

近背向散射测量系统中漫反射板的特性研究

韩 洋^{1,2}, 何俊华¹, 闫亚东¹, 吴冰静¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 通过分析激光聚变中近背向散射光的收集方式, 提出了采用漫反射板收集近背向散射光的方法。通过对漫反射板的应用场景分析, 提出了需要研究的漫反射板特性, 并搭建了漫反射板特性测量装置。测量并分析了漫反射板的方向半球反射比、双向反射分布函数、面均匀性、真空特性和紫外特性。分析结果表明: F_4 目标板具有接近于 0.99 的高反射率, 光谱平坦性, 近似余弦分布的双向反射分布函数, 较高的面均匀性, 以及较小的紫外真空影响。因此, F_4 目标板满足激光惯性约束聚变中近背向散射光的测量需求, 采用漫反射板收集近背向散射光的方法可行。

关键词: 近背向散射光诊断; 收光装置; 漫反射板; 方向半球反射比; 相对双向反射分布函数
中图分类号: TN247 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0917002

Characteristics research of diffuser panel in near backscatter measurement system

Han Yang^{1,2}, He Junhua¹, Yan Yadong¹, Wu Bingjing¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the analysis of near back scattered light in laser fusion, a method was proposed to collect near back scattered light by using diffuser panel. Based on the analysis of the application scenarios of the diffuser panel, the characteristic of the diffuser panel was presented. A device for measuring the characteristics of diffuser panel was set up. The directional hemispherical reflectance (DHR), bidirectional reflectance distribution function, surface uniformity, vacuum and UV properties were measured and analyzed. The analysis results show that the F_4 target panel has a high reflectivity close to 0.99, the spectral flatness, the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of approximate cosine distribution, 0.869 6% of the higher surface uniformity, as well as the smaller UV vacuum influence. Therefore, the F_4 target panel meets the measurement requirements of the near back scattered light in laser inertial confinement fusion (ICF), and it is feasible to use the diffuser panel to collect the near back scattered light.

Key words: diagnosis of near backscattered light; light receiving device; diffuser panel;
directional hemispherical reflectance; relative bidirectional reflectance distribution function

收稿日期: 2017-01-05; 修订日期: 2017-02-03

基金项目: 国家教育部博士点(西部)基金(200929441213)

作者简介: 韩洋(1991-), 男, 硕士生, 主要从事事散射光诊断测量方面的研究。Email: hanyang@opt.cn

导师简介: 何俊华(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 硕士, 主要从事强激光精密诊断与应用技术方面的研究。Email: hjh@opt.ac.cn

0 引言

在激光惯性约束聚变 (Inertial Confinement Fusion, ICF) 中, 激光与等离子体相互作用产生背向散射光, 该散射降低了激光能量与靶耦合效率, 因此, 对背向散射光的诊断为激光耦合效率参数提供重要的数据支撑。背向散射诊断包含全孔径背向散射诊断 (Full Aperture Back Scattering, FABS) 和近背向散射诊断 (Near Backscattered Imager, NBI)。在近背向散射诊断中, 散射光的收集方式十分重要, 目前国内相关 ICF 研究中主要采用反射镜对近背向散射光进行收集。先前采用玻璃球面镜作为收光装置, 该方案不足在于球面反射镜最佳物像点限制在其光轴上, 这种光路排布在大型 ICF 研究中难以实现。后来国内又采用金属非球面反射镜^[1-2]作为收光装置, 该方案光路排布灵活, 能够适应当前规模的激光聚变研究。然而, 未来更大规模的激光聚变研究将产生更强的近背向散射光, 金属镜由于损伤阈值较低, 有可能被损伤而影响系统的正常运行。故针对上述问题, 文中提出采用特定材质的漫反射板作为收光装置。在国外, 美国的 Nova 和 NIF 一贯采用将漫反射板作为近背向散射光的收集装置。国内与国外的不同点在于, 二者是基于不同的应用场景和不同的技术要求提出的, 克服的问题也不尽相同。

