

神光-Ⅱ U 装置的正向散射角分辨诊断系统

赵闯¹, 袁鹏^{1*}, 李欣焱¹, 郑坚^{1,2}¹中国科学技术大学核科学技术学院, 安徽 合肥 230026;²上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240

摘要 针对双锥对撞点火方案实验中的受激布里渊散射过程, 发展了一套门控角分辨全口径正向散射诊断系统。设计了光纤阵列, 对神光-Ⅱ U 装置打靶伺服反射镜上的散射信号进行收集, 利用其时间特性, 通过相对测量的方式, 获得了角分辨的正向受激布里渊散射能量份额, 发现其角分布敏感依赖于激光在球壳表面的辐照模式, 为深入研究双锥对撞点火方案中的受激布里渊散射过程提供了可靠的实验结果。

关键词 激光光学; 双锥对撞点火; 受激布里渊散射; 角分辨全口径正向散射诊断

中图分类号 O536 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221987

1 引言

惯性约束核聚变自 1960 年激光器发明以来, 经历了 60 余年的发展, 虽然取得了诸多的突破, 但是仍面临着诸如激光能量利用率较低、对激光辐照均匀性要求高等难题。为了解决这些问题, Zhang 等^[1]结合快点火的思想, 创新性地提出了双锥对撞点火方案 (DCI), 并在神光-Ⅱ U 装置^[2]上开展了相关实验^[3-5]。这个方案将整个点火过程分为准等熵压缩、燃料加速、燃料对撞和磁场引导快电子加热 4 个渐进可控的过程^[1]。准等熵压缩过程在两个头对头的金锥内进行, 利用 10 ns 脉冲宽度的准等熵激光脉冲对金锥内的 DT 燃料进行压缩, 双锥的使用可以极大地降低燃料压缩对能量的需求^[1]。这个过程中可能会发生诸如受激布里渊散射 (SBS)、受激拉曼散射 (SRS) 和束间能量转移 (CBET) 等激光等离子体不稳定性 (LPI) 过程^[6], 这会降低激光能量的耦合, 影响压缩的对称性, 强烈的 SBS 正向散射还可能对终端光学组件造成损坏。神光-Ⅱ U 装置使用了连续相位板 (CPP) 技术, 通过匀滑光斑、降低局域激光光强实现 SBS 强度的降低^[7]。美国的国家点火装置 (NIF)、OMEGA 等激光装置上均采用全口径正向散射诊断系统 (FABS) 对 SBS 正向散射强度水平进行评估^[8-9]。另外, 为了对压缩对称性进行监测, 需要在多个窗口对 SBS 正向散射能量份额进行诊断, 而在 NIF、OMEGA 等激光装置上均只有两个 FABS 诊断系统, 只可对两个激光窗口的正向散射份额进行诊断^[8-9], 因此需要提出新型的诊断方式, 以实

现多个窗口 SBS 正向散射能量份额的同步诊断。

SBS 散射能量份额的空间分布作为可实验直接观测到的量之一, 对等离子体状态和相关 LPI 过程的表征极其重要。一般来说, 通过近正向散射成像诊断 (NBI) 和 FABS 综合所得的空间分布与理论模型和数值模拟的比较进行相关研究^[10], 其中 FABS 诊断结果通常为整个激光口径上正向散射份额的平均^[11-17]。在神光-Ⅲ 原型机上进行的相关实验中: 李志超等^[18]利用在近正向布置的 PIN 阵列探测器, 基于线性拟合, 得到了 Au 半腔靶的 SBS 正向散射份额约为 20%; 焦春晖等^[19]应用传统的 FABS 思想, 利用能量卡计, 并对正向散射方向上用于激光能量测量的取样板对正向散射信号的遮挡进行线性补偿, 得到了同样规格的 Au 半腔靶的 SBS 正向散射份额约为 10%。焦春晖等与李志超等的结果有较大出入, 说明在正向散射方向上, SBS 分布并不是简单的线性关系, 表明了对 SBS 正向散射份额空间分布进行诊断的重要性。为了加深对 DCI 准等熵压缩阶段 SBS 物理过程的理解, 与在正向散射方向上激光口径范围内整体进行诊断的 FABS 不同, 本文针对上海神光-Ⅱ U 装置, 设计出了一套具有角分辨能力的 SBS 正向散射能量份额诊断系统, 系统角度分辨为 $\pm 2^\circ$, 系统的能量份额诊断精度为 $\pm 15\%$ 。利用该系统, 作者对 DCI 方案准等熵压缩过程中 (351 \pm 3) nm 波段的正向散射光角分布进行诊断。

本文的主要安排为: 第 2 章对系统诊断原理和相关设计进行介绍; 第 3 章对系统在运行过程中的诊断细节, 包括时间同步和相关标定工作进行介绍; 第 4 章

收稿日期: 2022-11-15; 修回日期: 2023-01-29; 录用日期: 2023-02-07; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 A 类 (XDA25010200)

通信作者: *yuanpeng@ustc.edu.cn

列出了系统在 DCI 2021 年冬季实验中获得的相关诊断结果,并进行了一定的物理分析;第 5 章对系统的诊断不确定性进行了评估;最后一章进行总结与展望。

2 诊断系统设计

如图 1 所示,在神光-II U 装置中,基频纳秒驱动激光由伺服反射镜反射进入靶室、经过 CPP 对激光光束进行匀滑,再由二倍频晶体与三倍频晶体的组合倍频将其转变为波长是 351 nm 的三倍频激光,接着经过 F 数为 7.2 的楔形透镜聚焦,最终可实现由金锥约束的球冠形燃料的准等熵压缩。在这个过程中,三倍频晶体后表面处会反射部分三倍频打靶激光(后文称为 laser 信号)。同时,打靶产生的 SBS 背向散射信号、对向窗口未被吸收的反射光和 CBET 信号(后文称为 SBS 信号)会沿着打靶光路返回。图 1(b)所示的一个典型的实验结果为利用光栅谱仪-条纹相机,本实验团队测量了来自入射激光窗口#7 伺服镜的光信号,可见 laser 信号提前约 20 ns 到达探测器。与 FABS 采集背向散射信号在伺服反射镜上透射信号的诊断方式^[11-17]不同,通过测定这两个信号在伺服反射镜上散射信号的能量,再进行终端光学组件透过率、反射率的修正,可得到到达靶点的三倍频激光和靶点产生的正背向 SBS 散射光能量信息,进而得到 SBS 背向散射能量份额,即

$$R_{\text{SBS}} = \frac{E_{\text{SBS}}}{E_{\text{target}}} = \frac{E_{\text{SBS}}}{TE_{\text{laser}}} \propto \frac{C_{\text{SBS}}/(K_{\text{SBS}}T)}{TC_{\text{laser}}/(K_{\text{laser}}R)} = \frac{R}{T^2} \frac{K_{\text{laser}}}{K_{\text{SBS}}} \frac{C_{\text{SBS}}}{C_{\text{laser}}}, \quad (1)$$

