

·测试、试验与仿真·

## 复色光总积分散射测量技术研究

赵晓琛<sup>1,2</sup>, 曹学东<sup>1</sup>, 胡明鹏<sup>1</sup>

(1.中国科学院光电技术研究所, 成都 610209; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**目前总积分散射测量装置都是单波长的,不能测量复色光源的总积分散射量。先建立了一个积分球模型,并对这个积分球模型的光源和材料进行仿真分析。光源的分析包括波长和光源面积,材料的分析验证了该积分球模型和设定光路的可行性,并最终根据仿真的结果对实际实验进行有效指导,搭建了一套基于积分球的单波长总散射量测量装置,选取了650 nm、520 nm和450 nm三个波长的半导体激光光源进行实验,得到了多组各个不同波长下的TIS值。通过对实验结果的分析,发现TIS值与波长的平方成反比关系,符合总积分散射理论中TIS与波长的关系。

**关键词:**总积分散射;复色光;积分球

中图分类号:O432.2

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2016)-02-0065-05

## Research on Measurement Technology of Total Integral Scattering with Multi-color

ZHAO Xiao-chen<sup>1,2</sup>, CAO Xue-dong<sup>1</sup>, HU Ming-peng<sup>1</sup>

(1. Institute of Optics and Electronics of Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

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

**Abstract:** Total integral scattering measurement devices are single wavelength and the amount of total integral scattering of multi-color light sources can not be measured. An integral sphere model is established, the light source and the material of the model are simulated and analyzed. Light source analysis includes wavelength and light source area. By analyzing the material of the model, the feasibility of the model and light path is demonstrated. According to the final simulation result, the experiment is effectively guided to build a single wavelength total scattering measurement device based on integral sphere. The semiconductor laser light source with 650 nm, 520 nm and 450 nm is chosen to obtain groups of total integral scattering (TIS) values in different wavelength. By analyzing experimental results, TIS value is inversely proportional to the square of the wavelength, which accords with the theory of TIS.

**Key words:** total integral scattering (TIS); multi-color; integral sphere

高反射率镜表面的粗糙度、划痕以及表面疵病是产生散射损耗的重要因素,而且当光源功率较大时,这些散射损耗对光学系统的影响也会随着光源功率的增大而增大。因此,测量光学元件的表面散射,对研究光学元件的散射损耗和获取表面微观几何形状的信息具有重要的意义<sup>[1]</sup>。总积分散射法通过对散射场的统计来表征表面特性,它为非接触式

的散射测量技术,不会损伤样品表面,具有仪器结构简单、易于测量、测量精度高、不易受环境因素影响等优点,可被广泛应用于光学加工尤其是高精度光学加工的质量控制中<sup>[2-4]</sup>。但是目前总积分散射测量装置都是基于光源是单波长的情况,不能测量复色光的总积分散射量。针对这种情况,提出了以下解决方案。首先测出三组单波长的总积分散射

收稿日期:2016-02-23

作者简介:赵晓琛(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为光学工程。

量,然后根据标量散射理论,得到TIS与波长之间的数值关系,最后再根据光源的光谱能量分布与推导的TIS与波长的数值关系,得到复色光的总积分散射量。

## 1 标量散射理论

从目前的加工技术来说,一块光学镜面不可能是完全光滑的,总是会存在表面粗糙度和各种各样可能的表面缺陷,而光学元件表面的粗糙度、疵病以及划痕会导致散射。如图1所示。

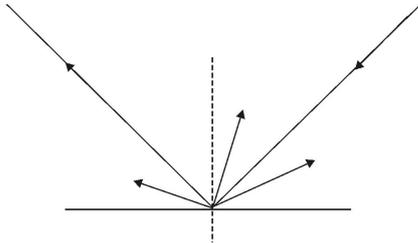


图1 反射散射示意图

当一束单色平行光投射到光学元件表面时,它的反射光会分为两部分,一部分是镜面反射光;另一部分是散射光,总反射光包含了这两部分的总和<sup>[5]</sup>。镜面反射光和散射光的强弱均会随着表面粗糙度等影响因子的改变而发生改变。如果一块镜面越光滑,镜向反射光就会越强,散射光就越弱;如果一块镜面表面越粗糙,镜向反射光就会越弱,散射光就

