

文章编号:1004-4213(2011)04-0573-5

激光陀螺基片散射收集系统的设计与分析

杨开勇,魏志猛,龙兴武,刘贱平

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院 光电工程系,长沙 410073)

摘 要:研究了散射测量在激光陀螺用石英基片表面检测中的应用.比较发现,收集物镜比积分球更有利于体散射的消除,更适用于直接检测超光滑石英基片表面的散射测试系统.用 ZEMAX 设计了散射光收集物镜,使其数值孔径达到了 0.4,并完全消除了轴上距离大于 1.5 mm 的散射点的体散射;为了消除光电倍增管输出本身随时间长漂的问题,设计了特定的散射光收集系统的结构,将散射光和反射光分时打在同一个光电倍增管上.分析发现,这种设置能有效消除光电倍增管输出随时间趋势性漂移的问题,增强了系统长时间的稳定性,有效保障了其工程实用性.

关键词:表面粗糙度;表面散射;体散射;石英基片;激光陀螺

中图分类号:TH742

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114004.0573

0 引言

研制高性能的激光陀螺,对其反射镜表面提出了相当苛刻的要求,研究其表面损耗情况并精确检测是非常关键的.反射镜的光学损耗包括吸收损耗和散射损耗,吸收损耗跟薄膜及基片的材料有关,而散射损耗则与表面粗糙度有直接的对应关系.若要求反射镜的散射损耗小,首先是镀膜前的基片表面超光滑(表面均方根粗糙度为亚纳米级甚至亚埃级)^[1-2],因此在基片加工及镀膜工艺中,基片表面质量的检测是重要的检测项目.

采用光散射法直接测试超光滑石英基片时,有四个问题是不可避免的^[3]:1)由于石英基片表面的反射率较小,因此基片的表面散射强度也很低;2)在石英基片的上、下表面之间可能形成多次反射,而且多次反射在空间上是分离的;3)石英基片的体散射对测试结果有一定贡献;4)散射场是由前、后表面散射场共同组成的.对于第一个问题,可以通过尽可能压制系统的背景光水平从而提高系统的最低分辨水平来解决;而对于透明基片的后表面反射及散射问题,由于入射光点在后表面和前表面有较大的分离(在横向上有约 2.7 mm 的间隔),相对来说比较容易去除,因此最难处理的就是基片的体散射对测试结果的影响.尽管石英的体散射比较小,但是对于高精度激光陀螺应用的基片来说,其体散射量级已

超过了表面散射的量级,因此如果不想办法尽可能去除的话,它将极大地影响石英基片散射测试系统的最低分辨能力.通常,消除石英基片的体散射的方法是在基片表面镀上一层 Al 膜后再进行测量,但这样不仅可能会增加表面散射,同时也破坏了表面性状,不适用于激光陀螺应用.

积分散射法作为检测薄膜和不透明表面质量的手段已经被广泛采用,国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)甚至制定了积分散射测试标准^[4-5].但是,运用散射光进行透明基片的测试,一直鲜有报道^[6-7].仅有的几篇报道也主要集中在对基片表面散射的理论研究.1988年,Dirk-Roger Schmitt 运用积分散射的方法对激光陀螺用基片表面进行了检测^[1].试验中,他采用了特殊结构对后表面散射进行了去除,但没有考虑体散射的影响,因此当 BK7 基片表面均方根粗糙度低到 0.12 nm 时,散射测量结果与 zygo 5500 型外差光学轮廓仪的测量结果相差甚远,主要是由于体散射对测试结果有较大的贡献.1994年,德国的 Oliver Kienzle 从理论上详细分析了基片表面散射的分布和特征,并从理论上推导了利用积分散射对基片表面散射进行测试的方法^[3].在此基础上,设计制作了分辨极限为 0.1 ppm 的积分散射仪,并对基片表面散射进行了测试.在其理论推导和实验检测过程中,没有考虑体散射对测试结果的影响.以上

基金项目:国防预研重点项目资助

第一作者:杨开勇(1974-),男,副教授,博士,主要研究方向为光学薄膜与光学检测. Email:muyiky@163.com

收稿日期:2010-06-18;修回日期:2010-11-22

两种仪器都是采用积分球作为散射光的收集器件,它的好处是收集角度范围大,而且积分散射仪有相应的规范可供参考,但由于积分球的特定结构,决定了它很难有效去除基片体散射对其测试结果的影响.对于激光陀螺用基片来说,由于基片表面非常光滑,通常其表面均方根粗糙度(Root Mean Square, RMS)只有 0.1 nm,甚至更低,因此通常体散射比表面散射更强,如果不对体散射进行有效去除的话,就会导致由于体散射的影响而不能准确判断表面散射的大小.

