

文章编号 1004-924X(2014)12-3191-08

全孔径背向散射诊断光学系统

闫亚东^{1*}, 何俊华¹, 王峰², 张敏¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西西安 710119;

2. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900)

摘要: 基于新的激光聚变驱动装置的需要, 设计了全孔径背向散射诊断光学系统并介绍了光学设计中涉及的若干关键技术。采用低反射率的楔形反射镜衰减背向散射光能量, 降低后继元件对光学薄膜损伤阈值的要求。通过缩束镜缩小光束口径, 减小光学元件尺寸; 同时采取折叠光路结构来缩小系统体积。对空间滤波器和光学滤片进行组合, 屏蔽了打靶倍频光干扰及不同散射类型的相互串扰。采用光学白板对色散严重的背向散射光进行漫反射匀化, 使光谱测量系统获得完整的光谱信息。最后, 选取抛物面为空间分布成像目标面, 通过分析空间分布成像光束的结构设计了成像镜头。设计的诊断光学系统具有散射时间测量、光谱测量、空间分布成像、能量测量等功能, 光学测量模块尺寸为 1.9 m×0.9 m×1.5 m。该全孔径背向散射诊断光学系统在新的激光聚变驱动装置中具有潜在的应用价值。

关键词: 激光聚变; 激光等离子体; 全孔径背向散射; 背向散射诊断; 抛物镜; 光谱取样

中图分类号: TL632.1; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142212.3191

Optical system for full aperture backscatter diagnosis

YAN Ya-dong^{1*}, HE Jun-hua¹, WANG Feng², ZHANG Min¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

* Corresponding author, E-mail: yyd@opt.ac.cn

Abstract: An optical system for full aperture backscatter diagnose was designed for a novel inertial confinement fusion facility. Several key technologies about optical design were discussed. A wedge mirror with low reflectance was used to attenuate the backscatter lights before diagnosis, so the films of optical elements in the diagnostic system were survived after many shots. A telescope optical system was used to reduce the sizes of the beam as well as the sizes of the optical elements, meanwhile the optical path was folded several times by mirrors to shrink the volume of the whole system. The space filter, dichroic filter, optical filters and colored glasses were combined to simultaneously eliminate the stray light. Moreover, a scatter plate was taken to average the signals to ensure the fiber coupler to obtain needed signals including all wavelengths studied. Based on the analysis of imaging beam structures, a lens was designed for the imaging of parabolic mirror, and a camera was used to record the space distribution of scattered lights on the surface of parabolic mirror. The diagnosis system was

收稿日期: 2014-03-13; 修订日期: 2014-04-07.

基金项目: 国家教育部(西部)博士点基金资助项目(No. 200929441213)

designed to provide measurements for scattering time, scattering spectrum, near-field imaging, and scattered energy and its whole sizes are 1.9 m×0.9 m×1.5 m. The full aperture backscatter system designed in this paper has potential applications to the new inertial confinement fusion facility.

Key words: laser fusion; laser plasma; full aperture backscatter; backscatter diagnosis; parabolic mirror; spectrum sampling

1 引言

在激光间接驱动聚变中,高能激光脉冲与黑腔耦合产生 X 射线及等离子体,利用 X 射线驱动燃料实现聚变。然而,在耦合过程中等离子体与入射激光相互作用并产生散射,降低了激光的耦合效率,出现了等离子体“堵口”现象^[1-2]。散射在黑腔外主要表现为背向散射^[3],中心散射光沿打靶光路逆向传输,称为“全孔径背向散射光”;中心圆周的散射光称为“近背向散射光”。背向散射光的诊断包括全孔径背向散射诊断和近背向散射诊断,它为研究激光-等离子体相互作用提供了一种技术途径。

背向散射诊断需要测量时间特性、时间分辨的光谱特性、散射能量、散射空间分布等散射光参数,但是这些参数的测量是非常困难的。其原因在于:(1)全孔径背向散射光路与打靶光路重合,必须设法分离。(2)终端光学组件表面反射的打靶倍频光会混入背向散射光路,对参数测量干扰较大。(3)楔形打靶透镜使背向散射光产生大量的色差,从而增大了光纤光谱取样及空间分布成像镜头的设计难度。

