

基于神光 III 主机的背向散射光诊断技术

王 峰¹ 彭晓世¹ 闫亚东² 徐 涛¹ 魏惠月¹ 理玉龙¹ 李 楠¹

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

²中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

摘要 开发了神光 III 主机装置上的背向散射诊断技术。采用非球面金属镜配空间滤波器的方式将倍频晶体返回的杂散光滤除, 采用矩形小孔将楔形打靶透镜带来的宽光谱色散影响消除, 采用大光斑配白光标定的方式获得整个背向散射系统的谱透射率, 最终可实现量化的背向散射光能量诊断。通过适当的光路设计, 可实现背向散射受激布里渊散射光(SBS)和受激拉曼散射光(SRS)的光谱和时间过程测量。通过已有的实验数据可知, 该技术已经初步具备了这方面的能力。

关键词 测量; 黑腔; 等离子体; 束匀滑; 背向散射; 光谱

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0902011

Backscattered Light Diagnostic Technique Based on Shen Guang-III Laser Facility

Wang Feng¹ Peng Xiaoshi¹ Yan Yadong² Xu Tao¹ Wei Huiyue¹ Li Yulong¹ Li Nan¹

¹Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

²Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract The backscattered light diagnostic technique has been developed on Shen Guang-III laser facility. After using three improvements, the backscattered light can be measured quantitatively. With the rectangle hole, the dispersion effect caused by the wedge lens can be removed. With the full aperture light and white light, the transmission of the backscattered diagnostic system can be obtained. After optimizing the diagnostic system, the spectrum and time process of stimulated Brillouin scattering (SBS) and stimulated Raman scattering (SRS) can be achieved. From the experimental data, the backscattered light diagnostic technique on Shen Guang-III laser facility has the primary ability to investigate the effect of laser and plasma interaction (LPI) and laser smooth technique.

Key words measurement; hohlraum; plasma; beam smooth; backscatter; spectrum

OCIS codes 120.4570; 120.4640; 120.4880; 120.4820

1 引 言

随着神光装置激光能量的增加, 激光与等离子体相互作用引起的黑腔内环和外环激光耦合效率不同的问题日益严重^[1-7]。这直接导致了黑腔内辐射场驱动的不对称性, 从而使后续的运输、内爆等物理过程失去了能够实现对称压缩的基础。另外, 现有激光装置上降低背向散射光份额的束匀滑措施, 如连续相位板技术(CPP)、光谱色散匀滑(SSD)以及极化匀滑(PS)等技术的实验效果也需要一个量化诊断手段。随着激光驱动装置规模的不断扩大, 打靶过程中等离子体对激光的背向散射可能越来越严重, 因此相关研究受到了高度关注^[1,4-5]。针对这两个方面的物理需求, 需要在神光 III 主机装置上建立一套量化诊断散射光的诊断系统。

神光 III 主机上的背向散射光诊断系统是对入射激光背向散射的能量、光谱及时间特性进行测量的系统, 分为全孔径背向散射诊断系统(FABS)和近背向散射诊断系统(NBI)两部分, 分别用于测量聚焦透镜范围

收稿日期: 2015-02-05; 收到修改稿日期: 2015-04-02

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金(2011B102020)

作者简介: 王 峰(1975—), 男, 博士, 研究员, 主要从事等离子体物理实验中光学诊断技术方面的研究。

E-mail: xiaozei7566@163.com

内(背向散射)和聚焦透镜附近(近背向散射)的背向散射光。受激布里渊散射[SBS,光谱范围为 (351 ± 3) nm]和受激拉曼散射[SRS,光谱范围为400~700 nm],降低了激光能量的吸收和激光等离子体的耦合效率,从而降低了辐射场的温度,最终影响腔靶内部辐射场的对称性,造成内爆驱动的不对称并直接影响内爆的效率。只有准确了解背向散射光的份额、光谱分布以及时间过程,才能对辐射场的对称性进行调控。这也是该诊断技术如此受重视的根本原因。

针对这些需求,在神光III原型装置上建立了一套背向散射光诊断系统,并且在CPP技术的验证实验中发挥了关键作用^[8]。针对神光III主机装置能量更高,打靶光路排布、打靶透镜、出光位置的变化,对背向散射光诊断技术进行了新的改进。在神光III主机装置上建立了一套背向散射光诊断系统,在腔靶、鼓形腔的研究中发挥了非常重要的作用。实验发现,该系统能够量化获得全孔径与近背向的散射光能量和光谱数据,为下一步改进该系统指出了研究方向。