式中: R_{SBS} 为 SBS 背向散射能量份额; E_{SBS} 为 SBS 背向散射能量; E_{target} 为到达靶点的三倍频激光能量; E_{laser} 为三倍频晶体后表面反射的三倍频打靶激光能量; T 为主/次防溅射板、楔形透镜等元件与三倍频晶体后表面对应于三倍频波长的总透过率; R 为三倍频晶体后表面在三倍频波长处的反射率; C_{laser} 为增强型电荷耦合器件 (ICCD) 记录的 laser 信号在伺服反射镜上散射信号的计数,可反映这部分所包含的能量; C_{SBS} 为 ICCD 记录的 SBS 信号在伺服反射镜上散射信号的计数,可反映这部分所包含的能量; K_{laser} 和 K_{SBS} 为对应测量支路的能量归一化计数,其比值需要通过标定获得。为了降低 CPP 相位调制对倍频晶体倍频效率的影响,三倍频晶体与 CPP 距离较短, CPP 在三倍频晶体后表面产生的光强调制较小^[20],当终端光学组件正常运行时,三倍频晶体后表面几乎无损伤, R 较为恒定,具体数值由神光-II U 装置运行人员提供, $R/T^2=0.038$ 。终端光学组件中为了降低鬼像的影响,楔形透镜等光学元件以一定角度倾斜放置,其反射光打到侧壁上^[21],反射到伺服反射镜上的光为这些元件表面因 CPP 光强调制和靶溅射物质损伤产生的杂散光,其强度与入射激光没有严格的线性关系。同时,在目前的分解实验中,

驱动激光脉冲宽度约为 5 ns,楔形透镜等光学元件上的杂散信号相比 laser 信号延迟约 7 ns,二者在时间上能够分离开,减少取样面的数目可以使原理更加简明,并降低诊断误差。由于 laser 信号和 SBS 信号的时延固定,故可以将信号光分为两路,由两台具有门控功能的弱光探测设备 ICCD 通过控制快门开门时刻与开门宽度先后进行测定,并降低楔形透镜、主/次防溅射板等终端光学组件元件上杂散信号的影响。除此之外,通过在 ICCD 光阴极前端添加 351 nm 波长附近的窄带滤波片,对倍频晶体各表面反射的基频驱动激光、二倍频驱动激光和靶点产生的 SRS 背向散射信号进行滤除。

FABS 诊断应用绝对测量的原理对 SBS 背向散射的能量进行诊断,三倍频晶体后表面反射的三倍频打靶激光对 FABS 系统而言为杂散信号,主要是利用这一元件表面和主光轴有一定倾角的特点,通过空间滤波的方式进行滤除^[16]。这种方式对空间滤波小孔的加工精度要求很高,同时增加了光路调节的难度。然而,所设计诊断系统通过精确调节 ICCD 开门时刻和开门宽度对这两部分目标信号进行采集,不仅精简了光路,还可以降低楔形透镜等元件产生的杂散信号对诊断的影响。另一方面,所提相对测量的诊断方式降低了对 laser 信号和 SBS 信号共同传输光路稳定性的要求,使得应用光纤进行信号的采集和传输成为可能,提高了诊断排布的灵活性,这也是所设计的诊断系统的特色之一。下面将结合以上实验原理,对整个系统的信号采集与传输模块、份额诊断模块分别作详细介绍。

2.1 信号采集与传输模块

神光-II 装置上 FABS 系统应用的大口径菲涅耳透镜^[14]和神光-III 主机装置上 FABS 系统应用的离轴抛物面镜等大口径光学元件^[22]都对诊断系统排布所需要的空间提出了一定的要求。神光-II 装置正是基于空间上的限制而采用菲涅耳透镜替代常规透镜,以在较轻质量的条件下实现较短的焦距,但仍需要占据较大的空间^[14]。为了降低诊断系统排布对空间的需求,提高其可移植性,基于相对测量的诊断原理,设计了一种结构紧凑、可移植性好的信号采集装置。如图 2(a)所示,信号采集模块主体由 9 个通光孔径为 1.27 cm 的光学调整架、专门设计的八边形棱台支架(后面统一称为九通道收光盘)组成,光学调整架安装在九通道收光盘的 8 个侧面和背部处,信号收集光纤通过转接安装在光学调整架上。主体尺寸约为 15 cm×15 cm×8 cm,相对于 31 cm×31 cm 的驱动激光光束口径而言,整体尺寸较小,设计九通道收光盘 8 个侧面相对于其 2 个底面有固定的倾角,从而实现以一个较小的尺寸对整个伺服反射镜上散射信号 3×3 的分布式采集,如图 2(b)所示,并对信号采集模块 9 个收光区域进行了定义,以便于后文进行描述。主体部分通过两个回字形连接件和 L 型转接由一个万向载物台进行支撑,