在美国国家点火设施(National Ignition Facility, NIF)装置上,全孔径背向散射光透过终端光学组件后,从一块镀有分束膜的传输反射镜分离出来;但受宽光谱分束膜光谱均匀性的限制,在光谱测量之前需要标定系统。在打靶倍频光过滤方面,在测量光路中采用 P(S) 偏振片、滤波片及增强型电荷耦合器件(ICCD)组合来过滤杂散光的干扰,但这种方案并不能完全滤除打靶倍频光,而且对信号光的衰减较大,成本也较高。进行光谱测量时,散射光受楔形打靶透镜的影响会产生色分离致使取样光纤无法获取全谱信息。为了解决这个问题,NIF 装置采用了透射式散射板对光谱进行散射匀化^[4-6],以保证全谱取样。国内先后基于基频光(1 053 nm)、二倍频光、三倍频光对打靶散射光进行了深入研究,在散射的机理、类型、

光谱、空间分布等方面取得了大量的研究成果^[7-9],并基于各个激光聚变驱动装置建立了一系列背向散射诊断系统^[10-13],获得了大量的实验数据,为激光-等离子体相互作用的研究提供了有力的理论支撑和实验保证。

本文基于新的激光聚变驱动装置的需要,设计了全孔径背向散射诊断光学系统。该系统中的散射光从打靶光路的Ⅲ型镜分离,以便于诊断。诊断前采用开普勒缩束系统缩小光束口径,减小诊断光路体积,并在缩束系统焦面处设计小孔滤波,彻底滤除打靶倍频光。进行光谱测量时,采用反射式光学白板对散射光进行漫反射匀化,由于光学白板反射率高、匀化效果好,因此取样光纤能够获得全谱段信息。光学系统采用多层折叠设计,满足了全孔径背向散射诊断的功能及体积要求。

2 全孔径背向散射诊断需求

该激光聚变驱动装置拥有 48 束打靶激光^[14],它们以不同的角度入射黑腔,以实现燃料的均匀压缩。不同角度的打靶激光的背向散射情况不同,本系统针对纬度为 125° 的一束打靶激光(如图 1 所示)进行设计。全孔径背向散射光充满终端光学组件口径后,沿打靶光路逆向传输,经打靶光路中最后一个反射镜反射后,从Ⅲ型镜分

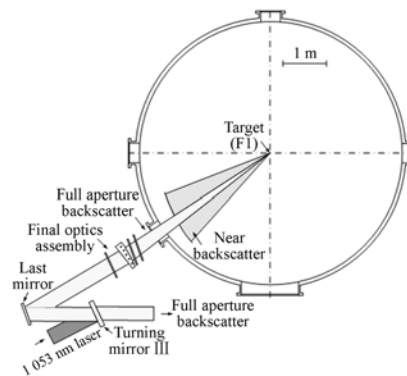


图 1 背向散射光空间分布

Fig. 1 Space distribution of backscatter light

离。诊断需求是收集分离后的散射光,依据散射光谱对不同类型的散射(拉曼散射 400~700 nm、布里渊散射(351±3) nm)进行光谱分离,然后分别多次取样,进行散射时间、散射光谱、空间分布、能量等的测量。

3 光学系统设计

全孔径背向散射光的口径大(400 mm×400 mm)、散射能量上限高(600 J)、色散严重、干扰强(终端反射的打靶倍频光)、空间有限,因此诊断光学系统的设计难度大,光路复杂。这里首先介绍了总体光路结构,然后从散射光的缩束、干扰光的屏蔽、光路体积控制、全谱段取样等几个方面对光学系统的设计方法进行了论述。