漫反射板特性的好坏主要由材质的辐射度特性^[3]决定, 因此, 文中基于漫反射板的工作场景, 选取多种材质样品, 对工作在近背向散射光^[4]波段的漫反射特性展开研究。建立用于特性研究的测量装置, 并对样品的方向半球反射比 (Directional Hemispherical Reflectance, DHR)、双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)、面均匀性进行测量。此外还模拟 ICF 研究靶球内漫反射板的工作环境, 即对样品的抗紫外特性、真空特性进行研究, 并对结果进行对比分析。

1 NBI 系统中漫反射板的工作原理

近背向散射光的空间分布^[5]为: 散射光从靶点发出, 沿打靶激光反方向传输, 散射到终端光学组件收光立体角范围之外的散射光的波长范围^[5]为 350~800 nm。漫反射板工作原理如图 1 所示, 漫反射板排布在靶室内壁的中空环状的近背向散射光区域进行收光, 将光线散射到对面的靶球空间内, 并在散射板

对面的法兰处由探测装置对散射光进行取样测量 (图 1 所示反射光为取样测量的漫反射光)。基于上述工作原理, 漫反射板带来的能量损失应越小越好, 故漫反射板在波长范围内要具有较高的方向半球反射比。由于取样测量角度 θ_r 主要集中于漫反射板法线方向 $[-30^\circ, +30^\circ]$ 范围内, 且测量位置具有多样性和不确定性, 则对该漫反射板的 BRDF 进行实验研究时, 测量角度 θ_r 取 $[-60^\circ, +60^\circ]$, 入射角度 θ_i 取 $[-20^\circ, +20^\circ]$ 。由于测量的环状区域内径为 400 mm, 外径为 1 500 mm, 漫反射板收光面积较大, 则在相同照明和探测条件下, 要求漫反射板表面的不同位置应具有较好的面均匀性。又由于漫反射板工作在真空靶室内部, 且测量波段有紫外成分, 故还应考虑漫反射板在真空度为 1×10^{-4} Pa 下的真空特性和抗紫外辐射特性。基于上述分析, 文中需对近背向散射测量系统中漫反射板的方向半球反射比、双向反射分布函数、面均匀性及紫外真空特性等特性进行测量。

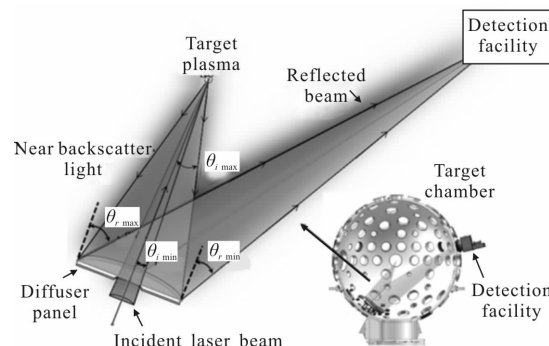


图 1 基于 ICF 的近背向散射测量中漫反射板工作原理示意图
Fig.1 Schematic of the working principle of diffuser panel in the near backscatter measurement based on ICF

2 漫反射板特性测量

基于近背向散射测量系统的耐辐照强度要求, 漫反射板样品选取满足该要求的三种材质的目标板即: F_4 目标板、 $BaSO_4$ 目标板和镀金目标板。采用已标定的 F_4 标准漫反射板作为标准板。针对上述三种材质漫反射板有如下特性测量。

2.1 方向半球反射比测量

样品的方向半球反射比通过标准漫反射板的方向半球反射比的传递^[6]来获取。图 2 为 DHR 与 BRDF 测量装置示意图, 该装置总体由四部分构成: 即光源部分、BRDF 三维转动部分、BRDF 探测装置部分及

DHR 积分球部分。其中光源部分和积分球部分用来测量 DHR。激光器产生的激光经变焦准直镜和光阑后输出平行光,通过计算机控制 BRDF 三维转动部分的电机 B 旋转 90°, 保证光路进入积分球而不被漫反射板所遮挡,在积分球开口 E 处依次放置已标定的标准漫反射板和三种材质的样品,并在积分球顶部另一侧开口处放置探测器,该探测器与示波器相连接,输出电压值 V_{standard} 和 V_{sample} ,则样品的方向半球反射比计算公式如下:

$$\rho_{\text{sample}} = \rho_{\text{standard}} \times \frac{V_{\text{sample}}}{V_{\text{standard}}} \quad (1)$$