本文在仔细分析散射测试系统的特点及原理的

基础上,设计了散射光收集物镜的光学和机械结构,使其数值孔径达到了 0.4,并对体散射的影响进行了有效的压制;同时通过对收集系统的结构进行设计,使散射光和反射光分时打在同一个光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)上,有效地消除了 PMT 随时间长漂的问题,大大增强了系统的稳定性.

1 散射收集系统光路

石英基片散射收集系统光路见图 1.

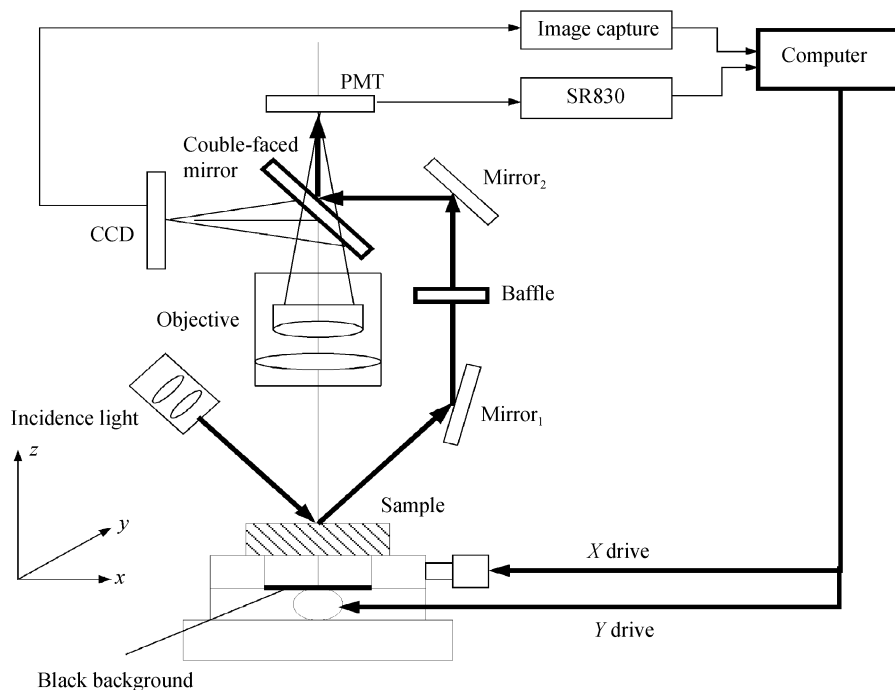


图 1 收集系统光路

Fig. 1 Diagram of light path of collecting system

图 1 中,经过光路准备系统的激光以 45° 角入射到被测石英基片样品上,其产生的散射光由收集物镜聚焦到 PMT 或者 CCD 上,反射光经过高反镜 1 和高反镜 2 的偏转后入射到 PMT 或者 CCD 上,透射光通过被测石英基片样品后被黑背景吸收. CCD 和 PMT 位置共轭,都处在物镜的焦平面上,这样可以保证 CCD 看到的视场与 PMT 一致.下面对系统的几个关键问题进行说明.

1.1 CCD 的作用

系统中 CCD 主要起两个方面的作用,一是作为光路调整是否到位的判断标准.调整光路时,首先将被测石英基片样品安装到载物台上, z 方向上下移动载物台,直到 CCD 中被测样品上的激光光斑成像清楚时,就认为被测样品安装到位.然后开始调整反射光路,首先将双面高反镜取出,调节高反镜 1 和 2 使光点打在 CCD 的中心,以此作为反射光路调整到

位的判断标准.每次更换样品时, z 方向上下移动载物台,直到反射光点打在 CCD 的中心,就认为样品安装到位.二是作为每次测试时,进行样品表面位置(x 、 y 方向)选择的观察窗.测试时,为了保证测试点处没有疵病或灰尘出现,每次测试之前,先通过 CCD 观察,若发现视场中有疵病或灰尘出现,则在 x 或 y 方向上移动载物台,直到视场中没有疵病或灰尘出现时,再开始测试.测试过程如下:

1) 安装被测基片样品.先取出双面反射镜,在 z 方向上移动被测基片样品,使反射光点打在 CCD 的中心位置.