3.1 诊断总体光路结构

如图 2 所示,诊断系统总体光路由第一楔形反射镜和光学测量模块两部分组成。散射光从 III

型镜分离后,经过第一楔形镜的衰减及折转进入光学测量模块。光学测量模块分为上、中、下 3 层:下层为 $\Phi 650$ mm 的离轴抛物镜,用于收集、会聚散射光;中层为光路折叠反射镜组;上层为散射光分束测量光路。在上层光路中,会聚光束由二向色镜进行光谱分离,反射光为布里渊散射(351±3)nm,透射光为拉曼散射(400~700 nm)。在反射光路中,光束经真空滤波器滤除打靶倍频光;然后由另一块二向色镜将光束折转并再次透射衰减拉曼散射成分;用准直镜将布里渊散射光准直,ZWB2 有色玻璃将剩余的拉曼散射光大幅衰减。准直光束被三次取样:第一次取样耦合入快光电管,用于测量散射时间;第二次取样经散射板匀化后耦合入光纤,用光谱仪和条纹相机进行时间分辨的光谱测量;第三次取样耦合入 CCD 靶面,进行散射空间分布的测量;剩余能量耦合入能量计,进行散射能量测量。透射光路的功能与反射光路相同,这里不再赘述。

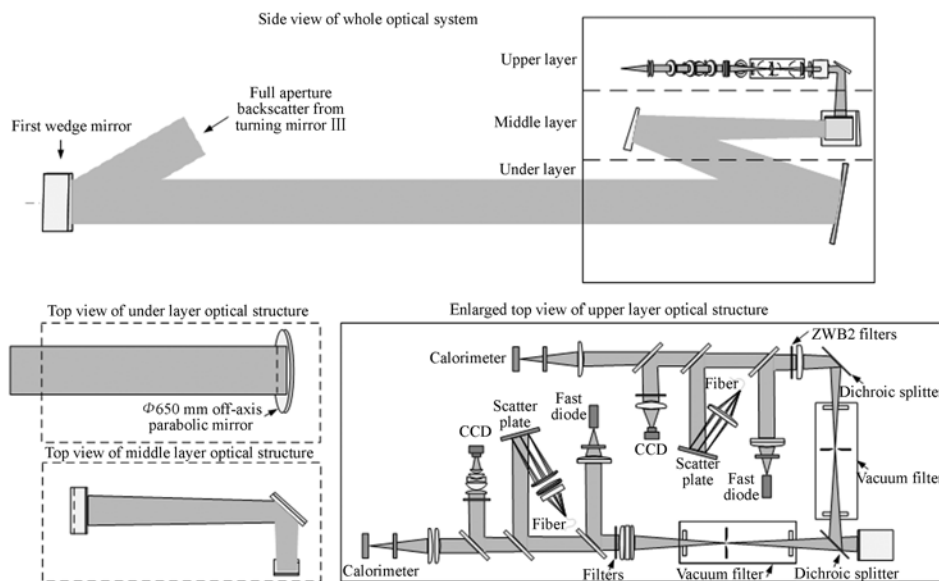


图 2 全孔径背向散射诊断光学系统示意图

Fig. 2 Scheme of full aperture backscatter measurement system

3.2 散射光缩束光学系统设计

散射光束口径对光学元件口径及系统体积的影响较大,而通过缩束可以减小光学元件口径和系统体积。常用的缩束光学系统有开普勒式和伽利略式,前者无实焦点,后者有实焦点。在高能系统中,实焦点处的能量密度较大,容易产生空气击穿现象;因此本系统采用开普勒式缩束结构,在其

焦面处采取小孔滤波滤除打靶倍频光的干扰。缩束系统包括会聚镜和准直镜。其中会聚镜的设计具有特殊性:首先,散射光口径大、光谱宽,若会聚镜采用透射式,则消色差镜头的结构复杂、制作难度大、成本高,因此会聚镜采用反射式;其次,同轴反射镜的反射光路与入射光路重叠,后继元件会引起光路遮挡,故反射镜只能采用离轴式;再次,

