

文章编号 1004-924X(2008)10-1841-06

用自制总积分散射仪评估 SiC 基底表面改性效果

申振峰^{1,2},高劲松¹,陈红^{1,2},王笑夷¹,王彤彤^{1,2},郑宣鸣¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100049)

摘要:根据总积分散射理论自制了半球式总积分散射仪,建立了系统规范的测试方法,并应用其对工程中 SiC 基底表面改性的效果进行了相关检测和评估。改性后 RB-SiC 和 S-SiC 基底的散射系数分别降低到 2.86% 和 1.53%,已接近于抛光良好的微晶玻璃的水平(1.38%)。该散射仪的优点是操作简单、方便快捷、不接触样品、对表面无损害。通过对测试数据的分析可知,从散射特性角度对 SiC 基底表面改性效果进行评估是合理有效的。把相关测试结果与分光光度计的测试结果对比,测量偏差在 1.1% 左右,说明该总积分散射仪的测试结果准确可靠。

关键词:总积分散射仪;SiC 反射镜;表面改性

中图分类号:0484.4;TN307 **文献标识码:**A

Evaluation of performance of surface modification for silicon carbide mirror by self-made TIS scatterometer

SHEN Zhen-feng^{1,2}, GAO Jin-song¹, CHEN Hong^{1,2},
WANG Xiao-yi¹, WANG Tong-tong^{1,2}, ZHENG Xuan-ming¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: A Total Integrated Scatterometer (TIS) was manufactured based on the TIS theory for evaluation of the surface modification of SiC mirror. The normative testing methods were established and then the TIS was used to evaluate the performance of the surface modification of SiC mirror. Evaluated results show that the scattering coefficients of RB-SiC and S-SiC are reduced to 2.86% and 1.53%, which are close to that of zerodur (1.38%). The scatterometer has advantages of convenience and rapid operation and no touch to the sample surface in the testing process. Analysis of the testing data shows that it is reasonable and effective to evaluate the performance of the surface modification by scattering characteristics. By comparing the testing results to those of Lambda 900 spectrometer, the difference is only about 1.1%, which means the testing results of TIS are exact and reliable.

Key words: Total Integrated Scatterometer(TIS); SiC mirror; surface modification

收稿日期:2008-05-16;修订日期:2008-06-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60478035)

1 引言

空间光学成像系统对宽光谱、长焦距和大口径的要求日益迫切,与此同时对成像系统的质量要求也越来越高, SiC 材料凭借其优异的物理特性已经成为空间光学系统反射镜镜体制备的首选材料^[1-5]。目前,工程上较为常用的 SiC 坯体制备方法有反应烧结法(RB-SiC)和常压烧结法(S-SiC),但由于制备工艺尚不完善,会在基底中形成多相成分(如 RB-SiC)或产生较高气孔率(如 S-SiC),直接抛光后基底表面仍存在较多的缺陷和较大的气孔率,无法获得较高质量的光学表面^[6],这种情况必然会对入射光产生较强的散射效应,降低光学表面的反射率,从而使整个光学系统无法实现较高的成像质量。因此,为保证 SiC 基底反射镜在空间光学成像系统的正常应用,必须解决基底表面的散射损耗问题,而表面改性即是解决这一问题的主要手段。

表面改性是在 SiC 基底表面生长一层与基底结合牢固的致密的改性涂层(Si 或 SiC)^[7],改性涂层的性能要满足光学抛光的要求,然后再对表面涂层进行光学精抛光,通过这种方法可以在 SiC 基底上获得较为理想的光学表面,降低表面散射损耗,大大提高反射表面的光学性能,从而满足高质量空间光学系统的应用需求^[8]。经过表面改性的 SiC 基底反射镜的光学性能如何,能否满足光学系统性能指标要求,还需要用合理有效的检测方法进行评估。SiC 基底反射镜表面改性的评估方法有很多,本文涉及的散射损耗评估就是其中一种有效的评估方法。利用总积分散射仪可以方便快捷的检测出改性过程中基底表面的散射损耗的大小和变化,从而获知改性过程中基底表面的光学性能,指导改性工作的顺利开展。

2 散射分析

2.1 散射对光学系统的影响

散射特性的决定因素是基体材料和表面粗糙度^[9]。由于烧结 SiC 基底的表面特性,即使直接镀制反射膜(如 Ag 或 Al)后,也会由于基底表面存在较强的散射,反射率仍不十分理想。而对于一个光学系统而言,光学表面散射较大,即会降低