式中: ρ_{standard} 为标准板的方向半球反射比; ρ_{sample} 为目标板的方向半球反射比; V_{standard} 为标准板对应的电压值; V_{sample} 为目标板对应的电压值。

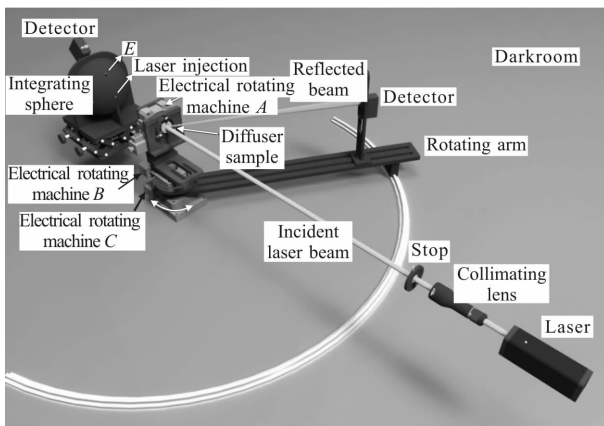


图 2 DHR 与 BRDF 测量装置示意图

Fig.2 Schematic of measuring device of DHR and BRDF

2.2 双向反射分布函数测量

2.2.1 BRDF 的定义

图 3 所示为 BRDF 的定义^[7],即波长为 λ 的入射辐射从 $i(\theta_i, \varphi_i)$ 方向以 $L_i(\theta_i, \varphi_i; \lambda)$ 的辐亮度投射向点目标,则该点目标的辅照度为 $dE_i = L_i(\theta_i, \varphi_i; \lambda) \cdot \cos\theta_i$; 探测器从 $r(\theta_r, \varphi_r)$ 方向进行观测,则亮度值为 $L_r(\theta_r, \varphi_r; \theta_i, \varphi_i; \lambda)$ 。则 BRDF 的物理意义^[8-9]为来自 i 方向的入射辐照度增量与其引起的反射辐亮度的比值,如下所示:

$$f_{i, \varphi_i, \theta_i, \varphi_r, \lambda} = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r; \theta_i, \varphi_i; \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i; \lambda)} \quad (2)$$

对上式积分后可得:

$$f_{i, \varphi_i, \theta_i, \varphi_r, \lambda} = \frac{L_r(\theta_r, \varphi_r; \theta_i, \varphi_i; \lambda)}{E_i(\theta_i, \varphi_i; \lambda)} \quad (3)$$

由 BRDF 的测量几何关系可得:

$$f_{i, \varphi_i, \theta_i, \varphi_r, \lambda} = \frac{C^2}{A \cdot \cos\theta_i} \cdot \frac{\Phi_r(\theta_r, \varphi_r; \theta_i, \varphi_i; \lambda)}{\Phi_i(\theta_i, \varphi_i; \lambda)} \quad (4)$$

式中: Ω_i 表示入射光束照明立体角; C 表示光源至漫反射板的距离; A 为光源出光口对应光束的面积; $\Phi_r(\theta_r, \varphi_r; \theta_i, \varphi_i; \lambda)$ 表示探测器对反射光束的响应值; $\Phi_i(\theta_i, \varphi_i; \lambda)$ 表示探测器对入射光束的响应值。则标准板与目标板 BRDF 比值为:

$$\frac{f_{\text{sa}}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)}{f_{\text{st}}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)} = \frac{\Phi_{\text{sr}, r}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)}{\Phi_{\text{sr}, r}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)} \quad (5)$$

标准漫反射板 BRDF 为 ρ/π , ρ 为半球反射率,将标准板作为理想朗伯面时,则有:

$$f_{i, \varphi_i, \theta_i, \varphi_r, \lambda} = \frac{\rho}{\pi} \cdot \frac{\Phi_{\text{sr}, r}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)}{\Phi_{\text{sr}, r}(\theta_i, 0; 0, 0; \lambda) \cdot \cos\theta_r} = \frac{\rho}{\pi} \cdot \frac{V_{\text{sr}, r}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)}{V_{\text{sr}, r}(\theta_i, 0; 0, 0; \lambda) \cdot \cos\theta_r} \quad (6)$$