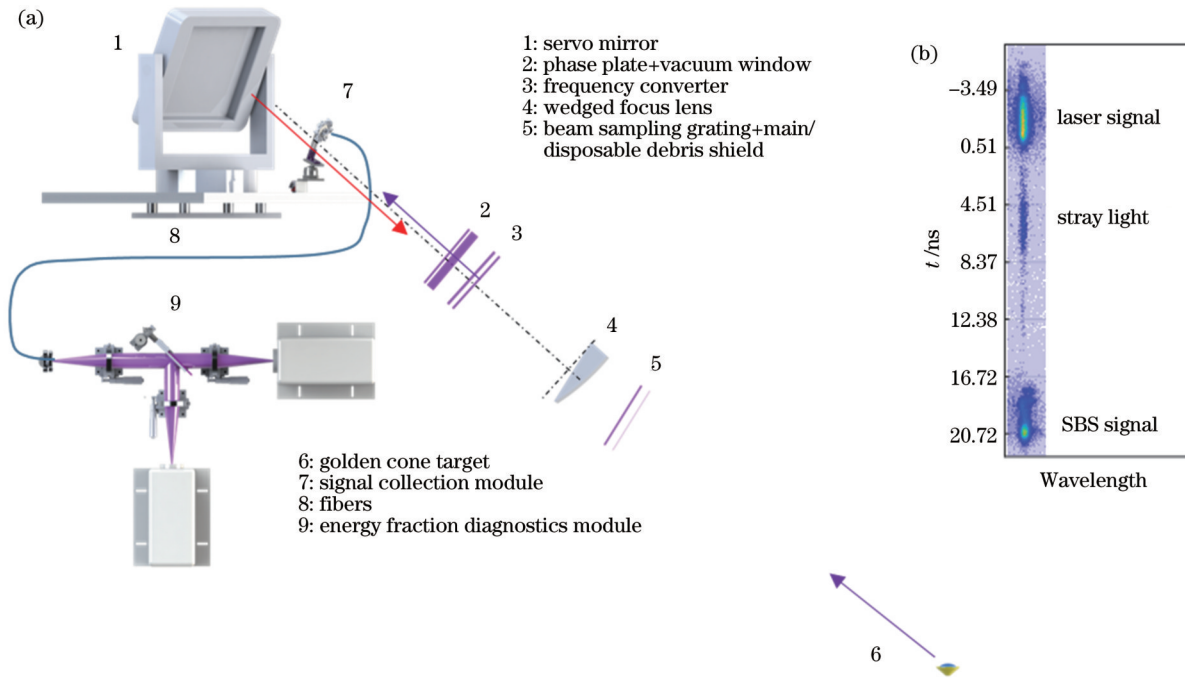


图 1 诊断原理。(a)系统设计;(b)谱仪-条纹相机记录的来自伺服反射镜的三倍频信号的时间演化光谱

Fig. 1 Diagnosis principles. (a) System design; (b) time evolution spectrum of third harmonic signals from servo mirror recorded by spectrometer-streak camera

可以实现光纤收光整体方向的灵活调节,并具有一定的高度可调能力。每个光学调整架都具有 $\pm 4^\circ$ 的二维调节能力,可以在万向载物台调节的基础上实现对每根信号收集光纤指向的微调,进一步提高了诊断系统

的可移植性。万向载物台可以根据实验条件灵活选择固定方式,如图 2(c)所示,在神光-II U 平台的实验现场,万向载物台通过磁性底座固定在激光窗口#7 伺服反射镜正前方约 750 mm 处,可以明显体现出所设计

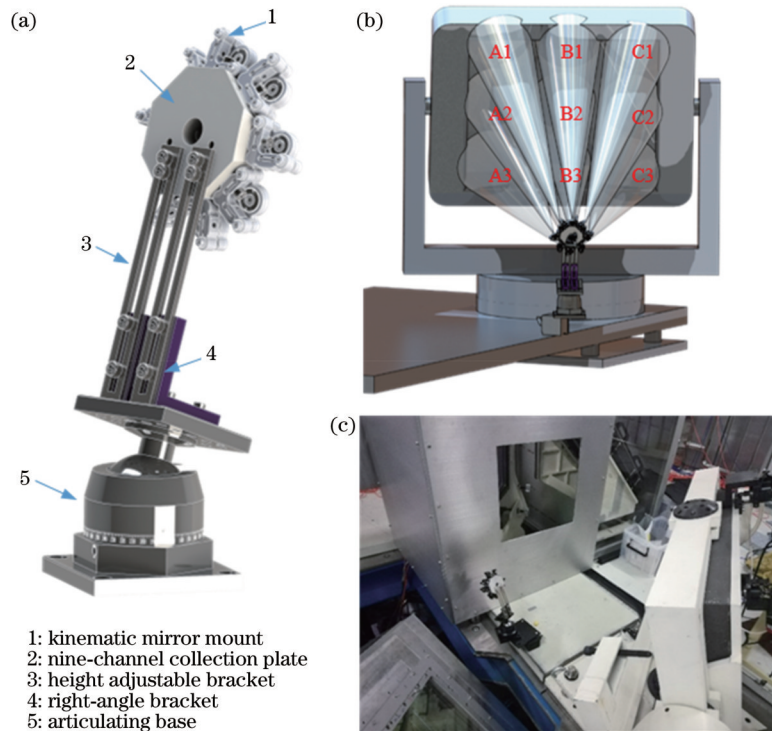


图 2 信号采集模块设计。(a)信号采集模块机械结构图;(b)信号采集模块信号收集效果;(c)信号采集模块现场排布

Fig. 2 Signal collection module design. (a) Mechanical structure diagram of signal collection module; (b) signal collection effect of signal collection module; (c) on-site arrangement of signal collection module

的信号采集模块对安装空间的要求很低。信号收集光纤为紫外优化光纤,在 351 nm 波长附近有较低的衰减。光纤数值孔径为 0.12,单根光纤收集区域半径约为 90 mm,相邻光纤收光区域中心间距约为 200 mm,最终实现相对于靶点角度分辨约为 $\pm 2^\circ$ 、采样角度间隔约为 3.9° 的 SBS 背向散射能量份额诊断。用光纤阵列对伺服反射镜上镜面散射光进行采集的方式,相比于使用透镜对透射光进行采集,降低了对光路瞄准精度的要求。同时,当诊断窗口增加时,诊断成本的增加有限,故可以以较低的成本实现多个激光窗口 SBS 背向散射能量份额的同步诊断。相关的工程性验证将进一步进行。

另外,应用光纤进行信号的采集和传输可使得后续模块的排布更加灵活,并方便仪器的屏蔽。此外,诊断所使用的探测器探头的面积一般来说都比较小,故需要缩束系统对全口径信号进行缩束。FABS 诊断系统一般采用透镜组合进行缩束^[14-17, 22],在所设计诊断