因大口径、宽光谱的介质反射膜制作难度较大,反射镜的反射膜采用金属反射膜(铝膜);最后,铝膜的损伤阈值较低,散射光在入射铝膜之前,必须经过衰减。

反射镜的面型设计为离轴抛物镜,与 NIF 装置的球面聚焦镜相比,抛物镜对散射光具有更佳的聚焦效果。离轴抛物镜的参数主要包括对应抛物线方程、离轴角和口径 3 个参数。根据应用需求,抛物镜的焦距需足够大,这样当倍频光和散射光以一定的角度差入射抛物镜,在焦面上二者会产生足够的径向分离,利于实施小孔滤波。当抛物镜的焦距 $|O_1F| = 5 \text{ m}$ 时,4 mrad 的角度偏离会产生 20 mm 的焦斑分离。同时,离轴角要适中,既能使反射光束快速与入射光束分离,又不至于大幅增加抛物镜口径。图 3 所示光路中,离轴角 β 为 20° 。根据几何关系计算抛物镜式(1)中的参数 P 为 9 699。镜面口径主要由入射光斑的尺寸而定,由于受楔形打靶透镜及 III 型镜的色散影响,镜面处光斑不再呈正方形,光斑约为 $430 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$,其对角线约为 622 mm。考虑到圆形镜面更易于制作,将抛物镜口径设计为 $\Phi 650 \text{ mm}$ 。

$$y_2 = 2Px. \quad (1)$$

镜体选材至关重要,常用的光学反射镜材料有光学玻璃、陶瓷材料、金属等。光学玻璃是最常用的反射镜材料,广泛应用于超大型反射镜中^[15-16];但玻璃材料的轻量化加工困难,大口径元件因需求量小,一般从材料开始就需要特殊定制,因而研制成本较高。陶瓷材料的稳定性好,成型方便,在空间相机领域也有重大应用^[17-19],但目前陶瓷材料的制作成本仍较高。金属材料尤其是超

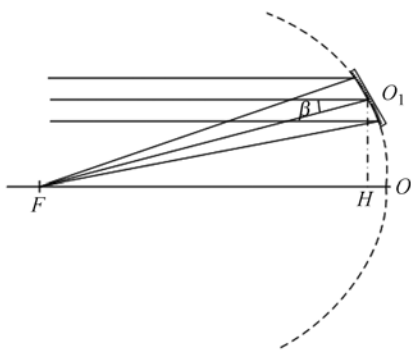


图 3 抛物镜参数示意图

Fig. 3 Scheme of parabolic parameters

硬的铝合金材料重量轻、机械加工性好、成本低;但其热膨胀系数大、易变形,表面必须采取特殊的硬化处理才能抛光成镜面。综合考虑当前的技术水平和工作环境,镜体采用超硬铝。首先因为系统的工作环境为恒温 20°C ,对铝的热膨胀影响小;其次铝为非磁性材料,辐射后无残留;最后铝镜重量轻,安装方便。研制中,由于镜片成型后材料容易产生应力变形,采取时效处理、过程面形监测等措施规避应力形变。如图 4 所示,金属抛物镜呈平凹状,镜体最大边缘厚度为 43 mm,背面采用减重槽设计^[20-21],在轻量化的同时具有较好的结构稳定性。

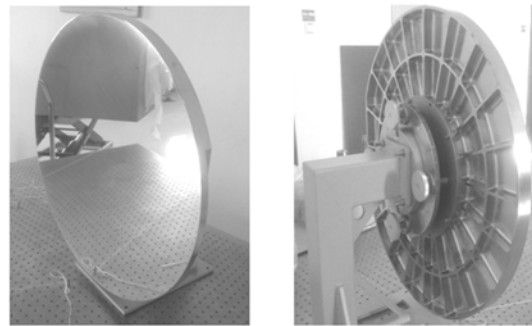


图 4 金属离轴抛物镜实物照片

Fig. 4 Pictures of metal off-axis parabolic mirror

缩束系统的等效结构如图 5 所示,散射光经抛物镜会聚,在焦点前用二向色镜进行光谱分离:反射短波,透射长波。在会聚焦点处设计真空室,焦面设置滤波小孔,分别用准直镜准直真空室的出射光束,实现散射光缩束。