2 神光III主机与神光III原型背向散射光诊断系统变化

从光学诊断角度来看,SBS光和SRS光的频率间隔比较大,所以可以利用这个特点对散射光进行频率分离,而后分别进行诊断。这也是SBS和SRS采用双路诊断设计的基础。能量、光谱、时间过程是整个背向散射光诊断的三个主要诊断量。在激光等离子体作用产生背反效应比较低的时候,散射光的能量是主要诊断量。而在背反效应比较明显的实验中,散射光能量、光谱、时间过程需要同时诊断。神光III主机上全孔径背向散射诊断系统与原型相比除了口径变得更大以外,主要有三个变化。

1) 取光位置改为III型镜后取光。由于主机装置需要在投射镜的位置安放变形镜,所以背向散射光的取光位置只能退后一步,改为III型镜后取光。其带来的问题主要是背向散射光要经过投射镜和III型镜的两次调制,从而引入能量和谱型的变化。取光位置改为III型镜后。全孔径背向散射诊断系统利用终端光学组件对从靶点散射的光进行收集,对收集的散射光进行色分离后再进行空间滤波和缩束,最后通过能量计和光谱仪等设备对SBS和SRS的散射光能量和光谱进行测量。

2) 打靶透镜更换为楔形透镜。由于实验打靶的需要,主机装置将打靶透镜改为大口径的楔形镜。这个透镜的使用可以从空间上避开基频和二倍频的杂散光对打靶过程的影响,可以使打靶环境比较干净。但是,由于使用楔形透镜会导致全孔径背向散射光在空间上的分离,所以对后续采集光路的分析和设计带来了新的问题,这在后文会详细分析。

3) 打靶光路增多,导致有一部分剩余打靶光束直接照射到了近背反的收光盘上。这个变化导致收光盘不能将杂散光与信号光进行时间、能量、光谱的分离,所以用神光III原型的思路不能直接进行诊断。

4) 标定光路的变化。由于神光III主机的靶球非常大,所以神光III原型上的标定光路已经不适合新的要求。需要根据通用诊断搭载平台(DIM)系统,设计新的标定光路系统。

前两个变化对全孔径背向散射光诊断系统的影响比较大,第三个变化主要影响近背向散射光诊断系统。第四个变化主要是量化方面的要求。本文将针对这些变化,比较详细地介绍神光III主机装置上的背向散射光诊断系统以及对应的标定光路。

3 神光III主机装置上的背向散射光诊断系统介绍

图1是神光III主机上单路背反系统总体布局示意图。全孔径背向散射光沿着原光路返回,从III型镜后输出后进入诊断包。近背向散射光被大口径金属反射镜反射后会聚到靶室外的诊断包内。

图2为主机全孔径背反的光路总体技术路线,光路中利用351 nm全反镜将散射光分两个支路分别进行测量,其基本思路与神光III原型装置的思路一致^[8]。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。在图2中,全孔径背反光经投射镜反射、III型镜透射后,经楔形镜 M_1 后通过长焦离轴抛物镜 M_2 反射后进行会聚,利用光学铰链结构 M_3 和 M_4 调整后通过二向色镜 BS_1 将背反光路分为SRS和SBS两个支路。然后通过空间滤波器1和空间滤波器2分别对SRS和SBS支路进行滤波,再通过透镜缩束后进入能量卡计1和能量卡计2进行记录。将终端光学组件小角度倾斜安装后,在SBS支路可通过空间选通滤掉晶体反射光。由于SRS谱较宽,SRS支路通过空间滤波可能不能完全滤掉二倍频杂散光。可通过窄带

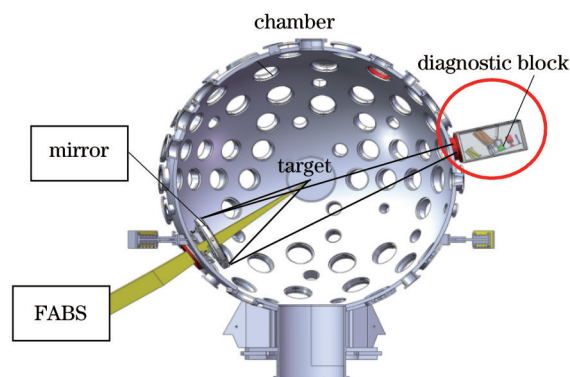


图1 神光III主机装置上单路背向散射诊断系统布局图

Fig.1 Diagram of backscattered light diagnostic system based on Shen Guang-III laser facility

