

文章编号 1004-924X(2012)12-2607-06

单一原子氧辐照对 SR107-ZK 白漆反射率的影响

付瀚毅^{1,2}, 刘伟奇^{1*}, 柳 华¹, 魏忠伦¹, 康玉思¹, 冯 睿¹, 卢海平^{1,2}, 孙 亮^{1,2}

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对空间对接时某些载荷表面喷涂的涂层受原子氧剥蚀的影响发生反射率退化,从而改变涂层成像特性的问题,本文利用反射率退化一般规律数学模型计算出了在空间经常使用的 SR107-ZK 白漆两年衰减后的反射率理论值,并根据此理论值为光学系统选择了适当的 CCD。按照地球低轨(LEO)飞行两年的太空环境条件,对 SR107-ZK 白漆试块进行了单一原子氧辐射试验。结果显示, 1.8×10^{22} atom/cm² 原子氧通量辐射后的试验数据为 0.814,与数学模型模拟计算的数值 0.793 较为接近,说明了数学模型理论的正确性。对辐射后的试块进行了成像试验,结果表明 CCD 的合理选择是光学系统对反射率下降试块良好成像的关键,进一步证实了数学模型的可靠性,为今后此类工作提供了重要的依据。

关键词: SR107-ZK 白漆; 原子氧; 反射率测量; 电荷耦合器件; 光学成像

中图分类号: V251.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122012.2607

Influence of single atomic oxygen radiation on reflectivity of SR107-ZK

FU Han-yi^{1,2}, LIU Wei-qi^{1*}, LIU Hua¹, WEI Zhong-lun¹,
KANG Yu-si¹, FENG Rui¹, LU Hai-ping^{1,2}, SUN Liang^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
* Corresponding author, E-mail: liuwq@ciomp.ac.cn

Abstract: As the reflectivity of surface coatings of some loadings will be degenerated in the aircraft docking due to the denudation of atomic oxygen and the imaging characteristics of the coatings will be deteriorative, this paper calculates the reflectivity of SR107-ZK while paint damped for two years by using the universal mathematical model of reflectivity-degeneration. Based on the model, it chooses an appropriated CCD for the optical system. Furthermore, according to the space environmental conditions for flying around the Earth in Low Earth Orbit(LEO) for two years, a single atomic oxygen experiment is performed on a sample painted by SR107-ZK. Experimental results show that the reflectivity data is 0.814 when the sample is radiated by 1.8×10^{22} atom/cm², which is closed to the theoretical data 0.793 calculated by mathematic model. The result verifies the correctness of the theoretical model. Moreover, an imaging experi-

收稿日期: 2012-04-10; 修订日期: 2012-06-16.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(No. 60538020); 中国科学院创新工程资助项目; 科技部国际合作项目(No. 2011DFA50590)

ment on the tested sample is carried out, and the result indicates that the influence of optical system on the reflectivity degeneration of the sample depends on a reasonable choice of CCD. The results prove the reliability of the proposed model and provide a significant foundation for the intending work.

Key words: SR107-ZK white paint; atomic oxygen; reflectivity measurement charge; Coupled Device (CCD); optical imaging

1 引言

随着我国航天技术的发展,可视化对接设备层出不穷,并已被大量应用于太空瞄准和辅助对接工作中。为了保证对接设备上的涂层能够在太阳光或灯光照明下对摄像机等设备的成像良好,尤其是在地球阴影面这种低照度条件下的正常成像,对其性能指标之一——反射率提出了一定要求,即涂层反射率的高低成为了载荷功能能否正常实现的关键。常用的涂层材料有 SR107、SR107-ZK、ACR-1 等^[1-3],它们的用途各有不同,本研究中的设备选择喷涂 SR107-ZK 白漆。

SR107-ZK 白漆是我国上海有机化学研究所自行研制的有机白漆。这种涂层是由硅酸钾处理的氧化锌作颜料,RTV-602 聚二甲基硅氧烷为黏结剂组成,具有低太阳吸收比和高发射率、在空间环境下稳定、使用方便及柔软性好等特点^[4]。其性能与美国的 S-13G 类似。在我国很多航天器上都喷涂了这种白漆,但其性能会因太空环境的影响产生一定变化。