越强<sup>[6]</sup>。

如果 $R_0$ 是总反射辐射; $R_d$ 是散射辐射; $R_s$ 是镜面反射辐射; $n_i$ 是入射介质的折射率; $\theta_i$ 为入射角, $\sigma$ 是RMS值,则表面的总积分散射TIS可表示为<sup>[5]</sup>

$$TIS = \frac{R_d}{R_0} = \frac{R_d}{R_d + R_s} \approx 1 - \exp\left[-\left(\frac{4\pi n_i \cos \theta_i \sigma}{\lambda}\right)^2\right] \quad (1)$$

当表面粗糙度远远小于入射波长( $\sigma \ll \lambda$ )时,有下式

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

在空气中垂直入射的情况下又可表示为

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

由式(3)可知,当在空气中垂直入射时,TIS的值仅与入射光的波长以及粗糙度均方根值有关。由于试验样品是一块高反镜,因此该样品的粗糙度均方根值很小,由式(3)可知,TIS的值也会很小,因此需要对总积分散射仪的测量精度有着较高要求。

## 2 积分球模型

利用三维画图软件Solidworks建立了积分球模型,该模型有4个开孔,分别为入射光孔、反射光出孔、样品加持孔和探测器安装孔。

图2为导入到Tracepro中的积分球模型图。

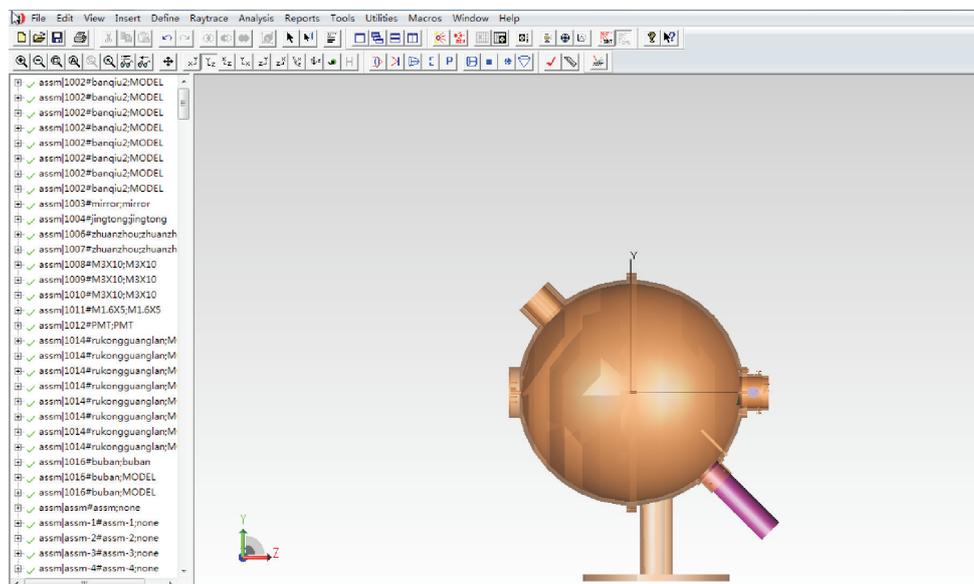
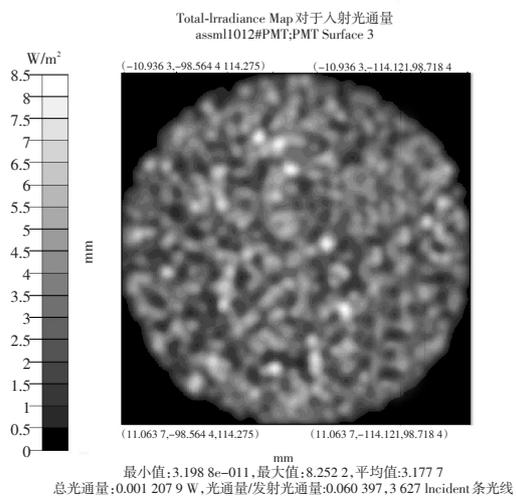
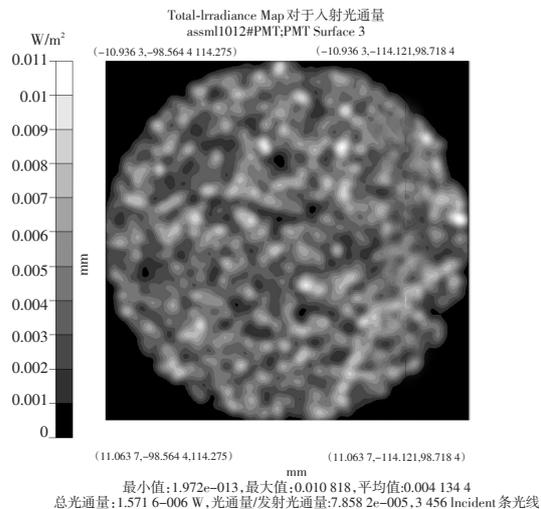
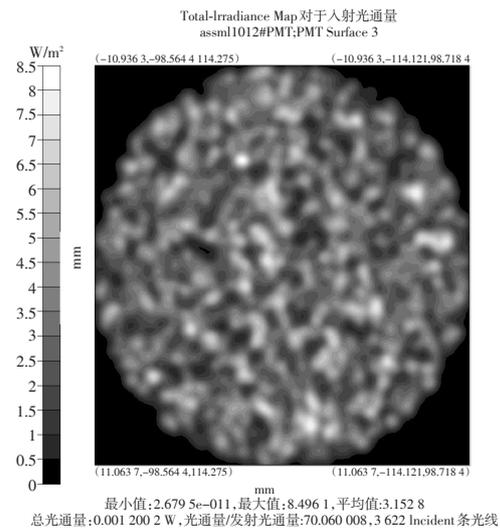
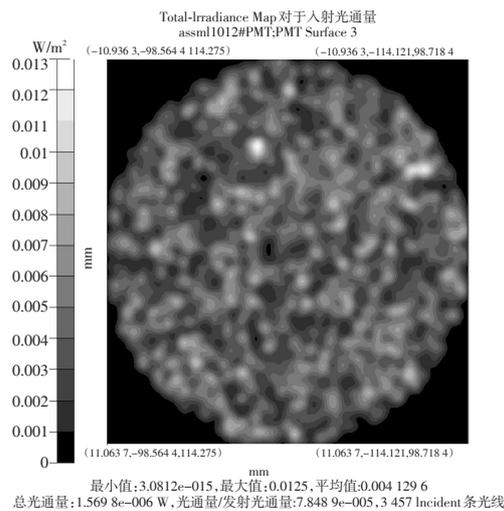
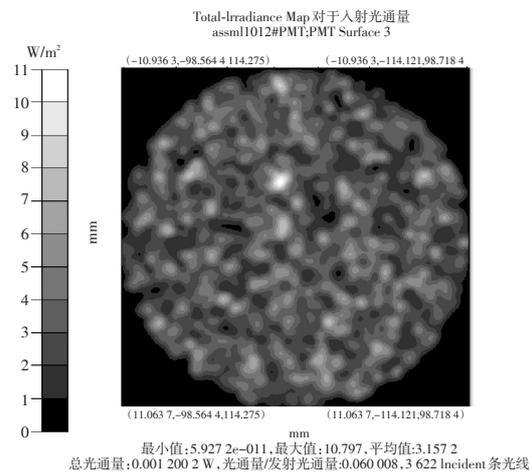
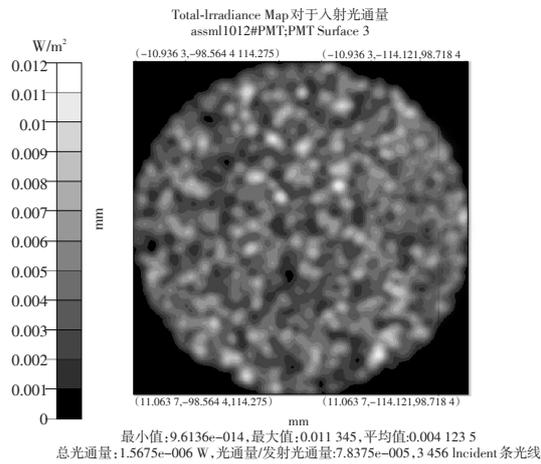


图2 积分球模型图

将积分球的内壁材质设置为 diffuse white, 该材质具有 Lambertian 的性质, 反射率 99%, 设置探测器接收面为重点采样面, 光线阈值设定为  $5e-006$ , 然后对该积分球进行了光线追迹仿真。