(526 ± 3) nm 高反镜进行滤除,再在数据处理时根据SRS谱估算损失的能量。为测量背反光的空间分布及时间、光谱信息,在SRS和SBS两个支路中各添加两片取样镜BS₂/BS₃,BS₄/BS₅进行分光。通过快光电管1和快光电管2测量背反光的时间特性,通过谱仪配条纹相机(OMA+OSC)测量光谱的时间分布,通过光束分析相机得到背反光的空间分布(图2中未画出)。

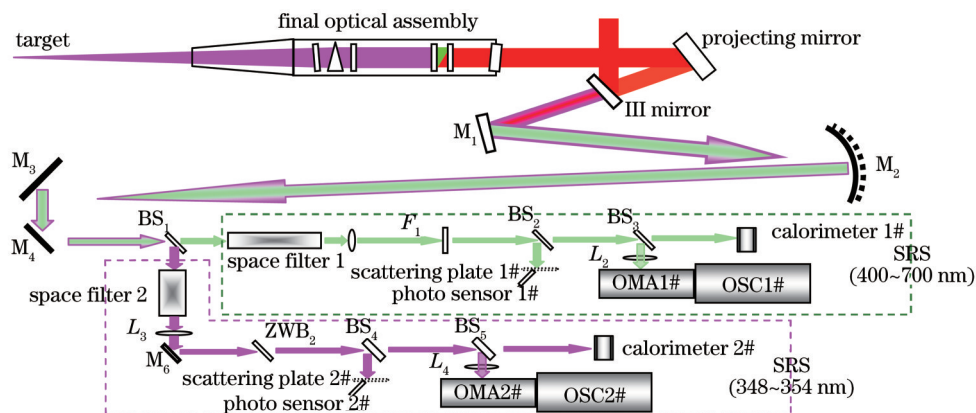


图2 神光III全孔径背向散射测量系统示意图

Fig.2 Full aperture backscatter measurement system based on Shen Guang-III laser facility

3.1 新系统设计的变化之一——光路与空间滤波器小孔的设计

图3为全孔径背反诊断平台中的光路排布。可以看到,主机诊断光路元件众多,比原型装置更为复杂,同时具有能量、光谱、时间过程的诊断能力。图3中镜头和镜片的标注为光路中的镜片和各种滤片:1:第四转折镜,2:二向色镜,3:长波空间滤波器,4:长波第一取样镜,5:长波近场测量镜头,6:长波准直镜,7:长波第二取样镜,8:长波光电管耦合镜,9:长波第三取样镜,10:长波光纤耦合镜,11:长波反射镜,12:长波能量计耦合镜,13:短波空间滤波器,14:二向色镜,15:短波准直镜,16:短波第一取样镜,17:短波光电管耦合镜,18:短波第二取样镜,19:短波光纤耦合镜,20:短波能量计耦合镜。

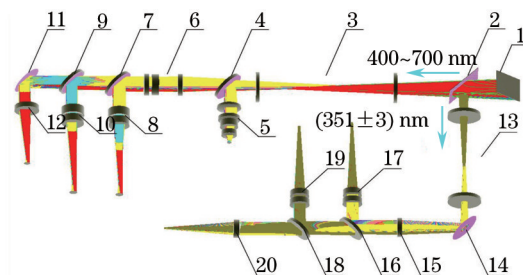


图3 全孔径背向散射光诊断包内光路排布图

Fig.3 Optical path diagram in diagnostic block of FABS

虽然整个神光 III 主机上的背向散射光诊断系统的设计思路与神光 III 原型装置相同。但是由于主机装置打靶透镜变成了楔形透镜,背向散射光中的 SBS 光和 SRS 光返回后在背反收集光路中的聚焦位置在轴向和径向都有比较明显的偏差,这就给光路中用于小孔滤波的小孔设计带来了新的问题。图 4 为空间滤波器小孔附近的光路图。可以看到,小孔附近的光斑聚焦位置非常不规则。351 nm 光的聚焦位置最先出现,700 nm 左右的光聚焦位置偏下,明显靠后。根据光束聚焦的情况,需要在光路的适当位置放置一个矩形的小孔。这个位置就是整个光束腰的位置。这样既可以达到让光束全部通过的目的,又可以最大限度地发挥小孔限光的作用。图 5 所示为空间滤波器前窗、小孔、后窗位置的光斑大小。可以看到,在选择的小孔处,光斑整体呈现矩形分布,可以采用大于 15 mm×6.5 mm 的小孔使信号光完全通过。在最后接近成像的位置放置能量卡计,就可以采集全孔径系统获得的能量。

