

# 汤姆孙散射系统中发黑材料的表面散射特性测量

王鹏<sup>1</sup>, 袁鹏<sup>1\*</sup>, 谭伟强<sup>1</sup>, 郑坚<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学技术大学工程与应用物理系近地空间重点实验室, 安徽 合肥 230026;

<sup>2</sup>上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240

**摘要** 本文研制一套全自动散射特性测试平台, 并使用该测试平台对汤姆孙散射诊断系统中杂散光吸光材料的表面散射特性开展实验测量研究。在 1064 nm 的波段下, 该测试平台对双向反射分布函数的本底噪声水平优于  $2 \times 10^{-5} \text{ sr}^{-1}$ 。利用该测试平台测量反射镜、不锈钢、发黑铝合金和发黑涂层等多种材料的表面散射特性。依据相关测量结果, “科大一环”汤姆孙散射诊断系统采用了 Avian Black-S 发黑涂料以及 Metal Velvet<sup>TM</sup> 发黑铝箔用于吸收杂散光。利用测量结果给出多种材料的 ABg 模型参数, 为杂散光追踪模拟计算提供必要数据。

**关键词** 散射; 双向反射分布函数测量; 双向反射计; 发黑材料; 杂散光

中图分类号 O536

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2129002

## Measurement of Surface Scattering Characteristics of Black Materials in Thomson Scattering System

Wang Peng<sup>1</sup>, Yuan Peng<sup>1\*</sup>, Tan Weiqiang<sup>1</sup>, Zheng Jian<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Geospace Environment of Chinese Academy of Sciences, Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

<sup>2</sup>IFSA Collaborative Innovation Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** This paper develops a set of automatic platform for testing scattering characteristics and uses this test platform for the experimental measurements on the surface scattering characteristics of stray light absorbing materials in a Thomson scattering diagnostic system. In the 1064 nm band, the noise floor of the test platform for the bidirectional reflection distribution function is better than  $2 \times 10^{-5} \text{ sr}^{-1}$ . Furthermore, this test platform is employed to measure the surface scattering characteristics of standard white plates, stainless steel, black aluminum alloys, black paints, and other materials. The experimental results show that the Thomson scattering diagnostic system on the “Keda Torus” setup adopted Avian Black-S black paint and Metal Velvet<sup>TM</sup> black foil to absorb stray light. In the end, the measurement results are utilized to provide ABg model parameters for a variety of materials, offering necessary data for the ray tracing simulation associated with stray light.

**Key words** scattering; measurements of bidirectional reflection distribution function; bidirectional reflectometer; black materials; stray light

**OCIS codes** 290.1483; 290.5880; 290.2648; 120.5820

## 1 引 言

在惯性约束聚变<sup>[1]</sup>和磁约束聚变<sup>[2]</sup>的研究中, 汤姆孙散射是诊断等离子体的电子温度和电子密度的标准方法之一<sup>[3-13]</sup>。由于汤姆孙散射截面的面积仅有  $6.65 \times 10^{-29} \text{ m}^2$ <sup>[14]</sup>, 所以只有很少的入射光子能够被自由电子散射, 则散射光子数较少, 散射光信号的信噪比较差, 造成等离子体的电子温度和电子

密度诊断困难, 这是汤姆孙散射实验一直以来存在的问题。汤姆孙散射实验中信噪比的改进一般从提高汤姆孙散射信号的强度和降低噪声两方面出发<sup>[15]</sup>, 即通过增强入射激光强度来提高散射光子数, 但各种杂散光也会提高散射光子数, 因此需要对其进行抑制。

光学元件表面上的散射光在传输管道及真空腔室内壁上经历若干次反射后, 往往能够耦合进汤姆

收稿日期: 2020-07-10; 修回日期: 2020-07-13; 录用日期: 2020-07-24

基金项目: 国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2013-2)、国家重点研发计划(2017YFA0403300)

\* E-mail: yuanpeng@ustc.edu.cn

孙散射光收集系统中,这是汤姆孙散射系统中杂散光的主要来源之一<sup>[16]</sup>。提高散射信号信噪比的方法:一是直接在光谱上区分汤姆孙散射信号和杂散信号;二是屏蔽进入散射光收集区域中的杂散光<sup>[17]</sup>。具体做法:使用光阑和光学挡板阻止杂散光进入收集光路中<sup>[18]</sup>;在空间滤波器中利用针孔屏蔽激光的高频部分,以屏蔽杂散光<sup>[19]</sup>;使用光垃圾斗吸收高能激光,防止其再次进入主光路中而成为杂散光<sup>[20]</sup>;使用光陷阱吸收散射光收集系统视场内的杂散光<sup>[21]</sup>。但应用这些技术手段需要对相关器件的关键表面进行消光处理,以减少杂散光的再散射。

