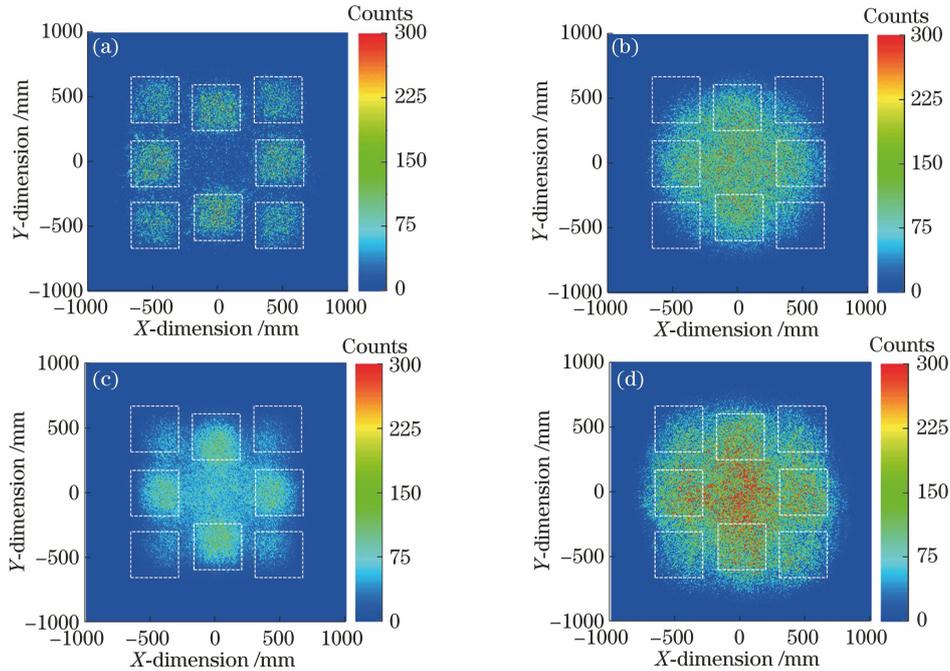


图 8 不同机制下 SBS 散射光的空间分布计算结果。(a)子束机制;(b)集束机制;(c)共用等离子体波;(d)共用散射光

Fig. 8 Calculation results of spatial distribution of SBS scattered light under different mechanisms. (a) Subbeam mechanism; (b) bunching mechanism; (c) sharing of plasma waves; (d) sharing of scattered light

4.2 实验结果及分析

将 FABS 与 NBS2 的空间分布测量结果反推计算(限于篇幅,本文不介绍反推计算的标定和计算方法),并在归一化强度下根据相互位置与尺寸投影的关系将它们拼合在一起,不同区域的图像计数可以反映出散射光的强弱,也可表示为散射光的空间分布特征。SBS 散射光的典型空间分布测量结果如图 9 所示。其中 SRS 散射光强度极弱,实验中测量的能量份额小于 1%,各发次差异较小,本文不予讨论;NBS1 由于定量标定困难,仅将其作为在空间分布上的参考。该打靶发次号为 20200805020,打靶条件为 8 子束同偏振同波长,总激光能量约为 12 kJ。由图 9 的空间分布可知:绝大部分的 SBS 散射光基本沿子束的反向传播进入 FABS 中,8 个子

束的 FABS 中 SBS 份额为 6%~14%,平均份额约为 10%,束间存在差异;少量的 SBS 散射光落在激光光束范围之外,NBS2 中总的 SBS 份额约为 1.7%。以上数据说明:现有的条件下集束构型中的散射光仍以子束机制为主,没有表现出“同一集束”的总体性行为;特别是 NBS2 图像的中间部分并不含有明显的散射光,清晰地表明现有打靶条件下既不存在明显的集束机制,也不存在共用等离子体波及共用散射光等多光束 LPI 情况,其空间分布与图 8(a)情况非常类似。

SBS 散射光的典型时间波形及时间分辨光谱如图 10 所示。其中图 10(a)的三条曲线分别为子束 S3 的激光波形(S3-main)、时间分辨光谱图像中积分得到的散射光波形(S3-OSC)及快光电管直接测

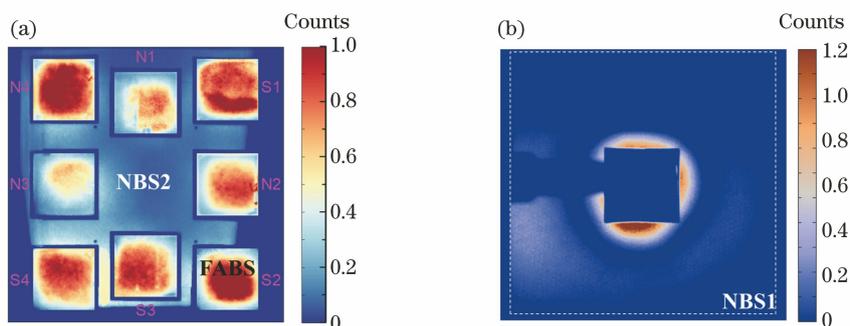


图 9 SBS 散射光的典型空间分布测量结果。(a) 归一化强度下 FABS 与 NBS2 测量拼图结果;(b) NBS1 测量结果
Fig. 9 Measurement results of typical spatial distribution of SBS scattered light. (a) Jigsaw results of FABS and NBS2 measurements at normalized strength; (b) NBS1 measurement results