2) 测试反射光强.装入双面高反镜,将挡板从反射光路移开(如果处在反射光路的话),用 CCD 观察并记录被测点,同时用 PMT 测试反射光强.

3) 测量散射光强.将挡板移入反射光路(挡住反射光线),同时取出双面高反射镜,测试散射光强.

4)将散射光强除以反射光强的值作为本次测试的结果。

1.2 散射光和反射光共用一个 PMT

本系统是直接针对激光陀螺用基片表面散射的检测应用的,而激光陀螺用基片表面的均方根粗糙度很低,通常只有 0.1 nm 以下的量级(原子力显微镜测试结果),因此对测试系统的准确度和稳定性提出了很高的要求.系统中使用的光电倍增管为滨松公司的 5784-20 型 PMT,实验测试了其自身的稳定性,发现其自身存在一个随时间的长漂.实验中,用一只 24 h 稳定度达到万分之 2 以下的微晶玻璃 He-Ne 激光器作为光源^[16],激光器用黑色的外壳进行封装,在封装外壳的激光出口处安装高倍衰减片(这样可以确保激光器辉光对测试结果没有影响),将激光器的输出功率衰减到 nW 量级以下,直接入射到 PMT,其测试结果如图 2.

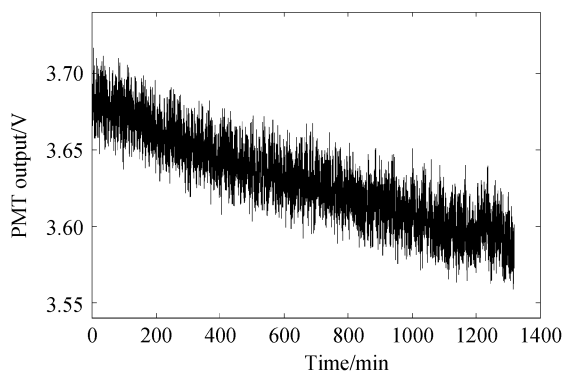


图 2 PMT 输出电压随时间的变化
Fig. 2 Output voltage of PMT vs time

从图 2 中可以看到,光倍管的输出电压的均值并不恒定,而是呈现出一个下降的趋势,而且开始时下降得较快,随着时间的推移下降的速度逐渐减慢,其稳定度为 7.7%.这与滨松 PMT 使用手册的测试数据(如图 3)是非常吻合的,图 2 的横坐标是对数坐标.

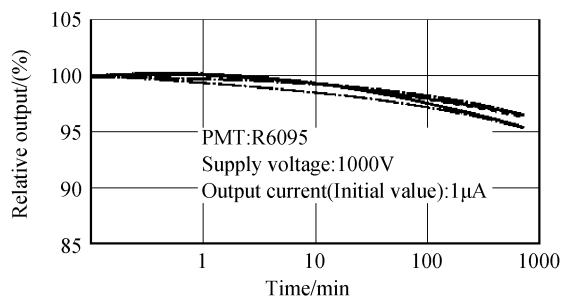


图 3 滨松 PMT 稳定性测试数据
Fig. 3 Relative output of PMT from Hamamatsu vs time

图 2 中的数据是在假设相邻两个测量数据是由功率完全相同的两个光源发出,分时打在 PMT 上测量得到的,类似于实际系统中散射光和反射光分时打在 PMT 上,只是实际系统中散射光和反射光

的功率可能不同而已.将相邻两个数据点相除,其结果如图 4.从图 4 可以看出,相邻两个数据点的比值随时间没有趋势性的变化,类似于白噪音,而且稳定度明显提高,达到了 1.3‰.