整个系统传递的总能量,从而降低系统的信噪比,使光学系统无法达到较高的性能^[10-11]。对于成像光学系统,杂散光会增加像面上的噪声,降低像面的对比度和调制传递函数,使整个像面的层次减少、清晰度变坏、能量分布混乱甚至形成杂光斑点,严重时使目标信号完全被杂散辐射噪声所淹没^[9,12-13]。尤其对于成像能量微弱的星载光学系统,杂散光会对系统性能产生重大影响,杂散光问题已成为制约空间光学系统性能的主要障碍之一^[14]。因此, SiC 作为空间用光学系统反射镜基底的首选材料,要保障其正常应用,必须设法降低其基底表面的散射损耗,提高表面的光学质量。

2.2 总积分散射理论

基底表面的微粗糙度是产生散射损耗的重要因素,这些散射损耗严重影响薄膜表面镜面反射率。Bennett 和 Porteus 发展了 Davies 的粗糙介质表面反射雷达波的标量散射理论并把它应用于可见光领域^[15], Tomas 和 Daniel 在特殊的应用条件下对相关理论进行了简化处理^[16],给出了总积分散射(TIS)损耗和表面粗糙度(rms)之间较为简单的换算关系。

当一束单色平行光投射到粗糙表面时,它的反射光可分为两部分,一部分是镜面反射光,一部分是漫反射光或散射光,而两部分的总和称为总反射光或半球反射光。如果设 R_t 为总反射辐射, R_d 为散射辐射, R_s 为镜面反射辐射, n_i 为入射介质的折射率, θ_i 为入射角, δ 为 rms 值,则基底表面的总积分散射 TIS 可表示为:

$$\text{TIS} = \frac{R_d}{R_t} = \frac{R_d}{R_d + R_s} \approx 1 - \exp\left[-\left(\frac{4\pi n_i \cos\theta_i \delta}{\lambda}\right)^2\right], \quad (1)$$

当表面粗糙度远远小于入射波长($\delta \ll \lambda$)时:

$$\text{TIS} \approx 1 - \exp\left[-\left(\frac{4\pi n_i \cos\theta_i \delta}{\lambda}\right)^2\right] \approx \left(\frac{4\pi n_i \cos\theta_i \delta}{\lambda}\right)^2, \quad (2)$$

在空气中垂直入射的情况下又可表示为:

$$\text{TIS} \approx \left(\frac{4\pi n_i \cos\theta_i \delta}{\lambda}\right)^2 \approx \left(\frac{4\pi \delta}{\lambda}\right)^2. \quad (3)$$

由式(1)~(3)可知,在空气中垂直入射的情况下,如果入射光为一定频率的单色光(如激光),则粗糙表面 TIS 与粗糙度均方根值 δ^2 之间存在着简单的正比关系。即随着粗糙度 δ 的增加,粗糙表面 TIS 急剧上升,从而导致表面镜面反射率

的急剧降低,变化十分灵敏。因此,要减少 SiC 基底表面散射损耗,提高光学表面质量,以获得更高表面反射率,必须设法降低 SiC 基底反射镜的表面粗糙度。

3 实 验

3.1 自制总积分散射仪

在 SiC 基底改性(抛光)过程中需要对改性效果进行检测和评估,以指导改性工作的顺利进行。本实验采用在光学平台上自行搭建的半球式总积分散射仪,通过对改性基底表面散射损耗的测试达到对改性效果进行评估的目的。图 1 所示为该半球式总积分散射仪结构原理图。输入光源采用单色性和稳定性能较好的半导体激光器,工作波长为 635 nm。利用积分球采集相关的光信号,然后通过光电倍增管和锁相放大器把采集到的光信号转换成电信号,经过锁相放大处理,以电压数值的形式输出显示。由于散射光信号相对于入射光和反射光信号来说十分微弱,为保证测量的准确性,测量系统必须能够有效地鉴别并收集散射光信号,同时要尽可能地消除系统有害噪声的干扰。此系统中利用斩波器对输入光信号进行调制,然后通过锁相放大器放大有用信号,同时剔除噪声信号的干扰。此外,为更好地消除有害信号的干扰,测试过程在暗室环境下进行,在测量之前还要先测量一下仪器系统本身的背景噪声,然后在测试数据的处理过程中扣除背景噪声的影响。

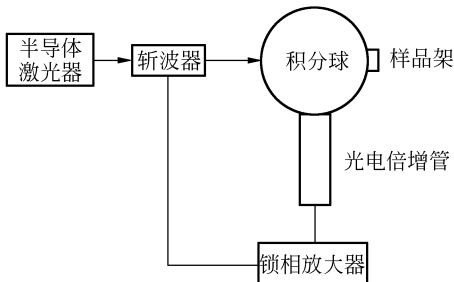


图 1 半球式积分散射仪结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of TIS scatterometer