汤姆孙散射系统中的吸收材料对杂散光的抑制效果会影响信噪比的好坏,所以需要对材料表面的散射特性开展深入研究。安装在‘科大一环’装置<sup>[22]</sup>上的汤姆孙散射系统使用的诊断光的波长为1064 nm,针对此波长设计一套全自动的表面散射光测试平台,通过该测试平台可以快速测试各种吸收材料的散射光分布情况。比较不同材料的散射光强度分布,所得结果可以为汤姆孙散射系统中杂散光吸收材料的选取提供一个很好的数据参考,以最大限度地抑制杂散光,从而提高汤姆孙散射信号的信噪比。通过实验测量得到的散射光空间分布可以得到材料的双向反射分布函数(BRDF),进而拟合得到 ABg 模型的相关参数,为杂散光射线追踪计算提供重要数据<sup>[23-28]</sup>。

## 2 实验方法和设置

材料表面入射光的散射行为通常可以利用 BRDF 来描述。对于吸收材料的散射角分辨谱(ARS)和 BRDF 可以表示为<sup>[29]</sup>

$$A_{\text{ARS}}(\theta_s) = \frac{\Delta P_s(\theta_s)}{P_i \Delta \Omega_s}, \quad (1)$$

$$B'(\theta_s) = \frac{A_{\text{ARS}}(\theta_s)}{\cos \theta_s} = \frac{\Delta P_s(\theta_s)}{P_i \Delta \Omega_s \cos \theta_s}, \quad (2)$$

式中: $B'$ 表示 BRDF; $P_i$ 表示入射光的功率; $\Delta \Omega_s$ 表示立体角; $\Delta P_s$ 表示散射光功率; $\Delta P_s(\theta_s)/\Delta \Omega_s$ 表示单位立体角内的散射光功率; $\theta_s$ 表示散射角。BRDF 可以描述入射到物质表面后在各个反射方向上的散射光分布。若对(1)式和(2)式采用直接测量法,则需要对入射光功率、散射光功率以及探测器的视场角等物理量进行绝对测量。为了降低测量难度、增加实验的可靠性,采用相对测量法,可以表示为

$$B'(\theta_s)_{\text{sample}} = \frac{\Delta P_s(\theta_s)_{\text{sample}}}{\Delta P_s(\theta_s)_{\text{standard}}} B'(\theta_s)_{\text{standard}}, \quad (3)$$

式中: $B'(\theta_s)_{\text{sample}}$ 表示待测材料在  $\theta_s$  下的 BRDF; $\Delta P_s(\theta_s)_{\text{sample}}$ 表示待测材料样品在  $\theta_s$  下的散射光功率; $\Delta P_s(\theta_s)_{\text{standard}}$ 表示标准参照物在  $\theta_s$  下的散射光功率; $B'(\theta_s)_{\text{standard}}$ 表示标准参照物在  $\theta_s$  下的 BRDF。由(3)式可知,在已知标准参照物 BRDF 的情况下,通过对比标准参照物和待测材料样品的散射光功率,便可以得到待测材料的 BRDF。相对测量法的实验误差来源于散射光功率的测量误差,以及标准参照物与理想值的偏差。实验中采用标准白板作为标准参照物,其 BRDF 为  $1/\pi$ 。

在分析杂散光的 TracePro 等软件中,采用 ABg 模型来描述物质表面的散射特性。ABg 模型的 BRDF 可以表示为

$$B' = \frac{A}{B + |\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_0|^g}, \quad (4)$$

式中: $\boldsymbol{\beta}$ 和 $\boldsymbol{\beta}_0$ 分别表示散射方向和反射方向的方向正弦; $A$ 、 $B$ 和 $g$ 表示 ABg 模型的参数,其中  $B$  和  $g$  决定散射特性, $A$  决定散射率。对实验数据进行拟合,可以获得 ABg 模型的  $A$ 、 $B$  和  $g$ ,从而为杂散光的模拟计算提供科学且可靠的实验数据。