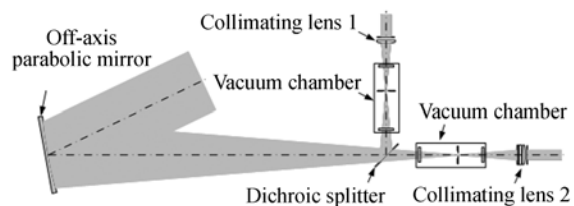


图 5 缩束光学系统结构

Fig. 5 Structure of beam contracting system

3.2 干扰光屏蔽

系统的干扰光主要有两个来源:终端光学组件反射的打靶倍频光干扰和两种散射光相互之间的干扰。

打靶倍频光是经终端光学组件反射的倍频激光。若终端光学组件不倾斜安装,则经其反射的

光逆着入射光返回,与散射光同光路,干扰散射光的测量结果。若将终端光学组件整体小角度倾斜安装,则反射光就会偏离入射光路,与背向散射光之间产生一个小角度偏离。当二者同时入射如图 5 所示的抛物镜后,会聚光在抛物镜焦面上产生径向分离,利用焦面上的小孔可以滤除倍频光。

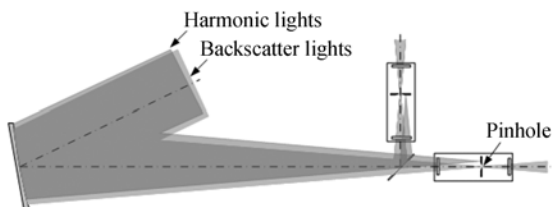


图 5 倍频光的过滤原理

Fig. 5 Principle of filtering harmonic lights

两种散射光之间的干扰主要由使用的 Semrock 二向色镜的光学薄膜不够理想(见图 6),经其反射的布里渊散射光中混入了拉曼散射光的成分所致。其解决措施为:在短波支路中再次应用二向色镜,对散射光进行二次分离;同时,在光路中加入有色玻璃滤片,该滤片每毫米对 (351 ± 3) nm 波段的光的透过率高达 92%,对 400~700 nm 波段的光的透过率小于千分之一。总体来说,经过两次二向色镜和有色玻璃滤片后,拉曼散射干扰光的衰减比大于 $10^5 : 1$ 。

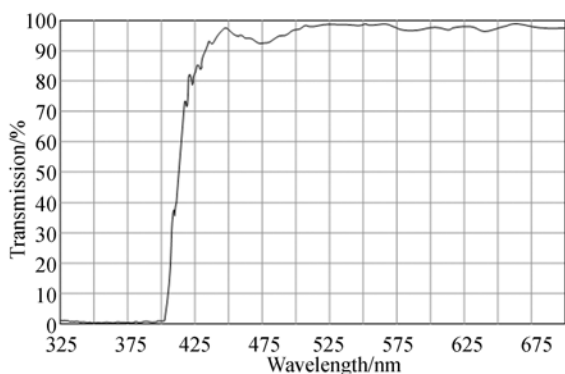


图 6 二向色镜的光谱曲线

Fig. 6 Spectral curve of dichroic splitter

3.3 光路体积控制

因可用空间有限,必须严格控制诊断光路体积。在图 2 所示的光路中,采用光路折叠反射镜将光学测量模块的光路折叠。折叠后,光路呈上、中、下三层。同时,通过控制光路折叠反射镜的反射率,使光能量衰减,进而控制进入探测器的能量。

3.4 全光谱取样

光谱测量时,必须注意的问题是光谱取样的完整性。在图 2 中,若第二次取样光束直接进入光纤耦合镜,则光纤得不到完整的光谱信息。因为散射光经过楔形打靶透镜和 45° III 型镜后(见图 1)产生了大量色散,不同波长的散射光之间具有一个微小的角度差异,经过光纤耦合镜会聚后,各个波长的光的会聚点在轴向、径向上都是分离的,采样光纤无法取得全谱信息,如图 7 所示。