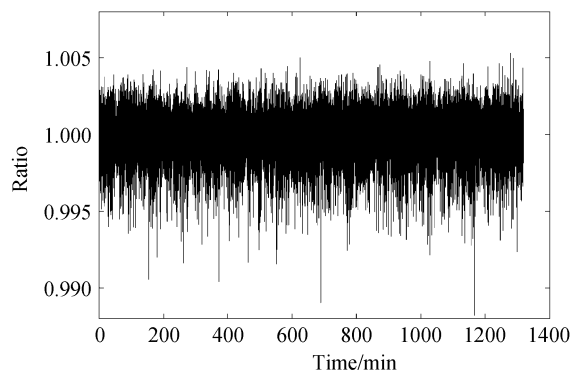


图 4 相邻两个数据点比值随时间的变化
Fig. 4 Ratio between the two adjacent data vs time

2 散射物镜的设计与分析

本文采用物镜自己设计制作作为表面散射收集元件,它的基本要求是有尽可能大的收集角度(即数值孔径要尽可能大),同时要尽可能消除体散射的影响.由于基片内部的介电常量不可能完全理想的均匀分布(即总是存在着一定程度的介电常量起伏),当光线通过基片时,不均匀的介电常量分布就会引起体散射,因此体散射只会出现在基片内光线通过的路径上.光线通过透镜内部时,光线路径上的每一点都可以被看成是一个体散射点,设计物镜时,如果把物镜的景深设计得尽可能短,则超过景深范围内的体散射点的体散射就不可能通过物镜聚焦到探测器上,这样就消除了其对测试结果的影响.

在 ZEMAX 中对所需的物镜进行了设计,最后得到的物镜由 5 片玻璃构成(如图 5),工作距离为 15 mm,数值孔径为 0.4(即散射光收集半角为 23.6°),放大倍数为 10 倍,物面到像面的距离只有 129 mm.



图 5 显微物镜结构
Fig. 5 Structure of objective

通过前面的光路准备系统以后,入射到基片表面的激光光斑直径约为 0.4 mm,以 45° 角入射到被测基片上(如图 6),因此透射光线在基片内的折射角约为 29° ,体散射就是由在基片内的折射光线照亮基片材料形成的,表 1 给出了在基片内折射光线上的不同点,其散射能量能进入探测器的比例(表中轴上距离是指散射点在 z 方向上距离被测点的距

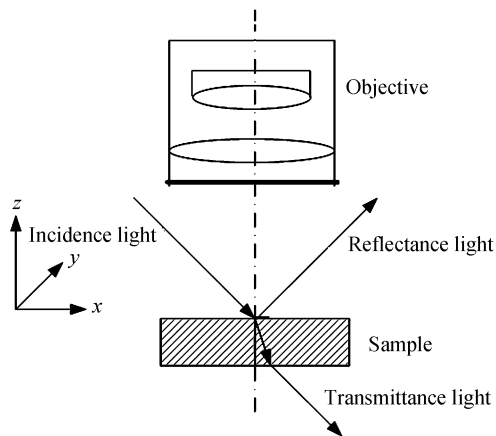


图6 激光在被测样片上的反射和透射

Fig.6 Reflectance and transmittance of laser on sample

表1 PMT探测能量的比例与轴上距离的关系
Table 1 Relationship between the ratio of energy detected by PMT with the axile distance

Axile distance/mm	Object height/mm	Ratio of energy detected by PMT/(%)
0.1	0.055 5	100
0.2	0.111 0	100
0.3	0.166 5	100
0.4	0.222 0	100
0.5	0.277 5	96.81
0.6	0.333 0	71.96
0.7	0.388 5	50.81
0.8	0.444 0	35.56
0.9	0.499 5	24.50
1.0	0.555 0	16.48
1.1	0.610 5	10.64
1.2	0.666 0	6.60
1.3	0.721 5	3.72
1.4	0.777 0	1.65
1.5	0.832 5	0.46
1.6	0.888 0	0.03
1.7	0.943 5	0.00

离,物点高是指体散射点在横向上距离被测点的距离)。

从表1可以看出,当体散射点的轴上距离超过1.5 mm后,其散射能量完全不能进入探测器,因此其体散射的消除是非常理想的。

3 结论

本文对散射测量在激光陀螺用石英基片表面检测中的应用展开研究,在仔细分析积分球和收集物镜在基片散射测试系统中的优劣的基础上,设计了散射光收集物镜的光学和机械结构,使其数值孔径达到了0.4,并完全消除了轴上距离大于1.5 mm的散射点的体散射;同时对收集系统的结构进行了设计,将散射光和反射光分时打在同一个光电倍增管(PMT)上,有效地消除了探测器输出本身随时间