系统中,可以实现两个窗口同时进行诊断的 18 路信号收集光纤在另一端进行合束,由此实现了光路的缩束,使信号传输光路得到了进一步精简。

2.2 份额诊断模块

如图 3 所示,信号收集光纤在份额诊断模块输入端进行了合束,端面形成了一个六芒星结构,分布在直径约 4 mm 的圆内。出射光经过紫外消色差透镜准直后,被 351 nm 波长附近的 50:50 分束片分为两路,再经简单的成像系统成像在两台 ICCD 光阴极上,通过控制两台 ICCD (牛津仪器 DH334T-18U-C3 型和牛津仪器 DH334T-18U-63 型,在 SBS 波长范围内标称的光谱响应较为平坦) 的开门时刻和开门宽度,并由安装在 ICCD 输入窗口前的 351 nm 波长附近窄带滤片进行波长选择,最终实现目标信号能量的记录。通过统计 ICCD 相应光纤端面成像光斑的计数,根据前文所述的原理,即可得到 SBS 背向散射能量份额。

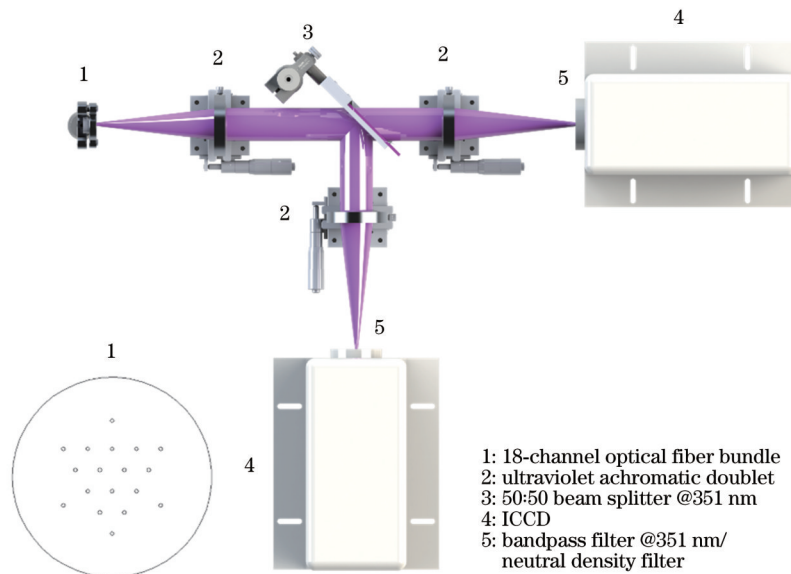


图 3 能量份额诊断模块

Fig. 3 Energy fraction diagnostic module

3 诊断细节

为了通过门控的方式对特定时刻的信号进行采集,需要对 ICCD 进行同步操作,以确定 ICCD 的开门时刻。神光-II U 装置提供了与打靶激光同步的时标光和电触发信号。通过调节 ICCD 开门时刻延迟对输入到份额诊断模块的时标光(脉冲宽度约为 100 ps)进行采集,再补偿目标信号与时标光信号传输光程差,获得准确的 ICCD 开门时刻。

为了确保信号能量测量的准确性,需要对 ICCD 的开门时间特性进行测定,以选择合适的开门门宽使信号落在 ICCD 开门时间特性曲线的“平顶区”,同时降低楔形透镜等终端光学组件杂散信号的影响。测试

方法为将时标光脉冲(脉冲宽度为 100 ps)由十八合一合束光纤输入到份额诊断模块光路中,通过调节 ICCD 开门触发时延,即可得到该门宽下 ICCD 的开门时间特性。这个过程可以理解为 100 ps 脉冲对 ICCD 开门特性的采样。DCI 2021 年冬季实验中,测试了一系列开门宽度下的开门时间特性。以实验条件下最终选择的开门门宽为例,标定结果如图 4(a)所示。在该轮实验中,由 DH334T-18U-C3 型 ICCD 对 laser 信号进行采集,由 DH334T-18U-63 型 ICCD 对 SBS 信号进行采集,为了方便描述,相应的 ICCD 后文分别称为 laser 通道 ICCD 和 SBS 通道 ICCD。由于 laser 信号与杂散信号的相对延迟较短,故设置 laser 通道开门宽度与 SBS 通道 ICCD 相比较短(laser 通道开门宽度为

8.5 ns, SBS 通道 ICCD 开门宽度设置为 12 ns), 以降低杂散信号对 laser 信号采集的影响。

份额诊断模块中信号分成两个支路, 由两台 ICCD 对 laser 信号和 SBS 信号分别进行记录。在这个过程中, 分束片的分束特性、两条支路上成像透镜与 351 nm 窄带滤片的信号传输特性、ICCD 的能量响应的不对称性、根据需要所加的中性衰减片和实际光路中可能出现的切光等因素都会影响两条支路的对称性。另外, 不同通道间 ICCD 的响应存在涨落, 光路传输特性也可能有所不同, 故需要在诊断系统

上线后对每一个信号通道的响应比, 即对诊断原理中 K_{laser} 和 K_{SBS} 的比值进行标定。在响应比标定过程中, 将三倍频时标光脉冲(脉冲宽度为 100 ps)由十八合一合束光纤输入到份额诊断模块光路中, 在实验门宽下选择恰当的触发时延(保证光脉冲处 ICCD 开门时间特性曲线的“平顶区”), 并利用两台 ICCD 对同一时标光脉冲进行记录, 对应信号区域光斑扣除噪声后的计数比即为标定所得两条支路的响应比。DCI 2021 年冬季实验的在线标定结果如图 4(b) 所示。

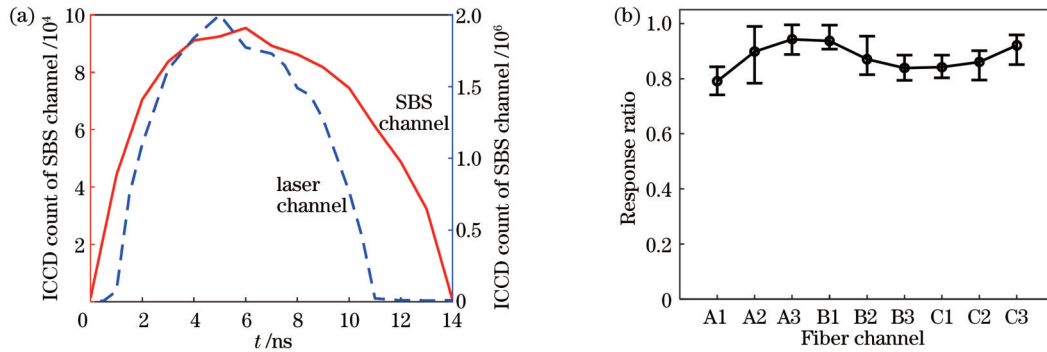


图 4 份额诊断模块特性。(a) ICCD 的开门时间特性; (b) 份额诊断模块两条支路响应比标定结果

Fig. 4 Characteristics of energy fraction diagnostics module: (a) Gating time characteristic of ICCD; (b) response ratio calibration result of two branches in energy fraction diagnostic module