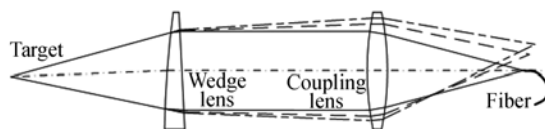


图 7 打靶光路对背向散射光的色散示意图

Fig. 7 Scheme of chromatic dispersion caused by optical line

为了实现全光谱取样测量,图 2 光路中采用光学白板作为散射板,近似准直的散射光斜入射到散射板上,其上的每一点都将入射光向各个方向散射。当用光纤耦合镜取样时,散射方向相同的光线会聚于耦合镜焦面上的同一点,从而取样光纤获得全谱信息。

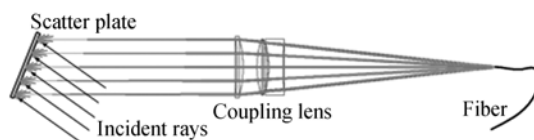


图 8 全光谱取样光学系统

Fig. 8 Optical system of all spectral sampling

在耦合镜设计时,采用有限距离倾斜目标的物方远心光路,物方数值孔径应满足像高 $100 \mu\text{m}$ 的要求(与光纤直径匹配),透镜口径与入射散射板的光束口径相当,透镜焦距满足像空间数值孔径与光纤数值孔径匹配的要求。图 8 为使用光学设计软件 ZEMAX2012 设计的拉曼散射支路的光纤耦合镜结构,软件模拟的某一方向散射光经镜头成像的点列图如图 9 所示。因为采用有限距离物方远心光路设计,点列图中的衍射艾利斑不具有实质意义。由图 9 可见,各个波长的散射光的聚焦情况较好,80 mm 散射板上各点的像点几何光斑最大约为 $67.4 \mu\text{m}$ 。

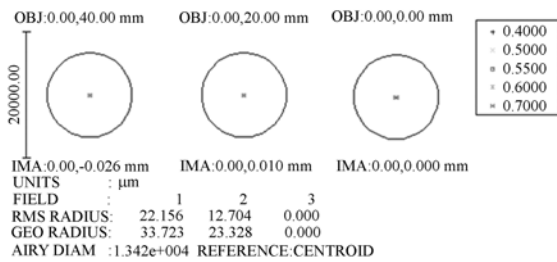


图 9 拉曼散射耦合镜点列图

Fig. 9 Spot diagram of Raman scattering coupling lens

布里渊支路的光谱耦合镜与此类似,其光谱范围更窄,耦合镜更为简单,这里不再详述。

3.5 空间分布测量镜头设计

图 2 中,第三次取样光束用于空间分布测量,即采用成像镜头将散射光的空间分布信息成像到 CCD 靶面上。成像镜头设计之前,首先要明确目标特性。因散射光被平面反射镜反射到抛物镜上,抛物镜上的空间分布信息与全孔径背向散射光的空间分布信息是一致的,故抛物镜面可以作为成像物面。接收器件为 CCD,靶面为 $2/3''$ 。此成像镜头的设计特点为:(1)抛物镜面是一个特殊的倾斜物面,可用于系统成像的光线只有抛物镜会聚的散射光线;(2)对镜面上的每一点来说,经其反射的光线方向性极强,即该点的成像光束口

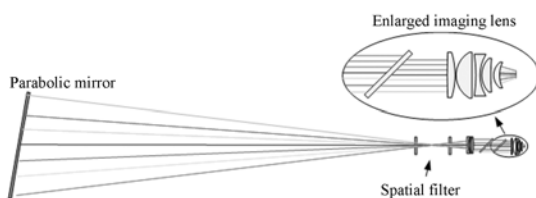


图 10 拉曼散射空间分布成像的等效光路

Fig. 10 Equivalent space distribution imaging system for Raman scattering

参考文献:

- [1] 许琰,赖东显,冯庭桂,等. 黑腔诊断堵口现象的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(2): 173-176. XU Y, LAI D X, FENG T G, et al.. A model to study the transmissivity of diagnostic holes on hohlraum[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(2): 173-176. (in Chinese)
- [2] 郑志坚,陈家斌,丁永坤,等. 强激光斜入射半腔靶能量注入率测量[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12

径极小;(3)抛物镜上各点的反射光线必须经过空间滤波器的滤波小孔,因此小孔位置即为系统的光阑位置。用 ZEMAX2012 设计的空间分布成像的等效光路如图 10 所示,物面为高 450 mm、宽 430 mm 的长方形离轴抛物面,像高为 5.4 mm,以此可保证整个光斑位于 CCD 靶面之内(见图 11)。

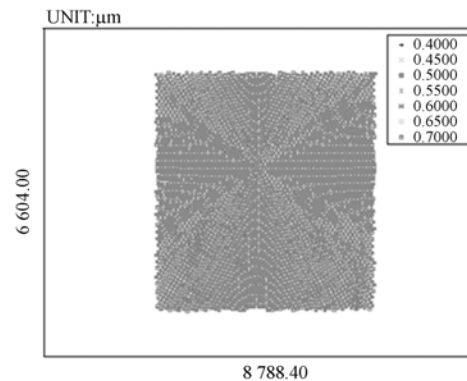


图 11 靶面光斑形状

Fig. 11 Light pattern on image plane

4 结 论

全孔径背向散射诊断的难度和复杂程度都较大,本文基于新的全孔径背向散射诊断需求设计了诊断光学系统设计,解决了设计中若干关键技术问题。缩束系统中采用金属抛物镜,聚焦效果好、成本低;真空滤波器和光学滤片组合方案达到了较好的干扰光屏蔽效果;折叠光路大幅缩小了系统体积;通过采用光学白板进行光谱匀化,获得了完整的散射光谱信息。本文设计的全孔径背向散射诊断光学系统结构紧凑,测量参数比较全面,在新的激光聚变驱动装置中具有较好的应用前景。

(1): 43-47.

ZHENG ZH J, CHEN J B, DING Y K, et al.. The laser energy injection efficiency measurement for the half-cavity target[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(1): 43-47. (in Chinese)

- [3] 况龙钰,王传珂,王哲斌,等. 527 nm 激光辐照盘受激布里渊散射光角分布[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(3): 413-416.

KUANG L Y, WANG CH K, WANG ZH B, et al.. Angular distribution of stimulated Brillouin