图3表示的是光源波长为 650 nm, 光束半径为 0.5 mm、1 mm、1.5 mm 和 2 mm 四种情况下, 得到的光通量分布图。



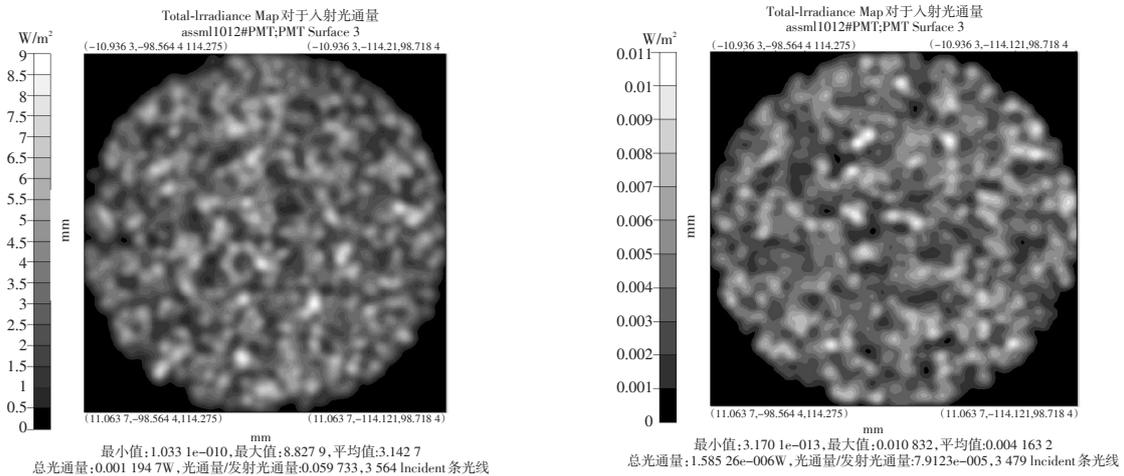


图3 Tracepro仿真图

四组不同光束面积情况下得到的TIS值分别如图4所示。

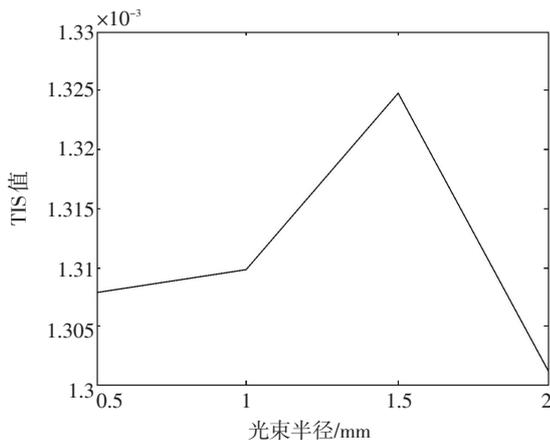


图4 TIS值示意图

由图4可知,当光束半径是1.5 mm时,TIS值达到了最大值,并且与Tracepro材料数据库中的真实值最为接近。

所以在实际实验时,选择1.5 mm的光束半径进行实验,积分球的仿真实验不仅验证了实验的可行性,还对具体光束半径的选择具有指导意义。

### 3 总积分散射仪

实验采用的是总积分散射测量法,入射光以很小的人射角照射到光学元件表面上,然后用积分球收集粗糙表面散射的漫反射光或者包含有镜向反射光在内的总反射光。实验所用装置图如图5所示。实验装置包括激光器、俯仰调整座、功率计和积分球。

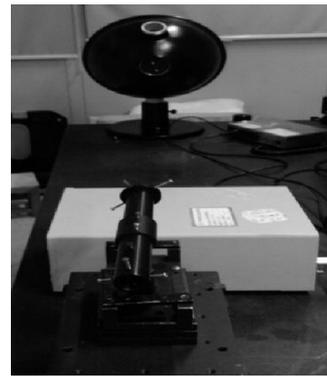


图5 实验装置图

实验所用光源是半导体激光器,光源光束大小可调,工作电压为3~5 V,激光器输出功率为20 mW。由于激光器出射光束存在散斑,故在激光器输出端加上一个可变光阑,减小光源散斑对实验结果的影响,光源的实际出射光束直径是2 mm。

总积分散射仪的核心装置是积分球,积分球主要起的是匀光作用,光束进入积分球并且经过多次漫反射后,就可以消除因被测样品的不均匀性和探测器件受光面的不均匀性带来的影响,在积分球出口处就可以形成具有较为良好的面均匀性和近似朗伯特特性的面光源。在积分球的实验所用积分球的直径300 mm,积分球入口尺寸 $\phi 58$  mm,样品口尺寸 $\phi 42$  mm,探测器口尺寸 $\phi 45$  mm,反射光出口尺寸 $\phi 42$  mm。积分球的总开口尺寸面积大小是 $0.7003 \text{ m}^2$ ,开口比为0.6%。积分球的内壁涂料是硫酸钡。