4 典型实验结果

在 DCI 2021 年冬季实验中利用所设计的诊断系统进行了测试和实验, 对激光注入窗口#7 的 SBS 背向散射信号进行诊断。实验过程中主要波形有 R7-V2 波形、R7-V3 波形和 1 ns 脉冲宽度的方波波形。图 5(a) 为 R7-V2 波形与 R7-V3 波形的典型发次波形, 两个波形均是由 3 个预脉冲和 1 个方波脉冲组成。对于 R7-V2 波形, 方波脉冲的设计脉冲宽度为 2.57 ns(半峰全宽), 而对于 R7-V3 波形, 方波脉冲的设计脉冲宽度为 3.08 ns。两种波形方波部分的功率相当, R7-V2 波形单束激光方波部分的设计功率为 0.5501 TW, 后

者为 0.5535 TW, 单束激光强度约为 $4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 由 CPP 进行空间匀滑。图 5(b) 为金锥靶的设计参数, 其中金锥张角为 100° , 并将 $\text{C}_8\text{H}_8/\text{C}_{16}\text{H}_{14}\text{Cl}_2$ 球壳外半径设计为 $545 \mu\text{m}$ 。此外, 实验过程中还有部分 Si 平面靶。图 6 为典型发次(金锥靶、R7-V3 波形下该轮实验中的 shot114) 的实验结果, 单个光斑为单根光纤端面在 ICCD 上的成像(未标注为激光窗口#5 的信号, 因未与激光窗口#7 的信号精确同步, 故不进行分析)。表 1 为根据第 2 章的实验原理所得的该发次九通道 SBS 散射能量份额分布结果, 空间对应关系如图 2(b) 所示。该发次的诊断结果表明, 上述条件下 SBS 背向散射的强度可以达到较低的水平。

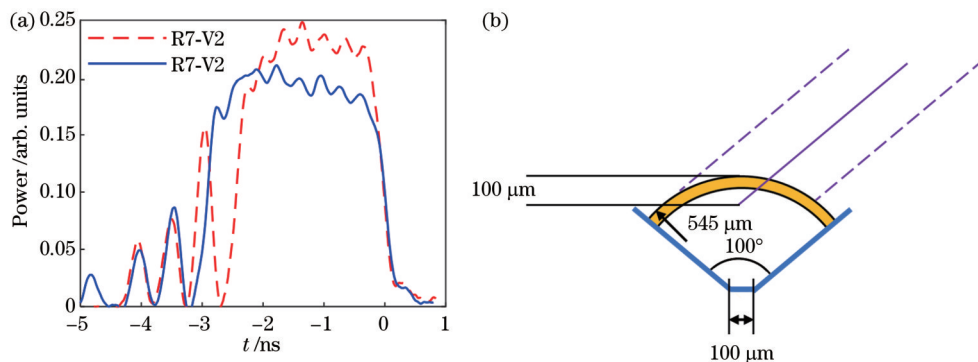


图 5 DCI 2021 年冬季实验的实验条件。(a) 激光波形条件; (b) 金锥与激光辐照条件(激光聚焦位置到冠顶距离为 $100 \mu\text{m}$)

Fig. 5 Experimental conditions for DCI 2021 winter experiment. (a) Waveform conditions; (b) golden cone and laser irradiation condition (laser focusing distance from crown of $100 \mu\text{m}$)

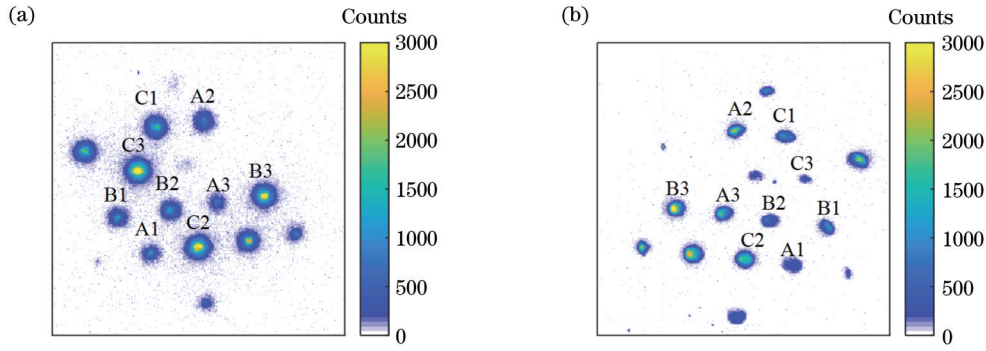


图 6 诊断结果原始图。(a) laser 信号强度; (b) SBS 信号强度。
Fig. 6 Original diagram of diagnostic results. (a) Intensity of laser signal; (b) intensity of SBS signal

表 1 SBS 背向散射能量份额分布
Table 1 Distribution of SBS backscattering energy fraction

Shot No.	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
114	2.50%	4.10%	7.94%	2.33%	1.62%	2.39%	1.21%	1.75%	0.08%

实验中为了提高能量的耦合效率,对激光焦斑的叠合位置(金锥轴线方向上球冠顶到激光光束中心的距离)进行了扫描优化,进行了激光焦斑叠合在球壳冠顶下方 100、125、150 μm 处的相关实验。图 5(b)即为激光焦斑叠合在冠顶下方 100 μm 处的情形。对不同激光

焦斑叠合位置下 SBS 背向散射份额的分布进行了实验探究,相关的诊断结果如图 7 所示。在图 7(c)所示的球冠靶情况下,对于 shot114, #1 激光能量为 2505.25 J, #7 激光能量为 1321.45 J,不平衡性相对其他发次较大,对 SBS 背向散射份额的分布产生了重要影响。