- scattering from interaction of 527 nm laser with Au and Al disk targets[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(3):413-416. (in Chinese)
- [4] KIRKWOOD R K, MCCARVILLE T, FROULA D H, *et al.*. Calibration of initial measurements from the full aperture backscatter system on the National Ignition Facility[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, 75(10):4174-4176.
- [5] BOWER D E, MCCARVILLE T J, ALVAREZ S S, *et al.*. Full aperture backscatter station measurement system on the National Ignition Facility[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, 75(10):4177-4179.
- [6] MOODY J D, DATTE P, KRAUTER K, *et al.*. Backscatter measurements for NIF ignition targets[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, 81(10):921.1-921.6.
- [7] 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.
- WANG CH K, JIANG X H, LIU SH Y, *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. (in Chinese)
- [8] 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.
- WANG CH K, 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. (in Chinese)
- [9] 赵学峰, 王传珂, 况龙钰, 等. 环状 PIN 阵列测量全口径背向散射光空间分布的实验研究[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2011, 31(1):43-47.
- ZHAO X F, WANG CH K, KUANG L Y, *et al.*. The experimental method of measurement for spatial distribution of full aperture backscatter light by circular PIN-array[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2011, 31(1):43-47. (in Chinese)
- [10] 焦春晔, 王峰, 蒋小华, 等. 神光 III 原型的全孔径背向散射诊断系统[J]. *核电子学与探测技术*, 2011, 31(3):306-311.
- JIAO CH 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. (in Chinese)
- [11] 杨正华. 近背向散射与全孔径背向散射测量系统的研制[D]. 重庆:重庆大学, 2008.
- YANG ZH H. *The study of near backscatter and full-aperture backscatter measurement system* [D]. Chongqing: Chongqing university, 2008. (in Chinese)
- [12] 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 CH K, JIANG X H, WANG ZH B, *et al.*. Full-aperture backscatter station on Shenguang-II laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(8):1896-1900. (in Chinese)
- [13] 魏慧月, 彭晓世, 徐涛, 等. 神光 III 原型装置的全孔径背向散射诊断技术[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(12):2273-2277.
- WEI H Y, PENG X SH, XU T, *et al.*. Full aperture backscatter diagnostic system on Shenguang-III prototype laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(12):2273-2277. (in Chinese)
- [14] 王美聪, 陈刚, 黄湛, 等. 神光 III 主机装置编组站稳定性设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11):2664-2670.
- WANG M C, CHEN G, HUANG ZH, *et al.*. Stability design of switchyard in SG-III facility[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11):2664-2670. (in Chinese)
- [15] 宋家宝, 李国平. 大型光学望远镜扇形子镜拼接设计及仿真分析[J]. *天文研究与技术*, 2010, 7(4):355-361.
- SONG J B, LI G P. Design and simulation of splicing of sector-shaped segments of a large optical telescope[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2010, 7(4):355-361. (in Chinese)
- [16] 张容, 韩建军, 臧友竹, 等. 大型太阳模拟器拼接准直镜技术[J]. *航天器环境工程*, 2005, 22(1):50-56.
- ZHANG R, HAN J J, ZANG Y ZH, *et al.*. Technology of segmented collimating mirror in a large solar simulator[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2005, 22(1):50-56. (in Chinese)
- [17] 杨秉新. 空间相机用碳化硅(SiC)反射镜的研究[J]. *航天返回与遥感*, 2003, 24(1):15-18.
- YANG B X. Research of SiC reflection mirror for

- space camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*. 2003,24(1):15-18. (in Chinese)
- [18] 王贵林,李圣怡,戴一帆. 空间相机 SiC 反射镜的制作[J]. *机械工程材料*,2002,26(8):37-38.
WANG G L, LI SH Y, DAI Y F. Fabrication of SiC mirrors applied to space camera[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2002,26(8):37-38. (in Chinese)
- [19] 张学军,李志来,张忠玉. 基于 SiC 材料的空间相机非球面反射镜结构设计[J]. *红外与激光工程*, 2007,36(5):577-582.
ZHANG X J, LI ZH L, ZHANG ZH Y. Space telescope aspherical mirror structure design based on SiC material[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007,36(5):577-582. (in Chinese)
- [20] 陈伟,丁亚林,惠守文,等. 碳化硅扫描反射镜支撑结构设计[J]. *中国光学*,2012,5(2):161-166.
CHEN W, DING Y L, HUI SH W, *et al.*. Design of kinematic mount for SiC scanning reflective mirror[J]. *Chinese Optics*, 2012,5(2):161-166. (in Chinese)
- [21] 徐新行,王兵,乔健,等. 快反系统中平面反射镜的轻量化设计[J]. *中国光学*,2012,5(1):35-41.
XU X H, WANG B, QIAO J, *et al.*. Lightweight design of mirror in fast-steering mirror system[J]. *Chinese Optics*, 2012,5(1):35-41. (in Chinese)

作者简介:



闫亚东(1979—),男,河南周口人,副研究员,2008年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事强激光精密诊断与应用技术的研究。
E-mail:yyd@opt.ac.cn



何俊华(1968—),男,江西人,研究员,博士生导师,1998年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得硕士学位,主要从事水下光电成像与探测技术,强激光精密诊断与应用技术的研究。
E-mail:hjh@opt.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)