功率计的型号是newport公司生产的2936-c,探测器的型号是918D-UV-OD3R。功率计的主要性能

参数:信噪比(S/N)为1 453,响应度(Responsivity)是4.282E-1,测量范围可从5 nW到50 mW,测量不确定度2%。

被测反射镜的大小30 mm,表面镀银膜,反射率为99.9%。

### 4 TIS与光源波长关系

利用自制总积分散射仪测得三组激光光源(650 nm、520 nm和450 nm)TIS值,单位均为ppm,如表1所示。

表1 总积分散射仪测量结果

波长/nm	次数				
	1	2	3	4	5
650	352	387	404	430	342
520	540	527	582	550	576
450	848	709	794	832	748

根据式(3)可知,TIS与波长的平方成负相关,据此,可以设定TIS与波长的拟合关系,利用Matlab得到TIS与波长的关系,如图6所示。

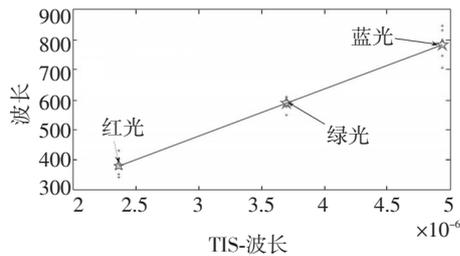


图6 TIS与波长关系图

根据红光和蓝光的数据拟合出的曲线的数值表达式是 $TIS=1.0e+008 \times 1.567^3 / \lambda / \lambda$ 。由图6可知,介于红光与蓝光之间的绿光的数据符合良好,说明了这条拟合曲线的可行性。

然后根据已知光谱曲线的光源和这条拟合曲线,就可以得到复色光源的总TIS值。采用根据普朗克黑体辐射公式得到一条确定的黑体辐射能量密度谱图。黑体辐射是黑体温度 $T$ 和辐射场波长 $\lambda$ 的函数,当温度一定时,黑体的辐射能量密度随波长的变化曲线就一定,因此,就可以知道黑体的各波长辐射能量。太阳就是个黑体,也满足黑体辐射公式。文中设置黑体温度 $T$ 为6 000 K。

图7表示温度为6 000 K,可见光波段的黑体辐射能量密度谱图。

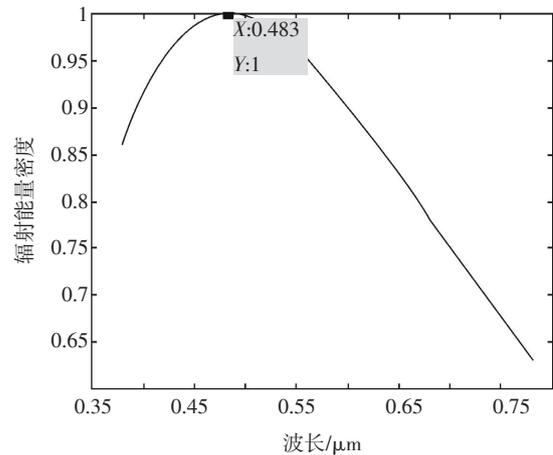


图7 黑体辐射能量密度谱图

由图7可知,黑体辐射能量密度在483 nm附近达到了最大值。如果黑体总能量已知,就可以根据该黑体辐射能量密度谱得到各个波段所分得的能量大小。然后再根据文中得到的TIS值与波长的拟合曲线,就可以得到该黑体可见光波段总TIS值大小。

### 5 结论

首先建立一个积分球模型,并对其进行仿真分析,验证了积分球作为核心器件的总积分散射仪这套装置的可行性,根据对激光光源光束半径的仿真实验结果,得出当激光光束半径为1.5 mm时,结果更为准确,这指导了之后的总积分散射实验。采样3个激光光源波长,分别为650 nm、520 nm和450 nm,并根据实验数据得出TIS值与波长的关系,然后再根据文中提出的方案,可以得到已知辐射能量密度谱的复色光源的总TIS值。提出的方案对以后测量复色光源的总TIS值具有一定的指导意义。