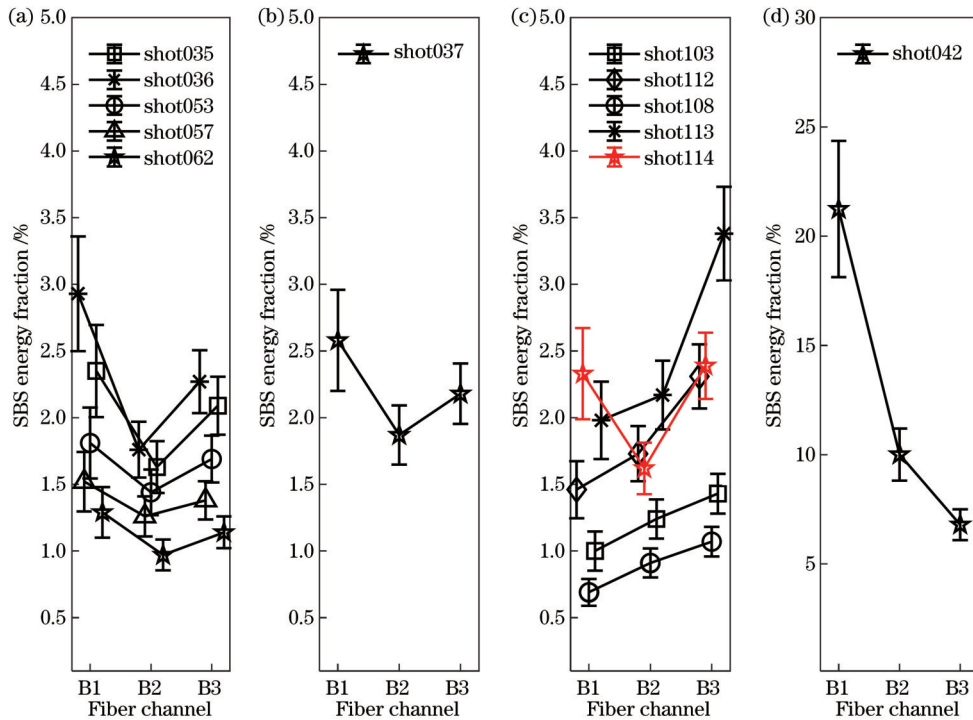


图 7 B 区背向 SBS 散射能量份额分布。(a)球冠靶(激光焦斑叠合在冠顶下方 100 μm); (b)球冠靶(激光焦斑叠合在冠顶下方 125 μm); (c)球冠靶(激光焦斑叠合在冠顶下方 150 μm); (d)平面靶(激光焦斑靶上表面)
Fig. 7 Distribution of SBS backscattering energy fraction in B area. (a) Spherical crown target (laser focal spot superimposed 100 μm below crown top); (b) spherical crown target (laser focal spot superimposed 125 μm below crown top); (c) spherical crown target (laser focal spot superimposed 150 μm below crown top); (d) planar target (upper surface of laser focal spot target)

由图 7 可得,对于锥靶,当激光聚焦位置到冠顶距离从 100 μm 增长到 150 μm 时, SBS 背向散射能量份

额分布发生了明显变化。由图 5 (b)可知,对于金锥靶而言,当激光聚焦位置不同时,激光相对靶表面的局域

入射角度会发生改变,这会引引起激光能量吸收效率的变化,从而导致激光加载过程中等离子体状态发生改变,最终使SBS背向散射能量份额分布发生变化。

5 误差分析

对于本文的诊断系统,误差来源主要有ICCD增益涨落、ICCD触抖动、ICCD开门特性(ICCD“平顶区”平坦程度)和数据计算误差。这些因素与具体的实

验条件和实验条件约束下的实验设置有关。在DCI 2021冬季实验中,ICCD的增益涨落、数据计算方法带来的误差可由响应比的标定数据进行估计,响应比涨落即为误差范围。由图4(b)各通道标定数据的涨落可得,这部分带来的误差最大可达到±12.86%,具体各通道的误差与器件的局部特性有关,故具有一定的不均匀性,如表2所示[空间对应关系如图2(b)所示]。

表2 各通道响应比标定误差

Table 2 Response ratio calibration error of each channel

Channel	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Ratio calibration	±6.56%	±6.10%	±5.21%	±12.86%	±9.58%	±7.62%	±5.83%	±5.50%	±7.58%

对于ICCD触抖动和开门特性带来的误差,可由图4(a)所示的标定的ICCD的时间开门特性图与图5(a)所示的神光-II U装置提供的激光波形图进行粗略估计,一定时延下ICCD测得信号的计数为ICCD时间开门特性与信号时间特性在该时延下的卷积,相关过程可用MATLAB进行模拟。改变ICCD实际触发时延可以得到其开门时刻在一定时间范围内抖动时对一定能量信号所得计数的涨落,该涨落即为ICCD触抖动和开门特性带来的误差。图8(a)

为实验设定延迟下laser通道ICCD开门特性与三倍频晶体后表面反射部分激光信号、主/次防溅射板产生散射信号的时间关系。此时,ICCD会以较低的能量增益采集驱动激光预部分在防溅射板产生的杂散信号,这部分能量占驱动激光总能量的1%左右,并且防溅射板在正背向的散射效率与三倍频晶体后表面的反射率相比较低,因此杂散信号对三倍频晶体后表面反射三倍频打靶激光信号收集的影响应小于1%,可忽略不计。

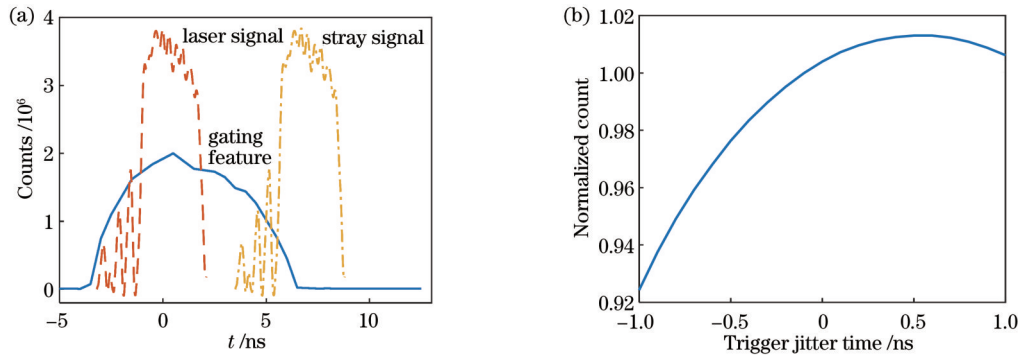


图8 ICCD触抖动和开门特性带来的误差。(a)实验设定延迟下ICCD开门时间特性与三倍频晶体后表面反射部分激光信号、主/次防溅射板产生散射信号的时间关系;(b)ICCD触抖动对信号采集的影响