地球低轨(Low Earth Orbit, LEO 200~700 km)环境存在着高真空、原子氧(Atomic Oxygen, AO)、紫外辐照、微流星体和太空碎片、真空冷热交变、电子、质子等严酷条件。经过大量的飞行实验和地面模拟分析发现,紫外辐照和原子氧是影响 SR107-ZK 白漆反射率的主要因素,但在短期飞行任务中的影响因素主要是原子氧。原子氧具有强氧化性,当航天器在 LEO 环境中以 7~8 km/s 的轨道速度飞行时,原子氧撞击航天器表面的能量可达 4~5 eV^[5-6]。在这一过程中,原子氧与航天器表面材料会发生复杂的物理、化学反应,从而造成材料的剥蚀和性能的退化^[2],引起目标涂层反射率下降,进而影响光学系统对航天器的成像质量。因此,本文对在单一原子氧环境下目标涂层 SR107-ZK 白漆的光学重要性能之

一——反射率进行了分析。

本研究中涉及的 SR107-ZK 白漆是用来成像的,所以主要考虑其经过原子氧辐照后可见光反射率的变化,以确保其受太空环境的影响之后的成像质量。文中对 SR107-ZK 白漆在单一真空原子氧条件下白漆反射率的变化进行了研究,目的在于为今后类似的应用提供可靠的数学模型及试验依据。

2 任务要求及反射率退化建模

2.1 任务要求

本次试验要用 TV 摄像机对一个目标(如图 1 所示)进行成像。由于在太空环境下原子氧对白漆表面的剥蚀作用会影响其反射率,故根据实际情况要求目标在 1 lx 的照度下成像。

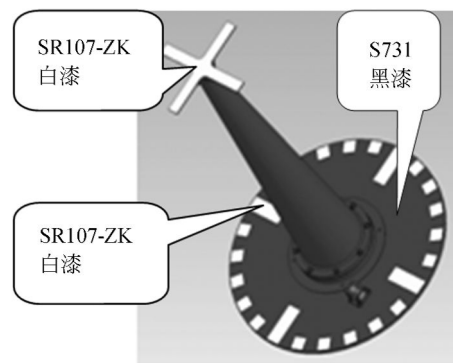


图 1 目标示意图

Fig. 1 Sketch of target

2.2 反射率退化的数学模型

依据地面模拟试验中发现的反射率开始退化快、后来退化慢的一般规律,选取一阶指数衰减模型作为预示数学模型^[7],即:

$$\rho = 1 - a - be^{cx}, \quad (1)$$

式中: ρ 为反射率; x 为模拟在轨时间; a, b, c 为待定系数。

采用最小二乘法来确定公式(1)中的参数 $a,$

b, c 。根据公式(1),残差平方和为:

$$Q(a, b, c) = \sum_{k=1}^N [(1 - \rho_k) - a - be^{cx_k}]^2, \quad (2)$$

式中: N 为测量数据个数, x_k, ρ_k 为数据点, $k=1, 2, \dots, N$ 。

要使 Q 最小,则有:

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = \frac{\partial Q}{\partial b} = \frac{\partial Q}{\partial c} = 0. \quad (3)$$

由此可以推出:

$$\begin{cases} s_0 a + s_c b = s_p \\ s_c q + s_{2c} b = s_p \\ s_{xc} a + s_{x2c} b - s_{xpc} = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $s_0 = N, s_c = \sum_{k=1}^N e^{cx_k}, s_{2c} = \sum_{k=1}^N e^{2cx_k}, s_y = \sum_{k=1}^N (1 - \rho_k), s_{xc} = \sum_{k=1}^N x_k e^{2cx_k}, s_{x2c} = \sum_{k=1}^N x_k e^{2cx_k}, s_{pc} = \sum_{k=1}^N \rho_k e^{2cx_k}, s_{xpc} = \sum_{k=1}^N x_k (1 - \rho_k) e^{2cx_k}$ 。