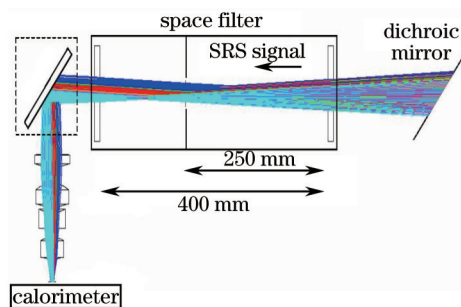


图 4 空间滤波器小孔附近光路分布

Fig.4 Optical path distribution near space filter

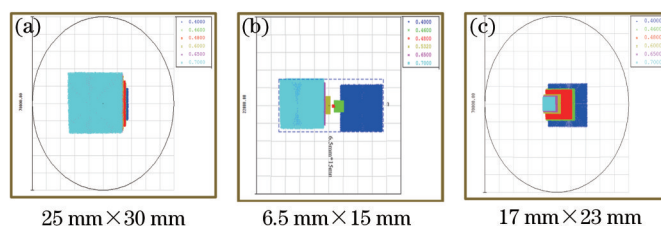


图 5 空间滤波器不同位置的光束分布。(a) 前窗光斑;(b) 小孔光斑;(c) 后窗光斑

Fig.5 Optical beam distribution at different positions of space filter. (a) In front of space filter; (b) at the rectangle hole; (c) at the end of space filter

这个小孔的设计对全孔径背向散射光诊断系统来说非常重要。如果按照神光 III 原型装置的方形小孔设计,会漏过大量的杂散光而导致诊断效率极低。如果矩形孔开得过大,也会漏过大量的杂散光。如果开得过小,又会导致诊断效率过低,带来很大的测量不确定度。与小孔设计对应的基本条件是金属离轴抛物镜的焦点尺寸非常小,基本上要达到小于 7 mm 的状态,这里的分析才是有意义的。目前国内的加工工艺水平还很难做到这个水平。实际加工出来的抛物镜焦点大小约为 8 mm(能量集中度大于 80%),勉强符合光路系统的要求。

3.2 新系统的变化之二——光谱采集系统变化

相对于神光 III 原型上能够同时采集 SBS 和 SRS 光谱的设计^[8],在主机上的系统很难同时采集 SRS 光和 SBS 光。主要原因是在聚焦位置,这两种光谱的光在空间上有明显的分离。如图 6 所示,分离的距离可以达到 6 mm。所以在用光纤系统采集背反光谱时会出现只能采集某一种光谱的状态。这是与神光 III 原型上的背向散射诊断系统采集光谱所不同的地方。采用的主要解决办法是用一个散射板将入射聚焦位置的光散开,如图 7 所示,使宽光谱的光重新分布,而后再经过一套聚焦系统采集散射光,最后用光纤、谱仪、条纹相机记录整个光谱。散射板的采集主要有反射式和透射式两种,透射式占用的空间较大,而且光学元件收集效率不高,所以采用了透射式采集的方式。

3.3 新系统的变化之三——带缺损的近背向散射系统收光盘设计

近背向散射诊断光学系统如图 8 所示。在图 8 中,从靶点 1 发出的近背向散射光穿过保护玻璃 2,环形椭圆球镜 3 收集打靶激光束周围的散射光后将其反射,而后穿过靶球上 $\phi 460$ mm 的玻璃窗 4,到达第一楔形镜