为了便于快速测试多种材料在不同入射角下的散射光分布,设计一套全自动的测试系统,如图 1 所示。实验中使用波长为 1064 nm、功率为 200 mW 和 S 偏振激光二极管作为光源,使用一个焦距  $f = 6.24$  mm 和数值孔径  $\text{NA} = 0.4$  的非球面镜对其进行准直,准直光束被一个直径为 2.54 cm 和  $f = 400$  mm 的平凸透镜聚焦到测试材料的表面,材料表面的光斑直径约为 1.7 mm。设置的两个光阑孔径分别为 3 mm 和 2 mm,可以提高准直效果和入射角度的精度,同时可以屏蔽由激光二极管发散带来的杂散光,减小测量误差。通过电动旋转台来控制测试样品,可以任意改变测试样品上的入射光角度;样品上的散射光被一个直径为 2.54 cm 和  $f = 40$  mm 的平凸透镜成像到雪崩二极管(APD)上,通过 APD 来探测散射光并保存于示波器上。为了提高散射光功率的测量精度,在直径为 2.54 cm 成像透镜前添加一个孔径为 0.49 cm 的光阑,将收光立体角限制在  $2^\circ$  左右。这套收集光系统同时被另一个的电动旋转台控制,以实现任意角度的散射光测量。在当前的实验设置下,测量误差来源于两个方面。第一是来源于入射激光的稳定性,入射光功率的抖动在 4% 左右,通过长时间测量取平均值的方

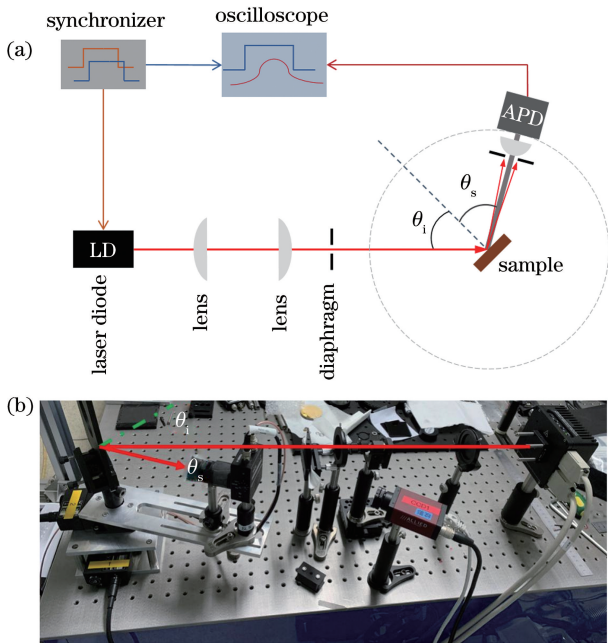


图 1 全自动的测试系统。(a)反射计系统构成的示意图；  
(b)现场照片

Fig. 1 Fully automatic test system. (a) Schematic of reflectometer system composition; (b) on-site photo

法以减少该误差；第二是散射光功率的系统误差，这部分是由探测器的本底噪声造成的，对散射光功率数据进行处理可以消除本底噪声的影响。电动旋转台具有  $0.1^\circ$  的定位精度，因此入射角和散射角度的测量误差主要来源于入射光和散射光的张角。

编写 LabVIEW 程序来控制旋转台和数据采集以实现自动测试，图 2 为材料散射光的测试流程。将装有样品的旋转台旋转到初始角度  $-80^\circ$ ，相对样品的表面法线方向从  $-80^\circ$  到  $80^\circ$  改变入射角度，每变化  $10^\circ$  测量入射角。将装有探测系统的另一个旋转台进行旋转，测量该入射角下的散射光，实验中的测量范围为  $-80^\circ \sim 80^\circ$ ，每  $5^\circ$  测量散射角，这样就测得该入射角下的散射光分布。循环流程直到测得材料在不同入射角下的散射光分布。整个过程都是通过 LabVIEW 程序来实现自动测试，这可以便于快速获得吸收材料的全部散射光强度分布。

### 3 结果与分析

实验测量直径为 30 mm 的标准白板、10 cm × 10 cm 的 304 不锈钢板、5 cm × 5 cm 的 6061 阳极氧化发黑铝合金板、3 cm × 5 cm 石墨板、5 cm × 5 cm Avian Black-S 发黑涂料和 5 cm × 5 cm Acktar 公司的 Metal Velvet™ coated Foil Roll 发黑箔 6 种材料的表面散射分布。通过原子力显微镜 (AFM) 对 6