由公式(4)的第一、第二两个式子,解出 a, b 的值(用 c 表示)为:

$$\begin{cases} a(c) = (s_{2c} s_p - s_c s_{pc}) / (s_0 s_{2c} - s_c^2) \\ b(c) = (s_0 s_{pc} - s_c s_p) / (s_0 s_{2c} - s_c^2) \end{cases}. \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)的第三式中,得到:

$$s_{xc} a(c) + s_{x2c} b(c) - s_{xpc} = 0. \quad (6)$$

根据式(6),求解方程得到 c 的值,即可得到所求参数。

求解方程(6)时,构造函数:

$$\rho = 1 - f(c) = 1 - s_{xc} a(c) - s_{x2c} b(c) + s_{xpc}.$$

首先确定 c 的一个取值范围 $[C_1, C_2]$,使得在两个端点上有:

$$f(C_1) \times f(C_2) < 0. \quad (7)$$

这样可以确定在 $[C_1, C_2]$ 内有一个方程(7)的根。然后,在此范围内利用非线性方程的有理分式解法求解得到 c 的值,再根据求得的 c 值计算出 a, b 的值以及拟合结果对应的残差平方和。整个计算过程通过编程由计算机完成,最后求得退化后的反射率为 0.793。

2.3 CCD 的选择

在摄像机的光学系统设计中,要根据实际需求选择适当的 CCD,所以需要求出在目标反射率为 0.793 的情况下 CCD 的最低照度^[8]。

白漆的亮度为: $B_1 = \rho E_1 / \pi$, 其中: ρ 为反射

率; E_1 为白漆照度,这里取 $E_1 = 1 \text{ lx}$ 。由此算出白漆退化后在 1 lx 的照度下,目标的亮度为 $B_1 = 0.25 \text{ cd/m}^2$ 。从而推出 CCD 相应的最低照度为 $E_2 = B_1 (D/f)^2 \pi \tau / 4$ 。其中: E 为目标在 CCD 上的像面照度; B 为目标亮度; D/f 为系统相对孔径; τ 为系统透过率。

由摄像机的 $D/f = 1/3$, 系统透过率 $\tau \geq 0.5$, 得到:

$$E_2 = 0.011 \text{ lx}.$$

据此选用了 SONY 公司型号为 ICX285AL 的 CCD。

3 反射率退化及光学成像试验

3.1 反射率退化试验

采用同轴源原子氧模拟装置对表面喷涂有 SR107-ZK 白漆试片按照地球低轨道两年的太空环境条件进行单一原子氧试验^[9-10]。原子氧试验原理及环境条件分别见图 2 及表 1,并对在线性变化原子氧通量辐射后的试块进行反射率及质量测量,如图 3 所示。

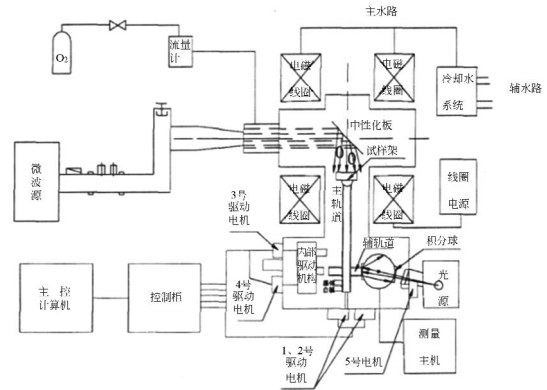


图 2 原子氧装置结构原理图

Fig. 2 Structure and principle chart of atomic oxygen equipment

表 1 原子氧试验条件

Tab. 1 Conditions of atomic oxygen experiment

试验条件	值
本底真空	$1.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$
原子氧试验时,真空维持在	$3.0 \times 10^{-1} \text{ Pa}$
原子氧通量密度	$1.0 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^2 \cdot \text{s} (\pm 10\%)$
原子氧通量	$1.8 \times 10^{22} \text{ atom/cm}^2$
原子氧能量	5~8 eV

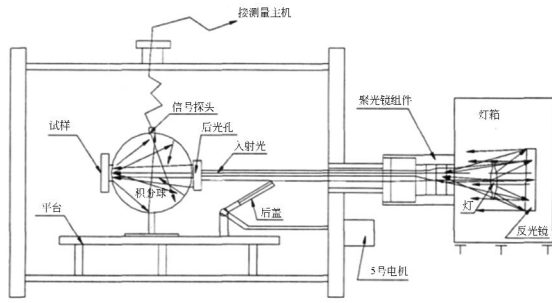


图 3 测量试片反射率的光路图

Fig. 3 Optical path for reflectivity measurement of test piece

试验过程中原子氧通量密度为重要指标之一,由表 1 可知,其公差为 $\pm 10\%$ 。标定方法为:用已知原子氧剥蚀速率的标准试样 Kapton HN 测试原子氧通量密度的大小,标定完毕后将试验条件固化。通量密度为:

$$\Phi = \Delta m / A \cdot \eta \cdot \rho \cdot \tau,$$

其中: Φ 为原子氧通量密度; Δm 为标准试样试验前后的后损; A 为标准试样的暴露面积, $A = 12.25 \text{ cm}^2$; η 为标准试样的原子氧剥蚀率(Kapton HN; $3.0 \times 10^{-24} \text{ cm}^2/\text{atom}$); ρ 为标准试样的密度(Kapton HN,密度: 1.42 g/cm^3); τ 为标准试样在原子氧中的暴露时间。

试验结果如图 4 和图 5 所示。

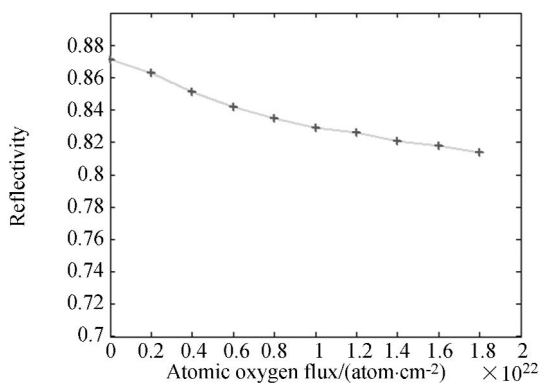


图 4 反射率随原子氧通量的变化

Fig. 4 Variation of reflectivity with atomic oxygen flux

本试验在 $0.2 \times 10^{22} \sim 1.8 \times 10^{22} \text{ atom/cm}^2$ 原子氧通量之间每间隔 $0.2 \times 10^{22} \text{ atom/cm}^2$ 对白漆的反射率进行一次测量,试验结果与理论模型计算结果见表 2。

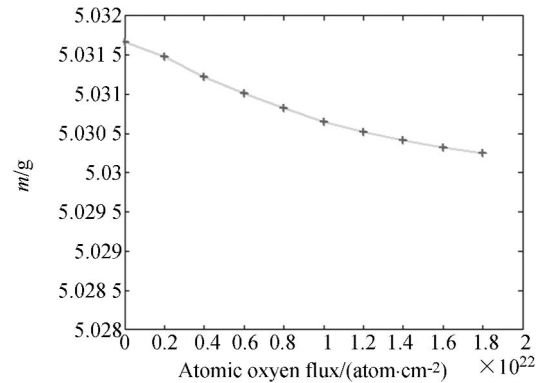


图 5 质量随原子氧通量的变化

Fig. 5 Variation of mass with atomic oxygen flux

表 2 反射率的试验数据与模型计算值对比

Tab. 2 Comparison of reflectivities between experimental result and mathematical model

原子氧通量 / (atom · cm ⁻²)	反射率 (R)	
	试验数据	模型计算
0.2×10^{22}	0.863	0.859
0.4×10^{22}	0.851	0.848
0.6×10^{22}	0.842	0.834
0.8×10^{22}	0.834	0.823
1.0×10^{22}	0.828	0.813
1.2×10^{22}	0.824	0.808
1.4×10^{22}	0.821	0.803
1.6×10^{22}	0.818	0.798
1.8×10^{22}	0.814	0.793

由表 2 可知,试验过程中试块的反射率与数学模型计算出的反射率变化相近,并呈现出很好的对应性,从理论上证明了一般规律反射率退化数学模型的正确性。

3.2 光学成像试验

在 1 lx 的照度下^[11-12],用按照数学模型计算选择 CCD 的光学成像系统对试验后的试块进行成像试验,并用一张反射率 $R=0.913$ 的白纸进行对比,试验成像如图 6 所示。可以看到,光学成像系统对 $R=0.814$ 的试块成像正常,并能分辨出其具体位置和形状。

由此可知,由于原子氧对 SR107-ZK 白漆的剥蚀,造成其质量有比较明显的损失,增大了白漆表面粗糙度,从而使白漆的反射率下降。但通过数学模型推算及选择适当 CCD 的光学成像系统,仍能对经过原子氧作用后反射率下降的 SR107-ZK 白漆清晰成像。这进一步证明了反射率退化