### 参考文献

- [1] 侯海虹.光学表面的光散射测量方法[J].常熟理工学院学报, 2008,22(8):46-50.
- [2] Amra C, Roche P, Pelletier E. Interface roughness cross-correlation laws deduced from scattering diagram measurements on optical multilayers: effect of material grain size[J]. J Opt Soc Am B, 1987, 4:1087-1093.
- [3] Al Jumaily G A, McNally J J, McNeil J R. Effect of ion assisted deposition on optical scatter and surface micro-

(下转第75页)

[6] 白晓棠,段惠丹,李二龙.基于SOA辅助的全光逻辑异或门性能研究[J]. 光电技术应用,2009,24(4):34-37.

[7] Poole C D, Wagner R E. Phenomenological approach to polarisation dispersion in long single-mode fibres[J]. Electronics Letters, 1986, 22(19): 1029-1030.

[8] Dorren H J S, Lenstra D, Liu Y, et al. Nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifiers: theory and application to all-optical flip-flop memories[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2003, 39(1): 141-148.

[9] 程木,吴重庆,赵瑞,等.基于半导体光放大器偏振旋转的全光缓存器[J]. 光学学报,2008,28(10):1898-1902.

[10] 冯震,盛新志,吴重庆,等.半导体光放大器的偏振光开关性能改进[J]. 红外与激光工程,2012(1):124-128.

[11] Fu S, Zhong W, Shum P, et al. Nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifiers with linear polarization maintenance[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(23): 1931-1933.

[12] Liu G, Wu C, Wang F, et al. Measurement of the linewidth enhancement factor based on nonlinear polarization rotation of semiconductor optical amplifier[J]. Applied Optics, 2015, 54(16): 5162-5166.

[13] Zhao S, Wu C, Wang Y. Polarization dependence of linewidth enhancement factor in semiconductor optical amplifier and its implication for nonlinear polarization rotation [J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26 (10): 1042051-1042054.

(上接第53页)

translation layer perspective[J]. International Journal of High Performance Systems Architecture, 2013, 4(3).

[3] Choi Y, Latifi S. Future prospects of DRAM: emerging alternatives[J]. International Journal of High Performance Systems Architecture, 2012, 41: 1-12.

[4] Kim G B, Cha S Y, Hyun E K, et al. Integrated planar spi-

ral inductors with CoFe and NiFe Ferromagnetic layer[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 50(3).

[5] 李弼程,罗建书.小波分析及其应用[M]. 北京:电子工业出版社,2003.

[6] 陈桂明,张明照,戚红雨.应用MATLAB语言处理数字信号与数字图像[M]. 北京:科学出版社,2001.

(上接第64页)



图8 测压仪所测得模拟膛压曲线

### 6 结论

对光触发测压仪光窗结构进行了优化设计,同时对测压仪抗电磁性能和模态进行了仿真分析。通过仿真,改进后的光触发测压仪满足膛压测试要

求。实验结果表明,光触发测压仪能够有效屏蔽火炮膛内电磁的干扰,完整记录膛压曲线。

### 参考文献

[1] 张相炎.火炮设计理论[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2005:153-161.

[2] 温星曦,李新娥,王美林.光触发电子测压器的设计[J]. 传感技术学报,2014,27(5):591-594.

[3] 舒跃飞,阎建平.发射药燃烧光谱测试技术[J]. 光电技术应用,2015,30(4):66-69.

[4] 吕文红,郭银景,唐富华.电磁兼容原理及应用教程[M]. 北京:清华大学出版社,2008:180-189.

[5] 马勇,孔春阳.ITO薄膜的光学和电学性质及其应用[J]. 重庆大学学报,2002,25(8):114-117.

[6] 刘飞.基于壳体电容的高压传感器仿真和实验技术研究[D]. 太原:中北大学,2012.

(上接第69页)

structure of thin films[J]. J Vac Sci Technol, 1985.

[4] 侯海虹,洪瑞金,张东平,等.测量薄膜微粗糙度的总积分散射[J].中国激光,2005,32(9):1258-1261.

[5] 申振峰,高劲松,陈红,等.用自制总积分散射仪评估

SiC基底表面改性效果[J].光学精密工程,2008,16(10): 1841-1846.

[6] 于昊.散射法表面粗糙度测量的数学模型分析[J]. 长春理工大学学报,2006,29(1):109,112.