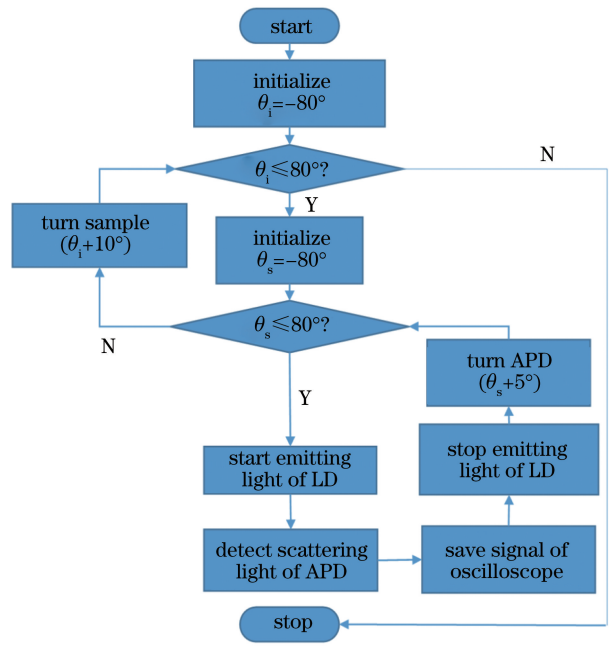


图 2 反射计的工作流程图

Fig. 2 Working flow chart of reflectometer

种材料的表面进行测量，每种材料均测试  $10 \mu\text{m}$  大小的区域，图 3 为使用 AFM 对不锈钢表面粗糙度的测量结果。从图 3 可以看到，不锈钢表面的粗糙度 (Ra) 为 64.4 nm。表 1 为 5 种材料使用 AFM 测量的表面粗糙度结果。当激光正入射时，不同测试材料的双向反射分布函数曲线如图 4 所示，其中横坐标表示散射角，纵坐标表示通过 APD 测得的材料在不同散射角下的双向发射分布。图 4 中  $-10^\circ \sim 10^\circ$  的空白区域是由收光系统遮挡所致。从图 4 可以看到，标准白板的 BRDF 近似为常数，具有朗伯体特性；阳极氧化发黑的铝合金和不锈钢材料在近镜面反射方向存在很强的散射光，说明在装置的

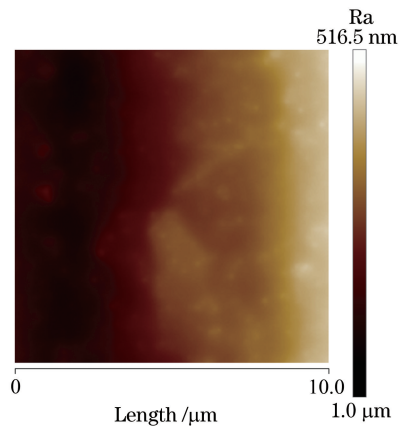


图 3 304 不锈钢表面粗糙度的测量结果

Fig. 3 Measurement result of 304 stainless steel surface roughness

表 1 不同材料的表面粗糙度

Table 1 Surface roughness of different materials

Material	Ra /nm
304 stainless steel	64.4
6061 black aluminium oxide	44.1
Standard white plate	225.0
Avian Black-S black paint	250.0
Acktar black foil	226.0

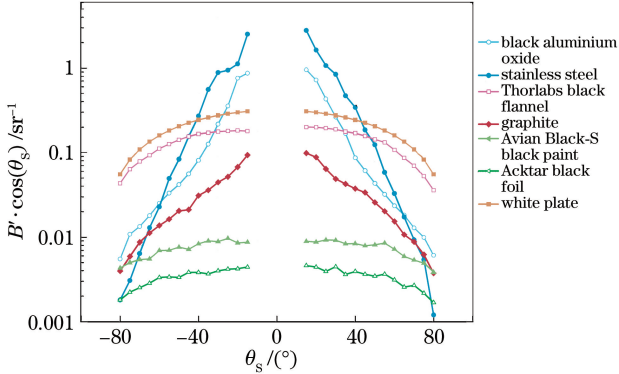


图 4 正入射下吸收材料的双向反射分布函数曲线

Fig. 4 Bidirectional reflection distribution function curves of absorbing material under normal incidence