相关测试数据的数值关系如下:

$$\text{TIS} = \frac{R_d}{R_t} = \frac{E_d}{E_t} = \frac{E_d}{E_d + E_s} = \frac{V_d}{V_d + V_s}, \quad (4)$$

其中, E_t 为总反射光能量, E_d 为散射光能量, E_s

为镜面反射光能量, V_d 为散射光电压值, V_s 为镜面反射光电压值。

3.2 积分散射测量

基底表面散射效应的强弱反应了基底表面光学质量的高低。因此,可以直接通过测量基底表面散射情况来检测改性前后 SiC 基底表面的光学性能,对改性效果进行评估。只要测得总入射辐射 V_t 、散射辐射 V_d 、镜面反射 V_s 和背景信号等数值 V_b (以电压形式显示),就可以计算出镜面反射率 ρ 、半球反射率 ρ' 和散射系数 η (TIS) 等相关量。

相关量计算关系式如下:

镜面反射率:

$$\rho = \frac{V_s - V_b}{V_t - V_b}, \quad (5)$$

半球反射率:

$$\rho' = \frac{V_s + V_d - V_b}{V_t - V_b}, \quad (6)$$

散射系数:

$$\eta = \frac{V_d - V_b}{V_s + V_d - V_b}, \quad (7)$$

相关量的具体测试方法:

(1) 使入射激光束直接从积分球的中心穿出,采集背景信号 V_b ;

(2) 使入射激光束进入积分球内并投射到出光口附近的内壁上,测得总入射辐射 V_t ;

(3) 将待测样品垂直放在样品架上并紧贴积分球出光口,激光束以小角度 ($< 5^\circ$) 入射到样品上,并使样品表面的镜面反射光从积分球入口输出,测得样品的散射辐射 V_d ;

(4) 将激光束以小角度 ($< 5^\circ$) 直接投射到待测样品表面,然后使反射光进入积分球内并投射到出光口附近的内壁上,测得镜面反射 V_s 。

4 实验结果及分析

实验中选取了抛光良好的微晶玻璃、未改性的 RB-SiC 和 S-SiC、改性后的 RB-SiC 和 S-SiC 共 5 种样品进行了相关测试,样品都为 $\Phi 35$ mm 左右的平面基底。改性抛光采用传统抛光法,优点在于加工后表面中、高频面形误差很小^[17],可以很好地消除加工过程可能产生的波纹误差对表面总积分散射的影响。图 2 所示为 S-SiC 基底表面改性抛光后的面形测试图,面形精度达到 0.158λ (PV) 和 0.021λ (rms),其 rms 值优于

($1/40$) λ 。这种情况下可以近似认为样品表面的总积分散射主要由表面微粗糙度产生,因而样品表面的总积分散射情况直接反映了表面微粗糙度的高低,利用总积分散射情况评价 SiC 基底表面改性的效果是合理有效的。

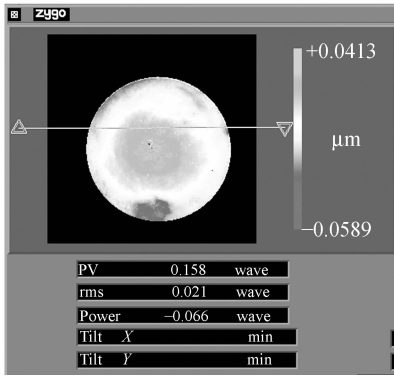


图 2 改性后样品表面形貌测试图

Fig. 2 Tested result after surface modification

为达到较好的测试效果,测试前各样品表面都在相同的条件下镀制了一层 Ag 反射膜,同时为尽量减小 Ag 膜对基底表面情况的影响,膜层

厚度不易过大,120 nm 左右为宜。各样品测试结果如表 1 所示。从表 1 可以明显看出,正是由于散射损耗的存在,使得基底表面的镜面反射率要小于对应的半球反射率,而且基底表面光学质量越差,其散射效应越强,镜面反射率与对应的半球反射率的差值也就越大,其镜面反射率也就越低。因此,可以得出结论:基底表面散射效应的强弱很好地反映了基底表面光学质量的高低。测试数据还表明,未改性的 SiC 基底表面的半球反射率相对于其它样品的数值要小,这是因为未改性的 SiC 基底表面质量较差,存在较多的缺陷和孔洞,除了一部分所能探测得的面散射之外,还存在一部分无法探测到的体散射。参照于抛光良好的微晶玻璃基底(散射系数 1.38%),未经过改性 SiC 基底表面散射系数较大,表面光学质量较差,而经过改性后 SiC 基底表面散射系数大大降低(RB-SiC 降低接近于 8%),对应的镜面反射率也大幅提高,基底表面质量获得较大提升。改性后 RB-SiC 的散射系数提高到 2.86%,S-SiC 提高到 1.53%,已接近于抛光良好的微晶玻璃的水平,改性后的 SiC 基底反射镜已经能够满足高质量的空间光学系统的应用要求。