式中: $\Phi_{\text{sr}, r}(\theta_i, 0; 0, 0; \lambda)$ 为探测器在入射天顶角 θ_i 、散射天顶角 0° 方向上标准板的辐通量测量值^[9]。由公式(6)可知,只需知道示波器输出的电压值便可计算出目标板的 BRDF 值。

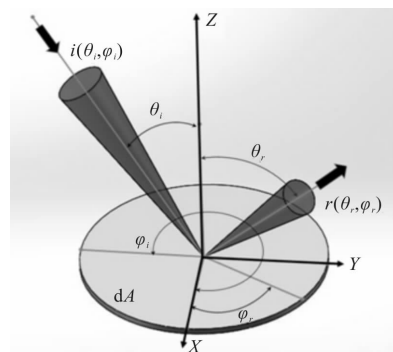


图 3 BRDF 的定义示意图

Fig.3 Definition of BRDF

2.2.2 BRDF 测量装置

BRDF 测量装置根据测试需求搭建而成,图 2 中光源部分、BRDF 三维转动部分、BRDF 探测装置部分用来测量 BRDF。其中光源部分由激光器、变焦准直镜和光阑组成;BRDF 三维转动部分由 3 个旋转电机组成,3 个电机的中心轴相交于样品表面,电机 A 控制样品在垂直于试验台方向内实现 360° 旋转,电机 B 控制电机 A 及样品在水平方向上实现 $\pm 20^\circ$ 旋转,电机 C 控制旋转臂在水平方向上实现 $\pm 60^\circ$ 旋转,电机 C 工作过程独立于电机 B,二者同轴但互不影响,电机的旋转在计算机及伺服电路的控制下自

动完成;BRDF 探测部分由安装在旋转臂上的光电倍增管、电源系统及示波器组成,探测器高度与激光器一致,在探测器旋转过程中会出现后向遮挡,后向遮挡角小于 4°。

用相对测量法对三种材质的漫反射板进行测量,光源部分产生的平行光照射在漫反射板表面,基于 NBI 系统的漫反射板其入射天顶角 θ_i 为 $[-20^\circ, +20^\circ]$,反射天顶角 θ_r 为 $[-60^\circ, +60^\circ]$ 。则设定电机 A 初始位置为 0° ,电机 B 的初始位置为 -20° ,电机 C 初始位置为 -60° ,保持电机 B 位置不变,电机 C 进行旋转,间隔为 5° ,在电机 C 的每个旋转间隔,电机 A 进行 $0^\circ\sim 360^\circ$ 旋转,电机 A 每隔 5° 进行一次数据记录。电机 A 完成 $0^\circ\sim 360^\circ$ 之后,电机 C 再转动 5° ,直到电机 C 完成 $-60^\circ\sim +60^\circ$ 范围的转动之后,电机 B 再转动 5° ,以此类推,直至该样品在该波长所有角度全部记录完成,然后更换另一波长的激光器重复上述实验。实验整个过程在暗室环境中进行。

2.3 面均匀性测量

将漫反射板固定于二维电动平移台上,平移台分别进行上下和左右两个方向的移动,平移台由电机伺服电路和计算机进行控制,光源从漫反射板天顶角 45° 位置进行入射,探测器放置在漫反射板表面法线方向,探测器与光源同一高度,漫反射板沿着探测器光轴方向进行等间距网格化移动,在每个移动间隔停顿时进行数据记录,通过计算标准偏差对漫反射板工作面进行评定,面均匀性的计算公式^[10]如下:

$$u = \frac{V_s}{\bar{V}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: u 为面均匀性; V_s 为各测量点测量电压的标准偏差; \bar{V} 为各测量点电压的均值。

2.4 抗紫外降解与抗真空特性测量

ICF 研究中,打靶产生有紫外辐射^[11],单次打靶产生紫外辐射的过程仅数个纳秒即结束,故实验时用紫外光对漫反射板进行长时间照射,研究实验前后漫反射板 DHR 改变量是否满足要求,从而对该特性下漫反射板的稳定性进行初步判断。之后将漫反射板放在真空装置中,进行真空度优于 1×10^{-4} Pa 的抽真空实验,保证其真空漏率优于 1×10^{-10} Pa·m³/s,并在真空条件下对其 DHR 进行测量,研究实验前后漫反射板 DHR 改变量^[12]是否满足要求。