真空室及真空管道内壁是次级杂散光的重要来源位置;石墨板的散射光强度比标准白板低约 1 个量级,石墨板在近镜面反射方向同样存在较强的杂散光;Acktar 发黑箔的散射光强度比标准白板低约 2 个

表 2 不同材料拟合所得的 ABg 参数

Table 2 ABg parameters obtained by fitting different materials

Material	A	B	g
304 stainless steel	0.927300	0.02185	3.3450
6061 black aluminium oxide	0.022760	0.01947	4.2020
Graphite	0.029370	0.21560	1.9850
Avian Black-S black paint	0.017190	$9.805 \times 10^{-5}$	-0.7003
Acktar black foil	0.007532	$5.266 \times 10^{-5}$	-0.5992

通过测试这些材料在激光正入射条件下的散射光分布,可以得到每种材料对杂散光的吸收效果。但是在汤姆孙散射实验中,当杂散光在管道内壁传导时,其入射角是不断变化的,因此对上述材料进行不同入射角下的散射光分布测量,测试结果如图 6 所示。

从图 6 可以看到,标准白板在整个区域的散射光分布是比较均匀的,这说明其表面是漫反射面;不锈钢和阳极氧化发黑的铝合金材料在近镜面反射方向存在很强的散射光,若不进行任何处理,装置的真空室及真空管道内壁是次级杂散光的重要来源;石墨板对杂散光约有 1 个量级的抑制效果,并且在近

量级;Avian Black-S 发黑涂料的散射光强度比标准白板低小于 2 个量级,说明在正入射的条件下,发黑箔对杂散光的吸收效果比发黑涂料稍好,并且这两种材料的散射光行为接近朗伯体。

通过测得材料表面的散射分布,可以得到这些材料的 BRDF,采用 ABg 模型对上述不锈钢、阳极氧化发黑铝合金、石墨板、Avian Black-S 发黑涂料和 Acktar 发黑箔的实验结果进行拟合,相关拟合结果如图 5 所示,其拟合参数如表 2 所示。从图 5 可以看到,这些材料的散射行为与 ABg 模型拟合良好。表 2 中的参数可以为杂散光模拟计算程序,如 TracePro,并提供重要依据。

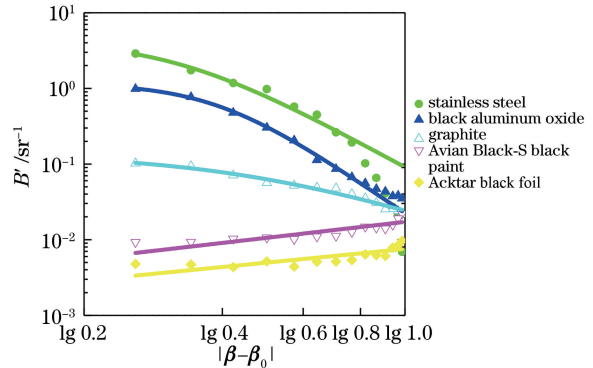


图 5 不同材料的 BRDF 与 ABg 模型的拟合结果

Fig. 5 Fitting results of BRDF and ABg models of different materials

镜面反射方向存在很强的散射光;对于 Avian Black-S 发黑涂料和 Acktar 公司的 Metal Velvet™ coated Foil Roll 发黑箔的测试结果,可以看到这两种材料都有很好的吸收杂散光效果,与标准白板相比,两种材料的平均散射光强度降低近 2 个量级。从整体上来看,发黑箔可以更好地吸收杂散光,但发黑箔在近镜面反射方向存在很强的散射光,说明发黑涂料能够更加均匀地吸收杂散光。在汤姆孙散射实验中,可以根据具体的实验安排来选取合适的材料以抑制杂散光。