表 1 总积分散射仪测试结果及相关量的计算值

Tab. 1 Measurement and calculation results by TIS

样 品	总入射 V_t (mV)	散射 V_d (mV)	镜反射 V_s (mV)	背景信号 V_b (mV)	镜反射率 ρ (%)	半球反射率 ρ' (%)	散射系数 η (%); TIS
微晶玻璃	604	8.75	590.6	0.5	97.78	99.23	1.38
RB-SiC(未改性)	604	64.1	532.9	0.5	88.22	98.84	10.66
RB-SiC(改性)	604	17.6	581.8	0.5	96.32	99.24	2.86
S-SiC(未改性)	604	22.6	575.4	0.5	95.26	99.01	3.70
S-SiC(改性)	604	9.64	589.4	0.5	97.58	99.18	1.53

为验证该自制总积分散射仪测量的可靠性,又应用 Lambda 900 分光光度计对相关样品的反射率进行了测量。两种仪器在波长 635 nm 处的测试结果及对比统计见表 2。从表 2 数据可以看出,相同情况下总积分散射仪的测试结果要低于分光光度计的测试结果,其差值在 1.1% 左右浮动,这主要是由于总积分散射仪的系统误差(如积分球的传输效率不可能达到 100%)和测量的随机误差造成的。但从总体上分析,两种仪器测得的结果是趋于一致的,误差大小在允许的范围之内,这充分说明该总积分散射仪的测试结果是可

表 2 两种仪器测量反射率结果及对比统计($\lambda=635$ nm)

Tab. 2 Comparison of reflectivity measurement results by two instruments($\lambda=635$ nm)

样 品	分光光度计 ρ_1 (%)	总积分散射仪 ρ_2 (%)	反射率差值 $\Delta\rho=\rho_1-\rho_2$ (%)
微晶玻璃	98.85	97.78	1.07
RB-SiC(未改)	89.40	88.22	1.18
RB-SiC(改性)	97.45	96.32	1.13
S-SiC(未改)	96.48	95.26	1.22
S-SiC(改性)	98.72	97.58	1.14

靠的。此外,根据实际需要还可利用总积分散射仪的测试结果由总积分散射理论推算出基底表面的粗糙度(rms)^[18]。

5 结 论

从散射特性角度对 SiC 基底表面改性效果进行评估是合理有效的。经过表面改性, RB-SiC 和 S-SiC 基底的散射系数分别降低到 2.86% 和 1.53%,已接近于抛光良好的微晶玻璃的水平

(1.38%)。相同情况下,总积分散射仪的测试结果与 Lambda 900 分光光度计的相关测试结果仅相差 1.1% 左右,说明该总积分散射仪的测试结果是可靠的。总积分散射仪的优点是操作简单、方便快捷、不接触样品、对表面无损害、测量精度较高。其不足是入射光频率单一,无法反映基底对不同频率入射光的散射情况和散射光的空间分布情况。即便如此,该总积分散射仪对于检测和评估 SiC 基底表面改性的效果并指导改性工作的进行都是一种十分合理有效的手段。

参考文献:

- [1] PALUSINSKI I A, GHOZEIL I. Developing SiC for optical system applications[J]. *SPIE*, 2004, 5524:14-20.
- [2] ENG R, CARPENTER J R, FOSS J R CA, *et al.*. Cryogenic performance of a lightweight Silicon Carbide mirror [J]. *SPIE*, 2005, 58680:1-8.
- [3] EBIZUKA N, DAI Y, ETO H, *et al.*. Development of SiC ultra light mirror for large space telescope and for extremely huge ground based telescope[J]. *SPIE*, 2003, 4842:329-334.
- [4] 牛海燕, 张学军. $\Phi 124$ mm 口径碳化硅质非球面镜面数控研抛技术研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4):539-544.
- NIU H Y, ZHANG X J. Research on computer controlled polishing technology of $\Phi 124$ mm aspheric reaction-burned silicon carbide mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):539-544. (in Chinese)
- [5] 张舸, 赵汝成, 赵文兴. 大尺寸轻型碳化硅质镜体的制造与材料性能测试[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(5):759-763.
- ZHANG G, ZHAO R CH, ZHAO W X. Fabrication and test of large scale light-weight SiC mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5):759-763. (in Chinese)
- [6] GOELA J S, PICKERING M A, TAYLOR R L. Chemical-vapor-deposited silicon and silicon carbide optical substrates for severe environments [J]. *SPIE*, 1990, 1330:25-39.
- [7] MAGIDA M B, PAQUIN R A, RICHMOND J J. Dimensional stability of bare and coated reaction bonded silicon carbide[J]. *SPIE*, 1990, 1335:60-68.
- [8] 陈红, 高劲松, 宋琦, 等. 离子辅助制备碳化硅改性薄膜[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(3):381-385.
- CHEN H, GAO J SH, SONG Q, *et al.*. Si modified coating on SiC substrate by ion beam assisted deposition[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3):381-385. (in Chinese)
- [9] 郝云彩, 肖淑琴, 王丽霞. 星载光学传感器消杂光技术现状与发展[J]. *中国空间科学技术*, 1995, 3:40-50.
- HAO Y C, XIAO SH Q, WANG L X. Status and development of stray light elimination technology for space-borne optical sensors[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 1995, 3:40-50. (in Chinese)
- [10] HARVEY J E, VERNOLD C L. Transfer function characterization of scattering surfaces-revisited[J]. *SPIE*, 1997, 3141:113-127.
- [11] KOTHA A, HARVEY J E. Scattering effects of machined optical surfaces[J]. *SPIE*, 1995, 2541:54-65.
- [12] 岑兆丰, 李晓彤, 朱启华. 光学系统杂散光分析[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(3):300-304.
- CEN ZH F, LI X T, ZHU Q H. Stray light analysis for optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3):300-304. (in Chinese)
- [13] 黄强. 空间光学系统的杂散光分析[J]. *红外*, 2006, 27(1):26-33.
- HUANG Q. Analysis of stray light in space optical system[J]. *Infrared*, 2006, 27(1):26-33. (in Chinese)

- [14] 原育凯. 光学系统杂散光的消除方法[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(1):6-10.
YUAN Y K. Stray light suppressing measure of optical system[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(1):6-10. (in Chinese)
- [15] BENNETT H E, PORTEUS J O. Relation between surface roughness and specular reflectance at normal incidence [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1961, 51(2):123-129.
- [16] LINDSTROM T, RONNOW D. Total integrated scattering from transparent substrates in the infrared region—validity of scalar theory [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(2):478-487.
- [17] TUELL M T, BURGEJ H, ANDERSON B. A spheric optics: smoothing the ripples with semiflexible tools [J]. *OE Letters*, 2003, 41(7):1473-1474.
- [18] 侯海虹, 洪瑞金, 张东平, 等. 测量薄膜微粗糙度的总积分散射仪[J]. 中国激光, 2005, 32(9):1258-1261.
HOU H H, HONG R J, ZHANG D P, *et al.*. Total integrated scatterometer for measuring the microroughness of optical thin films[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(9):1258-1261. (in Chinese)

作者简介: 申振峰(1977—), 男, 吉林人, 博士研究生, 主要从事光学薄膜和 SiC 表面改性的研究。E-mail: zf_shen@163.com

导师简介: 高劲松(1968—), 男, 吉林白城人, 博士, 研究员, 主要从事光学薄膜的前沿研究、特种光学薄膜及雷达隐身相关领域的研究。E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn

● 下期预告

一种新型单元的频率选择表面

贾宏燕^{1, 2}, 高劲松¹, 冯晓国¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

通过对传统的十字单元进行改进, 设计了一种新型单元的频率选择表面(FSS)。利用模式匹配法, 从理论上对传统十字单元 FSS 和这种新型单元 FSS 进行了对比分析, 对 TE 波入射时角度变化和大角度入射时极化方式变化对中心频率的影响进行了研究, 并采用镀膜和光刻技术制备了新型单元 FSS 的实验样件, 在微波暗室中进行测试, 得到的实验曲线与理论仿真曲线基本一致。结果表明, 传统十字单元 FSS 不能实现中心频率的角度稳定性, TE 波 0° 到 45° 时中心频率漂移为 300 MHz, 45° 入射时中心频率的极化稳定性很差, 漂移量为 800 MHz, 而新型单元 FSS 具有中心频率的角度稳定性, TE 波 0° 到 45° 入射中心频率漂移量仅为 100 MHz, 同时对于大的入射角度, 具有中心频率的极化稳定性。