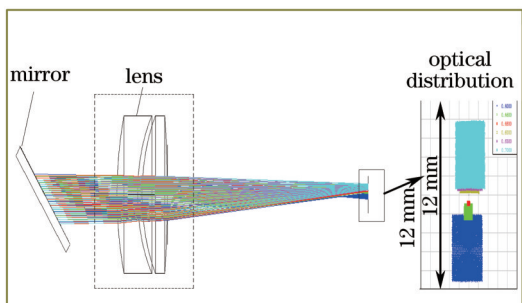


图6 光谱采集位置的光路

Fig.6 Optical path at spectrum measurement position

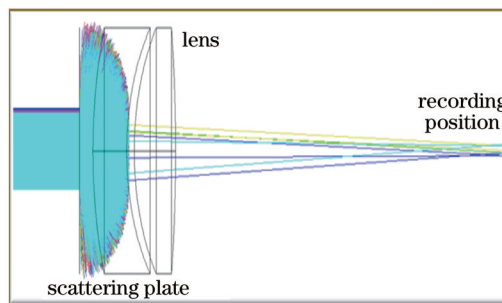


图7 加上散射板以后的信号光采集过程

Fig.7 Signal measurement after using scattering plate

5。被5的前表面反射后,到达第二楔形反射镜6。然后经负透镜7准直后,由二向色镜8将光分为SBS和SRS两个支路。图8中的9、10和11、12分别表示SRS记录系统的滤片、卡计和SBS记录系统的滤片、卡计。在两个支路中,散射光分别会聚成像;在像面之后,光束逐渐扩散,在合适位置放置能量计,分别记录两个支路的散射光能量。

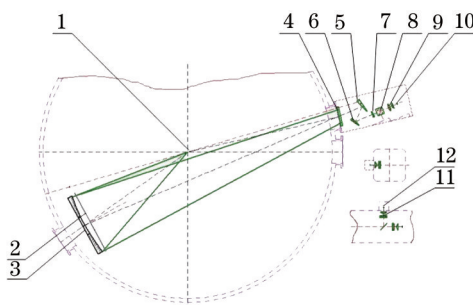


图8 近背反光路排布图

Fig.8 Optical path diagram of NBI

图9所示为近背向散射光收光盘与诊断包的设计。近背向散射诊断系统的收光盘设计采用四块拼接和轻镜技术,可以满足实验的需要。但是,由于主机打靶光路为48路,远远超出神光III原型8路的设计,每一路都存在一路分离角度很小的剩余基频和二倍频光,其强度达到1000 J以上,是不可忽视的直接杂散光。根据靶室内光路的排布,在设计A6S4路打靶光路上,存在两路杂散光。其落点位置如图9(a)中箭头所示。按照光路设计,这两路1000 J的杂散光与近背反的SRS、SBS同时间、同方向(在靶点处偏离很小)、同光谱(剩余二倍频与SRS同光谱),而且能量更强,可以直接将金属镜打坏。这些问题在神光III原型上并未出现。

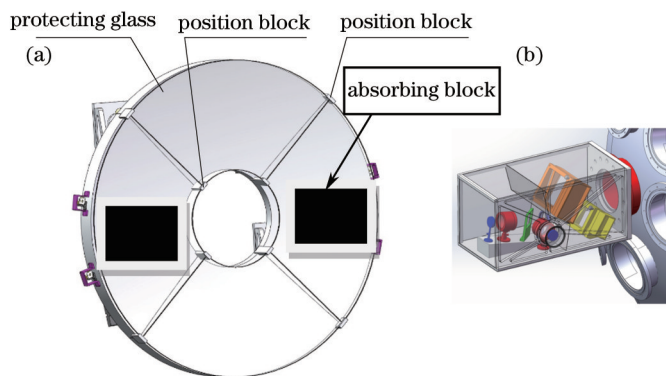


图9 (a) 近背反收光盘设计; (b) 诊断包设计

Fig.9 (a) Optical design of NBI collection plate; (b) diagnostic block design

如果仿照国家点火装置(NIF)的处理方式,将镜子挖空,就会使镜子的面型遭到很大的破坏,从而造成后续诊断失败。所以,基本的设计思路是在尽量不破坏原有镜子面型的前提下,用吸收杂散光的方法,降低剩余打靶光的影响。其实现思想是在金属镜的上面长出两个吸收体,而后在后续光路标定时将这个吸收体的影响标出,再代入不确定度分析中,完成量化分析。

4 标定系统——基于诊断搭载平台的在线标定系统

背向散射技术中有一个非常重要的技术内容,即整个记录系统透射率的量化标定技术。标定技术分为强度标定和光谱标定两大类。两者之间是相互耦合的。必须将强度标定的数据代入光谱透射率曲线中,才有可能获得比较准确的背反透射率数据。而在整个背向散射诊断系统中,基础的工作是创造一个从靶点出射并与打靶光束的 F 数相同的锥形光束。根据神光 III 原型标定的经验,这个光斑在出射光束的内切位置即可。