给出 40°和 70°入射角下的散射数据,如图 7 所示。从图 7(a)可以明显看到,不锈钢和阳极氧化发

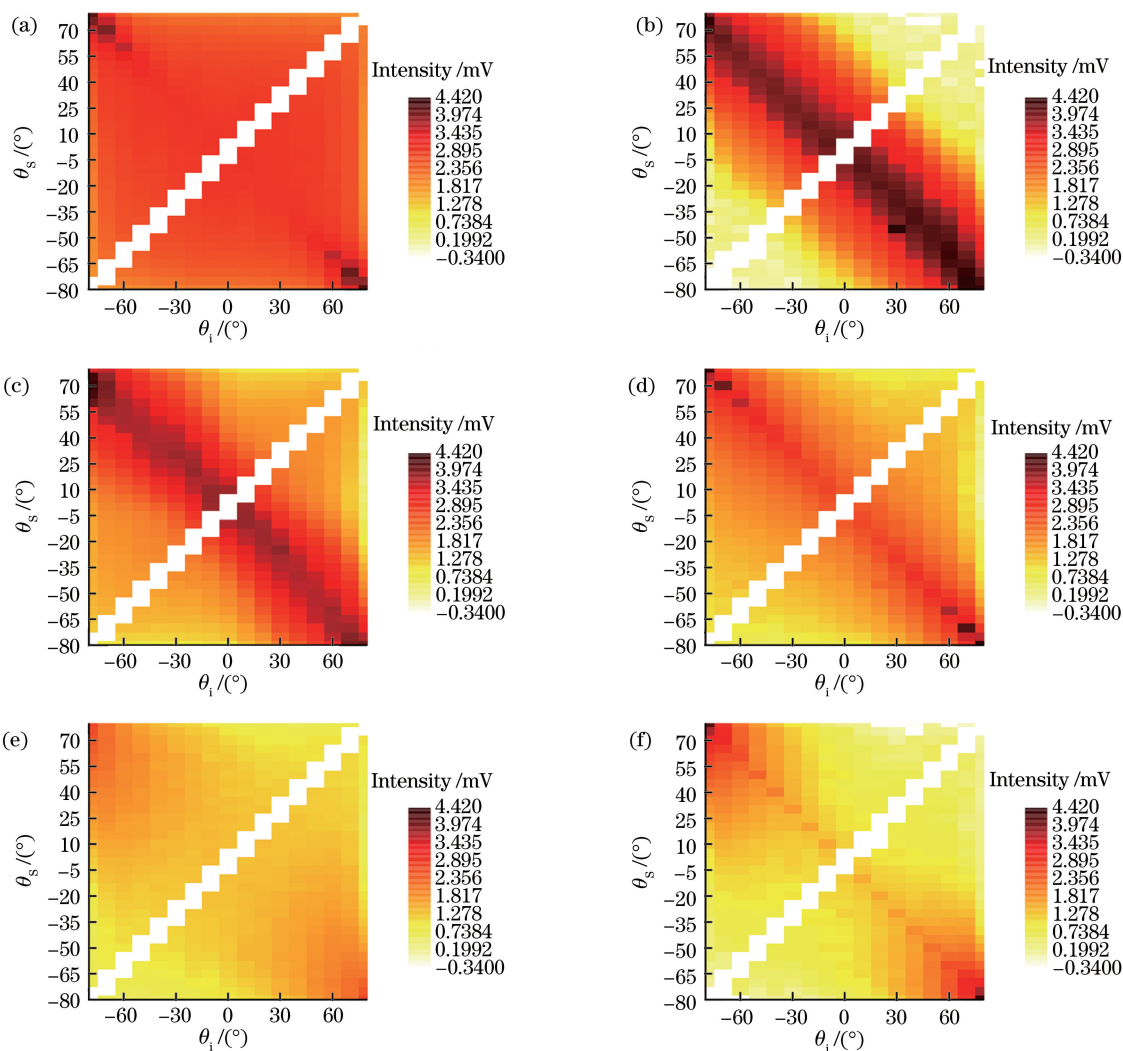


图 6 不同吸收材料在不同入射角下的散射光强度分布。(a)标准白板;(b)不锈钢;(c)阳极氧化发黑铝合金;(d)石墨;  
(e) Avian Black-S发黑涂料;(f) Acktar公司的 Metal Velvet<sup>TM</sup> coated Foil Roll 发黑箔

Fig. 6 Scattered light intensity distribution of different absorbing materials at different incident angles. (a) Standard white board; (b) stainless steel; (c) anodized black aluminum alloy; (d) graphite; (e) Avian Black-S black coating; (f) Acktar's Metal Velvet<sup>TM</sup> coated Foil Roll Black foil