3 测试结果与分析

3.1 方向半球反射比

F_4 标准板、 F_4 目标板、 $BaSO_4$ 目标板和镀金(Infragold) 目标板的 DHR 测量结果如图 4 所示, F_4 目标板和 F_4 标准板二者 DHR 值近乎相等,在近背向散射光光谱范围内 F_4 目标板 DHR 值接近于 0.99,变化量为 0.38%;而 $BaSO_4$ 目标板的 DHR 值在 0.98 附近,但略低于 F_4 目标板的 DHR 值,变化量为 0.35%;镀金漫反射板在同样的光谱范围内 DHR 值大于 0.83,但整体 DHR 值随着波长的增加而变大,在 800 nm 处, DHR 值大于 0.9,变化量为 7.85%,其光谱平坦性较差。综上所述,从 DHR 角度考虑, F_4 目标板优于 $BaSO_4$ 目标板, $BaSO_4$ 目标板又优于镀金目标板。

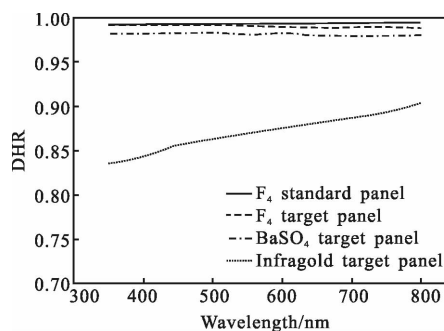


图 4 F_4 标准板、 F_4 目标板、 $BaSO_4$ 目标板和镀金目标板的 DHR 测量结果

Fig.4 DHR measurement result of F_4 standard, F_4 target, $BaSO_4$ target panel and infragold target panel

3.2 双向反射分布函数

图 5 为当 λ 为 350~800 nm, $\theta_i=0^\circ$, $\varphi_i=0^\circ$, θ_r 取 $-60^\circ\sim +60^\circ$ 时三种漫反射板的 BRDF 曲面图。图 5(a) 为 F_4 目标板的 BRDF 曲面图,在散射角 θ_r 范围内最大值为 0.691 4,最小值为 0.330 3,两者分别出现在 60° 和 0° 位置,改变量 $BRDF=0.361 1$ 。在散射角 θ_r 取 $-30^\circ\sim +30^\circ$ 时 $BRDF=0.140 8$,BRDF 值随着散射角的增大而增大,有着良好的余弦特性。图 5(b)为 $BaSO_4$ 目标板的 BRDF 曲面图,在 θ_r 内最大值为 0.629 9,最小值为 0.329 4,两者分别出现在 60° 和 0° 位置,改变量 $BRDF=0.300 5$ 。在 θ_r 内 $BRDF=0.060 9$,BRDF 值随着散射角的增大而变大,有着良好的余弦特性。图 5(c)为镀金目标板的 BRDF 曲面图,其 BRDF 变化规律较前两者有所不同,在 θ_r 范围内最大值为