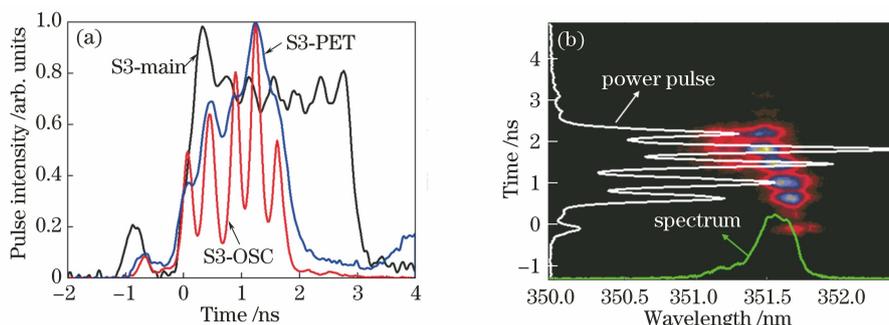


图 10 SBS 散射光的典型时间波形和时间分辨光谱测量结果。(a) 时间波形;(b) 时间分辨光谱
Fig. 10 Typical time waveform and time-resolved spectral measurement results of SBS scattering light.
(a) Time waveform; (b) time-resolved spectrum

量的波形(S3-PET),三条曲线的时间轴与烧膜脉冲的下降沿对齐。从图 10 可以发现,散射光主要集中在打靶激光主脉冲的前 2 ns(包含烧膜脉冲的激光脉冲前 3 ns),后 1 ns 基本没有贡献。将图 10 的结果与图 7 的 LARED-JC 程序模拟结果进行吻合性判断,结果表明激光主脉冲后期的等离子体排空、Au 泡电子密度大幅度下降可能会造成散射光的反射率呈大幅度下降,表明了理论模型预估的准确性。

同时,时间分辨光谱和时间波形测量表现出功率随时间变化的强调制,而激光脉冲在时域中也存在振荡,这是一个全新的现象,目前没有确实的实验证据来表明其产生原因。两种波形遵循何种关系及由何种物理原因造成的这类调制现象需要进一步设计实验来研究。

5 结 论

在集束平台上成功建立了以漫反射板为主要反射元件的散射光诊断系统,并据此获得了 LPI 实验的散射光诊断数据,以空间分布为主要测量手段的诊断系统对于判断集束构型下的散射光作用机制十

分关键,相关测量结果与理论计算结果吻合度很高,表明利用 LARED-JC 及 LAP3d 等物理程序对散射光的行为及机制的模拟较为可信。根据此基础,可以将实验进一步细化来研究集束构型下其他可能的散射光作用机制,如束间能量转移等,并对可能降低 LPI 的方法进行更精确的分析。

参 考 文 献

- [1] Spaeth M L, Manes K R, Kalantar D H, et al. Description of the NIF laser[J]. Fusion Science and Technology, 2016, 69(1): 25-145.
- [2] Ma T, Patel P K, Izumi N, et al. The role of hot spot mix in the low-foot and high-foot implosions on the NIF[J]. Physics of Plasmas, 2017, 24(5): 056311.
- [3] Kline J L, Batha S H, Benedetti L R, et al. Progress of indirect drive inertial confinement fusion in the United States[J]. Nuclear Fusion, 2019, 59(11): 112018.
- [4] Cavailler C. Inertial fusion with the LMJ[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2005, 47(12B): B389-B403.
- [5] Ebrardt J, Chaput J M. LMJ on its way to fusion

- [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, 244(3): 032017.
- [6] Yang D, Li Z C, Li S W, et al. Laser plasma instability in indirect-drive inertial confinement fusion [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2018, 48(6): 25-40.
杨冬, 李志超, 李三伟, 等. 间接驱动惯性约束聚变中的激光等离子体不稳定性[J]. *中国科学: 物理学 天文学*, 2018, 48(6): 25-40.
- [7] Hao L, Yan R, Li J, et al. Nonlinear fluid simulation study of stimulated Raman and Brillouin scatterings in shock ignition[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24(6): 062709.
- [8] Lindl J D. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain[J]. *Physics of Plasmas*, 1995, 2(11): 3933-4024.
- [9] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the national ignition facility [J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(2): 339-491.
- [10] Haan S W, Lindl J D, Callahan D A, et al. Point design targets, specifications, and requirements for the 2010 ignition campaign on the National Ignition Facility [J]. *Physics of Plasmas*, 2011, 18(5): 051001.
- [11] Xu T, Peng X S, Wei H Y, et al. Near backscatter light diagnostic system on SG-III prototype laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(12): 2853-2857.
徐涛, 彭晓世, 魏惠月, 等. 神光 III 原型装置的近背向散射光诊断系统[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(12): 2853-2857.
- [12] Peng X S, Wang F, Yang D, et al. Characteristics study of the backscattering light on Shenguang-III prototype[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0314004.
彭晓世, 王峰, 杨冬, 等. 神光 III 原型背向散射光特性研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0314004.
- [13] Wang F, Peng X S, Yan Y D, et al. Backscattered light diagnostic technique based on Shenguang-III laser facility[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0902011.
王峰, 彭晓世, 闫亚东, 等. 基于神光 III 主机的背向散射光诊断技术[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0902011.
- [14] MacKinnon A J, McCarville T, Piston K, et al. Implementation of a near backscattering imaging system on the National Ignition Facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(10): 4183-4186.