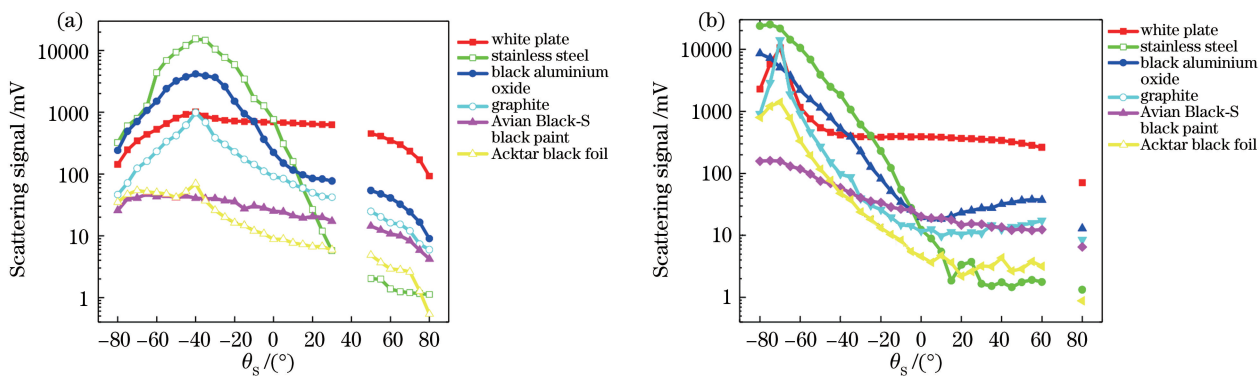


图 7 不同入射角下吸收材料的散射数据。(a) 40°入射角;(b) 70°入射角

Fig. 7 Scattering data of absorbing materials at different incident angles.

(a) 40° incident angle; (b) 70° incident angle

黑的铝合金材料在 $-40^\circ$ 方向上存在明显的镜面反射,而发黑箔和发黑涂料的散射光功率明显弱很多,但可以更有效地吸收杂散光,这与之前的结论基本一致。从图 7(b)可以看到,在大角度入射下,所测材料均存在很强的前向散射光,其中不锈钢、阳极氧化发黑的铝合金和 Aektar 发黑箔同时存在很强的镜面反射光,说明这些材料对于掠入射杂散光的吸收效果较差。在掠入射的条件下,只有 Avian Black-S 发黑涂料对于镜面反射方向的杂散光有近 2 个量级的抑制效果。对  $40^\circ$  入射角下介质膜镜面及金膜镜面的散射特性进行研究,其中金膜镜面的背向散射信号水平表明该测试平台的测量本底噪声优于  $2 \times 10^{-5} \text{ sr}^{-1}$ 。

需要特别指出的是,根据实验的研究结果,在‘科大一环’装置上的汤姆孙散射系统中最终选取发黑箔和发黑涂料这两种材料,可以成功地将系统的杂散光抑制到本底噪声的水平,并取得理想的杂散光抑制效果。