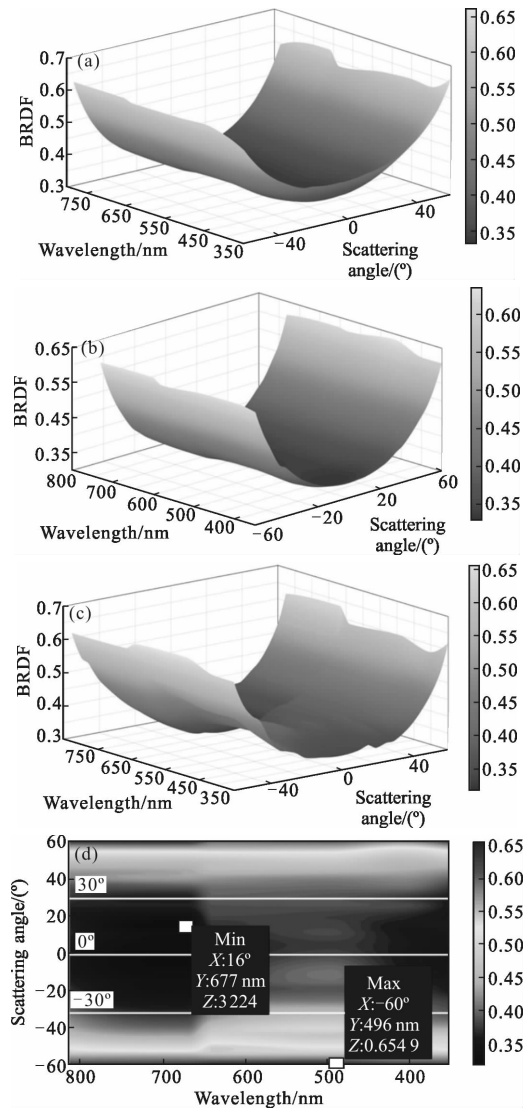


图 5 三种漫反射板的 BRDF 曲面图
Fig.5 BRDF surface diagram of three diffuser panels

0.654 9, 最小值为 0.322 4, 两者分别出现在 -60° 和 $+16^\circ$ 位置, 改变量 $BRDF=0.332 5$, 其中 BRDF 最小值未出现在 0° 位置。在 θ_r 范围内 BRDF 改变量为

0.119 5, 随着散射角的增大 BRDF 并非逐渐变大。图 5(d) 为镀金目标板 BRDF 的色彩图, 更能直观得出 BRDF 颜色并非均匀变化, 而是出现了交替的情况。

三种目标板在同一散射天顶角测量的条件下, 入射方位角在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内改变时引起的 BRDF 值改变量如下: F_4 目标板最大改变量 $BRDF_{max}=0.006$, $BaSO_4$ 目标板 $BRDF_{max}=0.006$, 镀金目标板 $BRDF_{max}=0.01$, 三者最大改变量均出现在 $\theta_r=60^\circ$ 位置。

以 F_4 目标板为例进行说明, 样品在 $\theta_r=0^\circ, \varphi_i$ 为 $0^\circ \sim 360^\circ, \theta_r$ 为 $0^\circ \sim 60^\circ, \lambda=351 \text{ nm}$ 条件下, 测得 BRDF 值如图 6 所示, 同一散射天顶角测量下, 不同的入射方位角对应的 BRDF 值不同, 其改变量最大值为 0.006, 出现在散射天顶角 $\theta_r=60^\circ$ 位置。在同一入射方位角 $\varphi_i=90^\circ$ 时, θ_r 在 $[0^\circ, +60^\circ]$ 范围内的 $BRDF=0.233 7$, θ_r 在 $[0^\circ, +30^\circ]$ 范围内的 $BRDF=0.045 3$, 改变量满足需求。

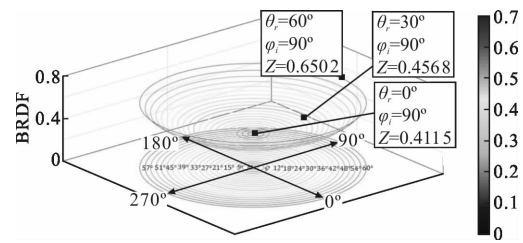


图 6 光源 351 nm 且 0° 入射时 BRDF
Fig.6 BRDF at light 351 nm and incident angle 0°

综上所述, 从 BRDF 改变量以及 BRDF 在不同波长、不同方位角、不同散射角下变化规律的稳定性, 综合分析得出: $BaSO_4$ 目标板优于 F_4 目标板, F_4 目标板又优于镀金目标板。