由于神光 III 主机的靶球直径非常大,采用神光 III 原型上的光路系统不能满足实验需要,必须研究新的标定思路。借助于专门为神光 III 主机研制的通用诊断搭载平台,在 DIM 上搭建一个能够对全孔径背向散射系统和近背向散射系统进行全光斑标定的光学系统。该系统可以在近背反、全孔径背反、不同偏振态之间切换,是一种比较有特色的技术。

图 10 所示为整个光学系统的基本框架图。整个标定光路由激光器、DIM、缩束系统、光束镜头组成。激光束输出的 $\phi 50\text{ mm}$ 从激光器输出以后通过一个 50 mm 转 10 mm 的缩束系统后,变成一个直径为 10 mm 的光束。这个光束通过一个反射镜进入两个可切换的镜头。这两个镜头可以将激光束变成 F 数为 2 和 11 的两个锥形光斑。 F 数为 11 的光斑直接从靶点穿过以后到达终端,从终端的后端输出,进入背向散射诊断系统。由于激光器可以切换两个偏振态,所以可以标出不同偏振态的透射率。针对需要的偏振态,按照一定的计算即可获得透射率数据。

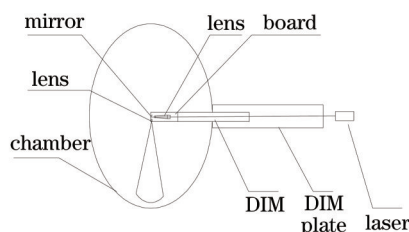


图 10 背反标定光路示意图

Fig.10 Diagram of backscatter system calibration

图 11 所示为 DIM 中光学部分的排布。图 12 所示为通过图 11 的镜头以后形成的两种标定光斑。环形光斑的 F 数为 2,用于近背反标定。细光束的光斑 F 数为 11,用于全孔径背反标定。为了模拟近背反测量光束的分布,将输出光斑做成一个环形光束,环形光束基本全部覆盖近背反的金属反射镜,通过金属反射镜会聚后,在靶室外诊断包的记录面处检测背向散射系统的透射率。对于吸收体带来的影响,可以将这部分按照面积对等的原则进行扣除。

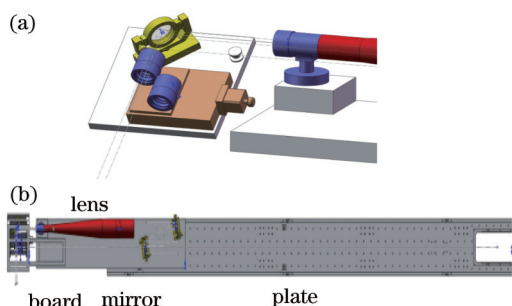


图 11 (a) 背反标定切换的镜头设计;
(b) DIM 内光路排布

Fig.11 (a) Switch design for backscatter system calibration;
(b) optical diagram in DIM

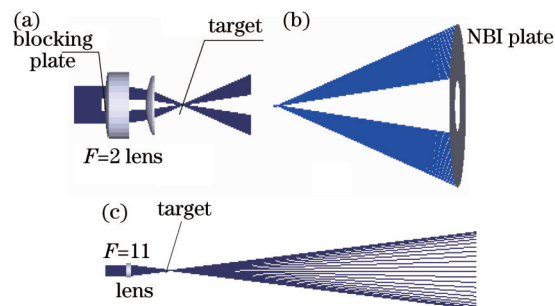


图 12 (a) 标定系统形成的近背反环形标定光束; (b) 大口径反射镜上的分布; (c) 标定系统形成的全孔径背向斑分布

Fig.12 (a) Optical ring of calibration system; (b) spot distribution on collection plate; (c) spot distribution for FABS

F 数为 11 的光束正好可以全部通过终端光学组件,进入全孔径背反诊断系统,从而在记录处获得全孔径背反的单波长透射率。通过激光器调整输入光的波长,获得 SBS 光在 351 nm 的透射率和 SRS 光在 527 nm 的透射率。结合白光标定的结果,就可以获得 SRS 光的全波段透射率。在实际实验中要将 SRS 谱与 527 nm 的单波长透射率相结合,才能获得真实的 SRS 光份额。