## 4 结 论

设计一套散射光自动测试平台,并针对汤姆孙散射系统中的杂散光吸收材料进行散射测量实验。经过测试检验,这套测试平台可以快速准确测量材料的散射光分布。实验结果表明,石墨平板对于杂散光只有近 1 个量级的吸收,并且会产生较强的镜面反射杂散光; Avian Black-S 发黑涂料和 Aektar 公司的 Metal Velvet™ coated Foil Roll 发黑箔的吸收效果最好,可以降低近 2 个量级的杂散光水平。在非掠入射的条件下,发黑箔的吸光效果稍好一些,但在掠入射的条件下,发黑涂料对杂散光吸收效果更好。根据实验研究结果,在‘科大一环’装置上的汤姆孙散射系统中,最终选取发黑箔和发黑涂料这两种材料,可以取得理想的杂散光抑制效果。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Dimits A M, Bateman G, Beer M, et al. Comparisons and physics basis of tokamak transport models and turbulence simulations [J]. *Physics of Plasmas*, 2000, 7(3): 969-983.
- [3] Glenzer S H, Alley W E, Estabrook K G, et al. Thomson scattering from laser plasmas [J]. *Physics of Plasmas*, 1999, 6(5): 2117-2128.
- [4] Bai B, Zheng J, Liu W, et al. Thomson scattering measurement of gold plasmas produced with  $0.351 \mu\text{m}$  laser light [J]. *Physics of Plasmas*, 2001, 8(9): 4144-4148.
- [5] Wang Z, Zheng J, Zhao B, et al. Thomson scattering from laser-produced gold plasmas in radiation conversion layer [J]. *Physics of Plasmas*, 2005, 12(8): 082703.
- [6] Li Z C, Zheng J, Ding Y K, et al. Generation and characterization of millimeter-scale plasmas for the research of laser plasma interactions on Shenguang-III prototype [J]. *Chinese Physics B*, 2010, 19(12): 125202.
- [7] Peacock N J, Robinson D C, Forrest M J, et al. Measurement of the electron temperature by Thomson scattering in tokamak T3 [J]. *Nature*, 1969, 224(5218): 488-490.
- [8] Sheffield J, Froula D, Glenzer S H, et al. Plasma scattering of electromagnetic radiation: theory and measurement techniques [M]. 2nd ed. Pittsburgh: Academic press, 2010.
- [9] Yamada I, Funaba H, Yasuhara R, et al. Calibrations of the LHD Thomson scattering system [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(11): 11E531.
- [10] Nilson D G, Hill D N, Evans J, et al. Thomson scattering stray light reduction techniques using a CCD camera [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, 68(1): 704-707.
- [11] Jacobson C M, Borchardt M T, den Hartog D J, et al. Identification and mitigation of stray laser light in the Thomson scattering system on the Madison Symmetric Torus (MST) [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(11): 11E511.
- [12] van der Meiden H J, Al R S, Barth C J, et al. High sensitivity imaging Thomson scattering for low temperature plasma [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(1): 013505.
- [13] Schlossberg D J, Bongard M W, Fonck R J, et al. Progress on Thomson scattering in the Pegasus toroidal experiment [J]. *Journal of Instrumentation*, 2013, 8(11): C11019.
- [14] Glenzer S H, Redmer R. X-ray Thomson scattering in high energy density plasmas [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2009, 81(4): 1625-1663.
- [15] Hutchinson I H. Principles of plasma diagnostics: second edition [J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2002, 44(12): 2603.
- [16] Berni L A, Albuquerque B F C. Stray light analysis for the Thomson scattering diagnostic of the ETE

- Tokamak[J]. The Review of Scientific Instruments, 2010, 81(12): 123504.
- [17] Kunze H J. Plasma diagnostics [M]//Dinklage A, Klinger T, Marx G, et al. Plasma physics. Lecture notes in physics. Heidelberg: Springer, 2005, 670: 349-373.
- [18] Xiao S M, Hu A L, Chen H, et al. Analysis of baffles for stray light reduction in the Thomson scattering diagnostic on EAST [J]. Fusion Engineering and Design, 2016, 105: 33-38.
- [19] Levesque J P, Litzner K D, Mauel M E, et al. A high-power spatial filter for Thomson scattering stray light reduction [J]. The Review of Scientific Instruments, 2011, 82(3): 033501.
- [20] Xiao S M, Zang Q, Han X F, et al. A new dump system design for stray light reduction of Thomson scattering diagnostic system on EAST [J]. The Review of Scientific Instruments, 2016, 87 ( 7 ): 073506.
- [21] Kumar R, Singh R, Kumar A. Studies on scattering of laser radiation from viewing dump in tokamak Thomson scattering system[J]. Applied Physics B, 2012, 108(2): 325-333.
- [22] Liu W, Mao W, Li H, et al. Progress of the Keda Torus experiment Project in China: design and mission[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2014, 56(9): 094009.
- [23] Thomas M E, Blodgett D W, Hahn D V. Analysis and representation of BSDF and BRDF measurements [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5192: 158-167.
- [24] Brown A M, Hahn D V, Thomas M E, et al. Optical material characterization through BSDF measurement and analysis[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7792: 779211.
- [25] von Finck A, Trost M, Schröder S, et al. Parallelized multichannel BSDF measurements [J]. Optics Express, 2015, 23(26): 33493-33505.
- [26] Schaaf C B, Gao F, Strahler A H, et al. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1/2): 135-148.
- [27] Lucht W, Schaaf C B, Strahler A H. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(2): 977-998.
- [28] Shi W C, Zheng J M, Li Y, et al. Measurement and modeling of bidirectional reflectance distribution function on cutting surface[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1029001.  
史卫朝, 郑建明, 李言, 等. 加工表面双向反射分布函数的测量与建模[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1029001.
- [29] Schröder S, Herffurth T, Blaschke H, et al. Angle-resolved scattering: an effective method for characterizing thin-film coatings[J]. Applied Optics, 2011, 50(9): C164-C171.