Fig. 8 Errors caused by ICCD trigger jitter and gating characteristic. (a) Time relationship among ICCD gating time characteristic, reflected laser signal part from rear surface of frequency-triple-conversion crystal and stray signal generated by primary and secondary debris shields under experimental set delay; (b) effect of ICCD trigger jitter on signal acquisition

仅改变时延,图8(b)为不同触发时延下通道ICCD的采集结果,当开门时延抖动小于±0.5 ns时,ICCD所得的信号涨落低于±5%。由图4(a)可知,对于SBS通道ICCD,其开门宽度较宽,在同样的条件下测得信号的涨落应不高于±5%。

综上,ICCD增益涨落、触抖动、开门特性(ICCD“平顶区”平坦程度)和数据计算方法等元素带

来的误差应彼此独立,因此误差合成符合公式

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^q \Delta_i^2}, \tag{2}$$

各通道的诊断不确定度如表3所示。

对于整个诊断系统而言,在DCI 2021年冬季实验的运行过程中,其背向散射份额的诊断精度应优于±15%。

表3 各通道诊断不确定度

Table 3 Diagnostic uncertainty for each channel

Channel	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Uncertainty	±9.65%	±9.34%	±8.79%	±14.67%	±11.91%	±10.40%	±9.17%	±8.96%	±10.37%

6 总 结

神光-II U 装置是目前进行 DCI 项目研究的主要激光装置,由 8 路纳秒光束进行 DCI 方案的第一个阶段,即准等熵压缩阶段。该阶段发生的 LPI 过程对压缩效果有非常重要的影响,针对神光-II U 装置,基于相对测量的诊断原理,自行研制了一套结构紧凑、可移植性好的 SBS 背向散射诊断系统,可以在背向散射方向上进行相对于靶点角分辨约为 $\pm 2^\circ$ 的 SBS 背向散射能量份额分布的诊断,诊断精度为 $\pm 15\%$,并在 DCI 项目实验中较稳定地实现了对背向散射能量份额分布的监测。初步诊断结果表明,SBS 背向散射份额分布明显依赖于激光焦斑在球壳表面的叠合方式,为进一步理解 DCI 准等熵压缩过程中的激光与等离子体相互作用提供了可靠参考。所设计诊断系统用简单机械结构所支撑的光纤阵列对信号进行分布式采集,理论上可以以较低的价格实现多个激光注入窗口背向散射份额分布的同步诊断,从而实现对压缩的对称性进行监测,相关的工程性验证有待进一步进行。

致谢 衷心感谢 DCI 联合研究团队在实验方面给予的支持和宝贵建议。

参 考 文 献

- [1] Zhang J, Wang W M, Yang X H, et al. Double-cone ignition scheme for inertial confinement fusion[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2020, 378(2184): 20200015.
- [2] Zhu J Q, Zhu J, Li X C, et al. Status and development of high-power laser facilities at the NLHPLP[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6: e55.
- [3] 方可, 张喆, 李玉同, 等. 双锥对撞点火机制 2020 年冬季实验中的瑞利-泰勒不稳定性分析[J]. *物理学报*, 2022, 71(3): 035204.
Fang K, Zhang Z, Li Y T, et al. Analytical studies of Rayleigh-Taylor instability growth of double-cone ignition scheme in 2020 winter experimental campaign[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(3): 035204.
- [4] 张喆, 远晓辉, 张翌航, 等. 超音速高密度喷流对撞过程中的高效能量转移[J]. *物理学报*, 2022, 71(15): 155201.
Zhang Z, Yuan X H, Zhang Y H, et al. Efficient energy transition from kinetic to internal energy in supersonic collision of high-density plasma jets from conical implosions[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(15): 155201.
- [5] Zhao X, Yuan X H, Zheng J, et al. An angular-resolved scattered-light diagnostic for laser-plasma instability studies[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2022, 93(5): 053505.
- [6] Kruer W L. *The physics of laser plasma interactions*[M]. Redwood City: Addison-Wesley, 1988.
- [7] 季来林, 刘崇, 朱宝强, 等. 神光 II 升级系统中束匀滑对三倍频的影响分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1219002.
Ji L L, Liu C, Zhu B Q, et al. Analysis of influence of beam smoothing on third harmonic generation in SG II upgrade[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1219002.
- [8] Craxton R S, Anderson K S, Boehly T R, et al. Direct-drive inertial confinement fusion: a review[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22(11): 110501.
- [9] Datte P, Celliers P, Kalantar D, et al. Operational experience with optical streak cameras at the National Ignition Facility[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8850: 88500G.
- [10] Gong T, Zheng J, Li Z C, et al. Frequency mismatch in stimulated scattering processes: an important factor for the transverse distribution of scattered light[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23(6): 063303.
- [11] Bower D E, McCarville T J, Alvarez S S, et al. Full aperture backscatter station measurement system on the National Ignition Facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(10): 4177-4179.
- [12] Froula D H, Bower D, Chrisp M, et al. Full-aperture backscatter measurements on the national ignition facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(10): 4168-4170.
- [13] Wilke M D, Fernández J C, Berggren R R, et al. Full aperture backscatter station imager diagnostics system for far-field imaging of laser plasma instabilities on Nova[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, 68(1): 672-675.
- [14] 李志超. 大尺度激光等离子体相互作用的实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
Li Z C. *Experimental research on large-scale laser-plasma interactions*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011.
- [15] 王传珂, 蒋小华, 王哲斌, 等. 神光 II 激光装置的全口径背向散射测量系统[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(8): 1896-1900.
Wang C K, Jiang X H, Wang Z B, et al. Full-aperture backscatter station on Shenguang-II laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(8): 1896-1900.
- [16] 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.
Wang F, Peng X S, Yan Y D, et al. Backscattered light diagnostic technique based on Shen Guang-III laser facility[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0902011.
- [17] 魏惠月, 彭晓世, 徐涛, 等. 神光 III 原型装置的全口径背向散射诊断技术[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(12): 2773-2777.
Wei H Y, Peng X S, Xu T, et al. Full aperture backscatter light diagnostic system on Shenguang-III prototype laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(12): 2773-2777.
- [18] 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.
Li Z C, Zhang X D, Yang D, 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.
- [19] 焦春晔, 王峰, 蒋小华, 等. 神光 III 原型的全口径背反散射诊断系统[J]. *核电子学与探测技术*, 2011, 31(3): 306-311.
Jiao C Y, Wang F, Jiang X H, et al. Full aperture backscatter diagnosis system on Shenguang prototype laser facility[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2011, 31(3): 306-311.
- [20] 徐守英, 周申蕾, 龚雨枫, 等. 连续相位板对靶面 SBS 激光后向传输特性影响研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(22): 2205001.
Xu S Y, Zhou S L, Gong Y F, et al. Influence of continuous phase plate on backscattered transmission characteristics of SBS laser light at target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(22): 2205001.
- [21] 乔战峰, 卢兴强, 赵东峰, 等. 神光 II 升级装置终端光学组件的排布设计[J]. *中国激光*, 2008, 35(9): 1328-1332.
Qiao Z F, Lu X Q, Zhao D F, et al. Arrangement design of the final optics assembly for the SG-II upgrading laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(9): 1328-1332.
- [22] Zha W Y, Yang D, Xu T, et al. Backscatter spectra measurements of the two beams on the same cone on Shenguang-III laser facility[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(1): 013501.