3.3 面均匀性

图 7(a)、(b)、(c) 分别为 F_4 目标板、 $BaSO_4$ 目标板、

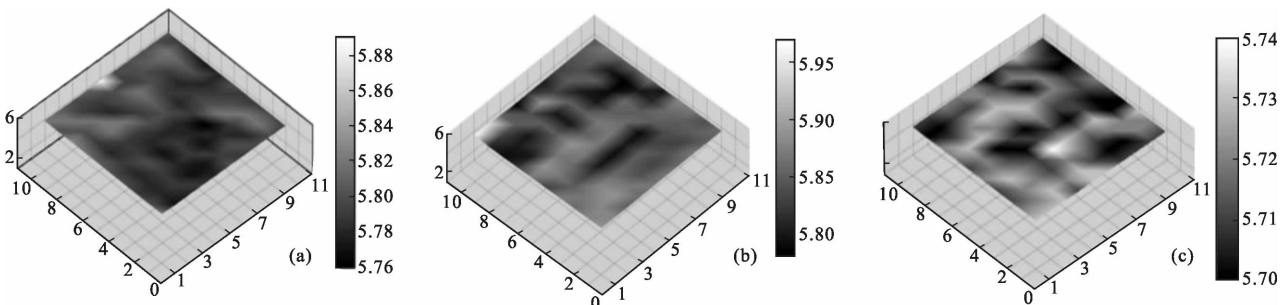


图 7 三种漫反射板的面均匀性
Fig.7 Surface uniformity of three diffuser panels

镀金目标板的面均匀性测量结果。三者的漫反射面非均匀性分别为 0.869 6%、0.944 8%、1.471 1%，图中也能直观地看出 F₄ 目标板相比于其他两者有较好的面均匀性。综上所述，从面均匀性角度考虑，F₄ 目标板优于 BaSO₄ 目标板，BaSO₄ 目标板又优于镀金目标板。

3.4 抗紫外降解与抗真空特性

图 8(a)、(b)、(c)分别为 F₄ 目标板、BaSO₄ 目标板及镀金目标板对应的经过紫外辐射和抽真空之后的反射率随波长变化曲线图。其 DHR 改变量如表 1 所示，其中 UV(F₄)表示 F₄ 目标板在紫外辐射之后的改变量，Vacuum(F₄)表示 F₄ 目标板在真空实验之后的改变量，以此类推。由表中数据可知，镀金目标板受紫外真空影响最小，F₄ 目标板次之，而 BaSO₄ 目标板 DHR 在真空环境中出现了明显下降。综上所述，仅考虑紫外真空特性，则镀金目标板优于 F₄ 目标板，F₄ 目标板又优于 BaSO₄ 目标板。

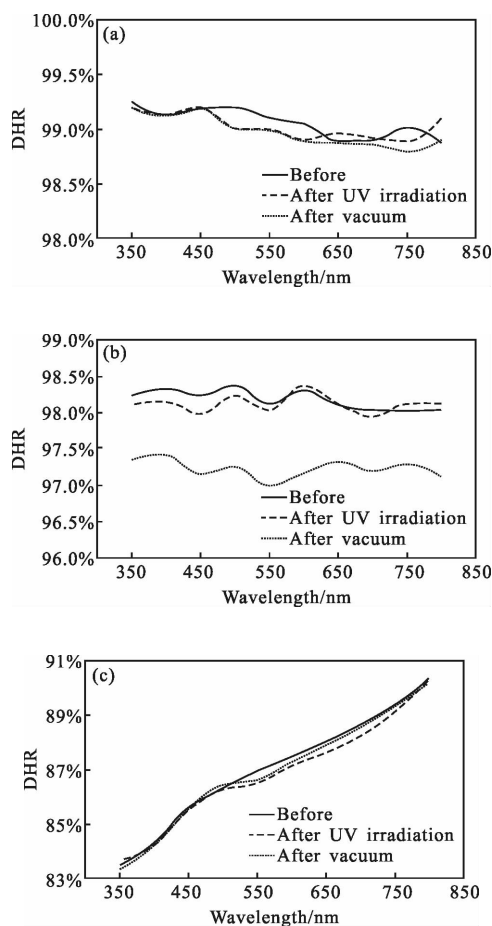


图 8 紫外真空实验后的 DHR 曲线图

Fig.8 DHR curve after UV and vacuum experiment

表 1 紫外辐射和真空实验之后 DHR 改变量

Tab.1 DHR after UV irradiation and vacuum

Condition	ΔDHR_{max}	ΔDHR_{min}
UV(F ₄)	0.235	-0.197
Vacuum(F ₄)	0.629	0.382
UV(BaSO ₄)	0.259	-0.099
Vacuum(BaSO ₄)	1.133	0.735
UV(Infragold)	0.45	0.174
Vacuum(Infragold)	0.339	-0.12