长漂的问题,增强了系统长时间的稳定性,有效保障了其工程实用性.系统的实验研究正在进行中,其结果将另文发表。

参考文献

- [1] SCHMITT Dirk-Roger. Characterization of mirror surfaces for laser-gyro applications[C]. *SPIE*, 1988, **1009**: 155-164.
- [2] SKELDON K D, MACKINTOSH J, GRADOWSKI M V, *et al.* Qualification of supermirrors for ring-laser-gyros based on surface roughness and scatter measurements[J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2001, **3**(3): 183-187.
- [3] KIENZLE O, STAUB J, TSCHUDI T. Light scattering from transparent substrates: Theory and experiment[J]. *Physical Review B*, 1994, **50**(3): 1848-1860.
- [4] GUENTHER K H, WIERER P G, BENNETT J M. Surface roughness measurements of low-scatter mirrors and roughness standards[J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(21): 3820-3836.
- [5] ANGELA D, JOSEP F B, STEFAN G, *et al.* Surface characterization techniques for determining the root-mean-square roughness and power spectral densities of optical components[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(1): 154-171.
- [6] HOU Hai-hong, Hong Rui-jin, ZHANG Dong-ping, *et al.* Total integrated scatterometer for measuring the microroughness of optical thin films[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(9): 1258-1261.
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.
- [7] MATTSSON, LARS H. Characterization of supersmooth surfaces by light scattering techniques[C]. // BENNETT J M. *Surface Measurement and Characterization SPIE*, 1988, **1009**: 165-171.
- [8] KIENZLE O, STAUB J, TSCHUDI T. Description of an integrated scatter instrument for measuring scatter losses of 'superpolished' optical surfaces[J]. *Meas Sci Technol*, 1994, **5**(6): 747-752.
- [9] KIENZLE O, SCHEUER V, STAUB J, *et al.* Design of an integrated scatter instrument for measuring scatter losses of superpolished optical surfaces, application to surface characterization of transparent fused quartz substrates[C]. *SPIE*, 1994, **2253**: 1131-1142.
- [10] ZERRAD M, DEUMIE C, LEQUIME M, *et al.* Light-scattering characterization of transparent substrates [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(7): 1402-1409.
- [11] HOU Hai-hong, YI Kui, ZHANG Shu-zhen, *et al.* Measurement of light scattering from glass substrates by total integrated scattering[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(29): 6163-6166.
- [12] TRUCKENBRODT H, DUPARRE A, SCHUHMAN U. Roughness and defect characterization of optical surfaces by light scattering measurements[C]. *SPIE*, 1992, **1781**: 139-151.
- [13] LINDSTROEM T, ROENNOW D. Total integrated scattering from transparent substrates in the infrared region: Validity of scalar theory[J]. *Opt Eng*, 2000, **39**(2): 478-487.
- [14] HOU Hai-hong, HONG Rui-jin, FAN Zheng-xiu, *et al.* Measurement of surface and volume scattering of glass substrates with high finish [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(4): 609-611.
侯海虹,洪瑞金,范正修,等. 高光洁度玻璃基片的表面散射和体散射测量[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(4): 609-611.

Design and Analysis of the Scattering Light Collection System for Substrates in Laser-gyro

YANG Kai-yong, WEI Zhi-meng, LONG Xing-wu, LIU Jian-ping

(*Department of optoelectronic Engineering, College of Optoelectronic Science & Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China*)

Abstract: Application of light scattering measurement in the inspection of fused silica substrates for laser-gyro application was studied. It was found that collecting objective is more propitious to eliminate volume scattering than integrating sphere and more appropriate to the measurement of scattering light for directly detecting supersmooth surfaces of fused silica substrates. Collecting objective(N. A. is 0.4) was designed by ZEMAX and volume scattering from points whose axile distances are more than 1.5 millimeters was eliminated completely. To solve the drift problem of photomultiplier tube, specific structure of collecting system was designed, so that scattering light and reflecting light can strike on the same photomultiplier tube on separate time. It was found that the drift problem of photomultiplier tube can be solved with this setting, so that the stability of the scattering measurement system over long time span can be improved greatly and its practicability in engineering is ensured.

Key words: Surface roughness; Surface scattering; Volume scattering; Fused silica substrate; Laser-gyro