Angle-Resolved Stimulated Brillouin Backscattering Diagnosis System Based on Shenguang- II Upgrade Facility

Zhao Chuang¹, Yuan Peng^{1*}, Li Xinyan¹, Zheng Jian^{1,2}

¹*School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;*

²*Collaborative Innovation Center of IFSA, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*

Abstract

Objective Stimulated Brillouin scattering (SBS) is an important topic in the field of laser-drive inertial confinement fusion (ICF). SBS can reduce the laser-target energy coupling efficiency, spoil implosion symmetry, and degrade target gain. The full-aperture stimulated Brillouin backscattering energy fraction diagnosis systems on the main laser fusion devices do not measure the spatial distribution of stimulated Brillouin backscattering signals, which simplifies the diagnosis system but loses the detailed features of stimulated Brillouin backscattering signals. An angle-resolved full-aperture backscattering diagnosis system is developed for the Shenguang- II Upgrade (SG- II U) facility to study the SBS process in the integration experiment of the double-cone ignition (DCI) scheme. The evaluation reveals that the angular resolution of the system is about $\pm 2^\circ$, and the diagnostic accuracy of energy fraction is $\pm 15\%$.

Methods The design of the system is guided by the temporal characteristics of the backward reflection signals on the SG- II U facility. It is found that both SBS signals from the target and the third harmonic reflected light from the triple-frequency-conversion crystal (called laser signals in this work) propagate along the same direction but with a fixed time delay dependent on the geometry of the final optical assembly. The level of laser signals is proportional to the incident laser energy and is stable so that it can be used as a reference to infer the SBS energy fraction. An optical fiber array is designed to collect the angle-resolved signals reflected from the servo mirror of the SG- II U facility. Then, the signals are split into two beams and recorded with two intensified charge-coupled devices (ICCD) separately. The time delay between the two ICCDs is determined by that between SBS signals and laser signals. To make sure the ICCDs record accurate signal energy and verify the timing and intensity ratio between the SBS signals and laser signals, the temporal characteristics of the ICCDs gating process are tested, and the total signals are also recorded with a streak camera coupled with a spectrometer. Assuming that the level of laser signals is known, the SBS level can be inferred.

Results and Discussions In this experiment, the related experiments under a laser focusing distance of $100\ \mu\text{m}$, $125\ \mu\text{m}$, and $150\ \mu\text{m}$ from the crown are carried out to improve the laser-target energy coupling efficiency. Fig. 5(b) is the schematic diagram when the laser focusing distance is $100\ \mu\text{m}$. The distribution of stimulated Brillouin backscattering energy fraction under different laser focusing distances is investigated experimentally, and the related diagnostic results are shown in Fig. 7. For the cone target, when the laser focusing distance increases from $100\ \mu\text{m}$ to $150\ \mu\text{m}$, the distribution of stimulated Brillouin backscattering energy fraction changes significantly. It can be seen from Fig. 5 (b) that for the cone target, when the laser focusing position is different, the local incident angle of the laser relative to the target surface varies, which causes the change in the laser-target energy coupling efficiency and the change in the plasma state during the laser loading process. Eventually, the distribution of stimulated Brillouin backscattering energy fraction also changes. For the diagnosis system in this paper, the main error sources are ICCD gain fluctuation, ICCD trigger jitter, ICCD gating characteristics, and data calculation errors. These factors are related to the specific experimental conditions and experimental settings. The comprehensive evaluation shows that the diagnostic accuracy of this diagnosis system is $\pm 15\%$.

Conclusions The SG- II U facility is the main laser device for the research on the DCI scheme research at present. The first stage of the DCI scheme, quasi-isentropic compression, is completed by the 8-channel nanosecond beams. The laser plasma interaction process that occurs in this stage has a great influence on the compression effect. For the SG- II U facility, a compact and portable stimulated Brillouin backscattering diagnosis system is developed on the basis of the diagnosis principle of relative measurement. The system can diagnose the distribution of stimulated Brillouin backscattering energy fraction with an angular resolution of about $\pm 2^\circ$, and the diagnostic accuracy of energy fraction is $\pm 15\%$. The preliminary diagnostic results show that the distribution of stimulated Brillouin backscattering energy fraction depends heavily on the focal location of the laser pulse on the target surface. The research provides reliable experimental results for the further study of SBS in the DCI scheme.

Key words laser optics; double-cone ignition; stimulated Brillouin scattering; angle-resolved full-aperture backscattering diagnosis