4 结论

文中介绍了基于 ICF 研究的近背向散射光诊断系统中漫反射板的工作原理，并通过相对测量的方法对三种材质的漫反射板 DHR 和 BRDF 进行了测量，同时对面均匀性进行了分析，并模拟了漫反射板在 ICF 研究中紫外真空的工作环境。综合考虑三种材质的 DHR、BRDF、面均匀性以及紫外真空特性，F₄ 目标板最为满足 ICF 研究中近背向散射光诊断测量的光学特性要求：接近于 99% 的高反射率、均匀光谱反射比、良好的朗伯特特性、较高的面均匀性以及较小的紫外真空影响。因此采用 F₄ 漫反射板作为 NBI 系统的收光装置是可行的。探测装置得到的能量分布信息，经过 BRDF 数据的倒推拟合，得到近背向散射光的能量分布，并为激光等离子体耦合效率研究提供依据。该研究结果也为后续基于漫反射板建立的 NBI 系统提供了理论依据和数据支撑。

参考文献：

[1] Zhang Xuejun, Li Zhilai, Zhang Zhongyu. Space telescope aspherical mirror structure design based on SiC material[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 577-582. (in Chinese)
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.

[2] Yan Yadong, He Junhua, Wang Feng, et al. Design of optical system for SG-III near backscatter diagnosis [J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(6): 1469-1476. (in Chinese)
闫亚东, 何俊华, 王峰, 等. 神光-III 主机近背向散射诊断光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1469-1476.

- [3] Che Nianzeng, Yan Dayuan. Radiometry and Photometry [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990: 18-25. (in Chinese)
车念曾, 闫达远. 辐射度学和光度学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990: 18-25.
- [4] Wang Feng, Peng Xiaoshi, Yan Yadong, et al. Backscattered light diagnostic technique based on SG-III laser facility [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42 (9): 0902011. (in Chinese)
王峰, 彭晓世, 闫亚东, 等. 基于神光-III主机的背向散射光诊断设计[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0902011.
- [5] Yang Zhenghua. The study of near backscatter and full-aperture backscatter measurement system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008. (in Chinese)
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.
- [6] Jia Hui, Li Futian. Application of BaSO₄ diffuser plate in 250-400 nm spectral radiance calibration [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2004, 24(1): 1-7. (in Chinese)
贾辉, 李福田. 硫酸钡漫反射板在 250~400 nm 光谱辐射亮度标定中的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(1): 1-7.
- [7] Wang Long, Lin Chao, Zheng Yuquan. Fabrication and experiment of aluminum diffusers for CO₂ detector calibration on orbit[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 591-599. (in Chinese)
王龙, 蔺超, 郑玉权. CO₂探测仪星上定标铝漫反射板的制备与试验[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 591-599.
- [8] Zhao Minjie, Si Fuqi, Lu Yihuai, et al. Experimental measurement of aluminium diffuser applied to calibration system of space-borne differential optical absorption spectrometer [J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(24): 249301. (in Chinese)
赵敏杰, 司福祺, 陆亦怀, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪定标系统中铝漫反射板实验测量研究 [J]. 物理学报, 2013, 62(24): 249301.
- [9] Jia Hui, Li Futian. Bidirectional reflectance distribution function of aluminium diffuser at UV spectral band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(2): 230-234. (in Chinese)
贾辉, 李福田. 铝漫反射板 200~300 nm 相对双向反射分布函数的实验研究[J]. 光学学报, 2004, 24(2): 230-234.
- [10] Shi Jiading, Zhang Liming, Cao Xingjia, et al. Design and research of diffuser panel used for on-board calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0828001. (in Chinese)
施家定, 张黎明, 曹兴家, 等. 星上定标漫反射板设计研究 [J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0828001.
- [11] Li Cong, Wang Yongmei, Zhang Zhongmou. The study of aluminium diffuser calibration in the UV [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(4): 865-869. (in Chinese)
李聪, 王咏梅, 张仲谋. 紫外光谱辐射定标中的漫反射板反射特性研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(4): 865-869.
- [12] Li Bo, Lin Guanyu, Zhang Mingyu, et al. Fabrication of diffuser in UV-VUV space remote sensing instrument [J]. *Opt Precision Eng*, 2009, 17(3): 475-480. (in Chinese)
李博, 林冠宇, 张明宇, 等. 紫外-真空紫外空间遥感仪器漫反射板的制备[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 475-480.