5 初步实验结果介绍

完成主机装置上单路背向散射光系统的研制以后,开展了一轮束匀滑技术效果的对比实验。基本实验条件如下:单束激光能量为2.5 kJ,三倍频,32束打靶,注入孔直径为1.6 mm。实验结果如下:1)在不使用CPP和SSD的前提下,充气腔的背向散射光份额达到了40%~50%,与神光III原型接近;2)在单独使用CPP匀滑的条件下,充气腔的背向散射光份额达到了14%~18%,表明CPP技术非常有效;3)在使用CPP+SSD匀滑措施的情况下,充气腔的背向散射光份额为10%~13%,说明现有的SSD技术抑制激光等离子体相互作用的能力还不明显;4)在使用鼓型腔,模拟NIF装置上小角度入射的条件下,背向散射光的份额比大角度打靶明显高出很多。这些实验数据充分说明了该系统已经在神光III主机装置上可靠、稳定地运行。

6 结 论

针对判断束匀滑效果和研究不同靶型激光注入黑腔效率的需要,研制了一套基于神光III主机装置的背向散射光诊断系统。针对主机终端光学组件与原型装置的变化,着重介绍了全孔径背向散射诊断中空间滤波器设计和散射光谱设计方面的变化。空间滤波器将改为长条形的矩形结构,以达到将宽谱SRS光全部采集的目的。光谱采集部分采用散射板匀滑后采光的方式,从而可以将SBS光和SRS光的宽谱光全部收集。近背向散射光的光路设计与神光III原型相同,也是将靶点设计为金属椭球镜的一个焦点,将另一个焦点设计为室外的能量收集点,收光立体角达到35°,从而可以完成收集侧向散射光的目的。由于加入吸收体,近背向散射光的诊断增加了不确定因素。

标定系统是背向散射诊断系统的核心部分,其量化数据的获取全部依赖标定系统获得的数据。针对神光III主机靶室的特点,专门设计了基于通用诊断搭载平台的大光斑标定系统。利用两个透镜组的切换,获得 F 数为2和11的近背反和全孔径背反光诊断系统的标定光束。通过量化的标定,可以获得SBS和SRS上的能量。

这套背向散射光诊断系统的研制成功,为后续神光III主机上建设8套背向散射光诊断系统奠定了基础。同时,利用这套系统也取得了充气腔和鼓形腔等不同靶型的大量数据,从而为理解神光III主机装置上的激光与等离子体相互作用过程提供了宝贵的数据。

参 考 文 献

- 1 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 Plasmas*, 2004, 11(2): 339-391.
- 2 C F Juan, S B Bruno, A C James, *et al.*. Measurements of laser-plasma instability relevant to ignition hohlraums[J]. *Phys Plasmas*, 1997, 4(5): 1849-1856.
- 3 R M Stevenson, L J Suter, K Oades, *et al.*. Effects of plasma composition on backscatter, hot electron production, and propagation in under dense plasmas[J]. *Phys Plasmas*, 2004, 11(5): 2709-2715.
- 4 Wang Chuanke, Jiang Xiaohua, Wang Zhebin, *et al.*. Full-aperture backscatter station on Shenguang- II Laser Facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(8): 1896-1900.
王传珂, 蒋小华, 王哲斌, 等. 神光II激光装置的全孔径背向散射测量系统[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(8): 1896-1900.
- 5 B J MacGowan, B B Afeyan, C A Back, *et al.*. Laser-plasma interactions in ignition-scale hohlraum plasmas[J]. *Phys Plasmas*, 1996, 3(5): 2029-2040.
- 6 Wang Chuanke, 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.
- 7 Wang Chuanke, Yang Zhenghua, Liu Shenye, *et al.*. Design of near backscattering diagnosing system on Shenguang- III prototype[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2008, 28(5): 888-890.
王传珂, 杨正华, 刘慎业, 等. 基于神光III原型装置的近背向散射诊断系统设计[J]. *核电子学与探测技术*, 2008, 28(5): 888-890.
- 8 Wang Feng, Peng Xiaoshi, Yang Dong, *et al.*. Backscattered light diagnostic technique on Shen Guang-III prototype laser facility[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(17): 175202.
王 峰, 彭晓世, 杨 冬, 等. 基于神光III原型的背向散射实验技术研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(17): 175202.

栏目编辑: 吴秀娟