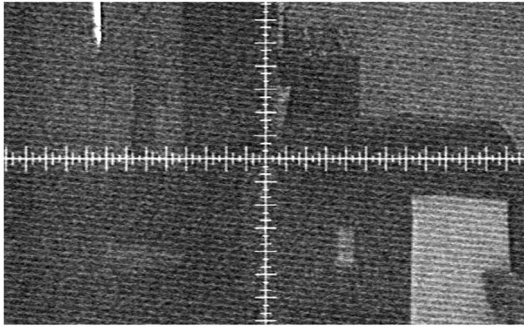


图 6 反射率为 0.814 的试块在 1 lx 照度下成像
Fig.6 Image of test piece with reflectivity of 0.814
in 1 lx illumination

数学模型的可靠性。

4 结 论

SR107-ZK 白漆是我国在空间设备上经常使

参考文献:

- [1] 周佐新,华诚生.地球同步轨道长寿命卫星热控涂层太阳吸收率性能退化研究[J].航天器工程,2007,16(4):78-81.
ZHOU Z X, HUA CH SH. Performance degradation analysis for SR107-ZK white paint in orbit [J]. *Spacecraft Engineering*, 2007, 16 (4): 78-81. (in Chinese)
- [2] 刘宇明,冯伟泉,丁义刚,等. SR107-ZK 在空间辐照下的物性变化[J].宇航材料工艺,2007(4):61-64.
LIU Y M, FENG W Q, DING Y G, *et al.*. Space radiation effects on SR107-ZK [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2007(4): 61-64. (in Chinese)
- [3] 刘宇明.空间环境中 S781 和 SR107 性能退化研究[J].航天器工程,2008,25(5):435-437.
LIU Y M. A comparison of the space radiation effects between S781 and the SR107 white coatings [J]. *Spacecraft Engineering*, 2008, 25 (5): 435-437. (in Chinese)
- [4] 童靖宇,王吉辉,李金洪.温控白漆原子氧紫外综合环境效应退化影响初步研究[J].航天器环境工程,2003,20(4):19-24.
TONG J Y, WANG J H, LI J H. Preliminary research on degradation of the thermal control paints in AO/UV environment [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2003, 20(4): 19-24. (in Chinese)
- [5] 郭亮,姜利祥,李涛,等.真空紫外对原子氧环境下 S781 白漆性能影响的研究[J].航天器环境工程,2010,27(6):686-689.
GUO L, JIANG L X, LI T, *et al.*. Influences of vacuum ultraviolet on the property of S781 white paint in atomic oxygen environment [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, 27 (6): 686-689. (in Chinese)
- [6] SILVERMAN E M. Spacecraft environmental effects on spacecraft: LEO materials selection guide, NASA-SACR-4661, N96-10860[R]. *California: TRW Space & Electronic Group*, 1996, 1(1): 14-19.
- [7] 冯伟泉,丁义刚,闫德基,等.地球同步轨道长寿命卫星热控涂层太阳吸收率性能退化研究[J].中国空间科学技术,2005(2):34-40.
FENG W Q, DING Y G, YAN D K, *et al.*. Study on long-term degradation of solar absorptance properties of geostationary satellite thermal control coatings [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2005(2): 34-40. (in Chinese)
- [8] 杨本永,张黎明,沈政国,等.光学传感器星上定标漫射板的特性测量[J].光学精密工程,2009,17(8):1851-1858.
YANG B Y, ZHANG L M, SHENG ZH G, *et al.*. Characteristic measurement of diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1851-1858. (in Chinese)
- [9] 李中华,王敬宜,李丹明,等.原子氧作用中试样光

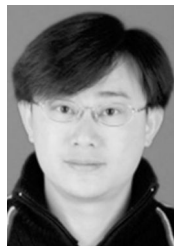
用的涂料,根据空间对接等任务的成像需求,其反射率在经过太空的恶劣环境作用后依然能够满足实际应用要求。本文建立了反射率退化的数学模型,根据数学模型计算出的结果选择了适当的 CCD,并按照两年的原子氧通量对 SR107-ZK 白漆做了在单一真空原子氧条件下的地面模拟试验,其反射率从 0.871 下降到了 0.814,发生了一定的退化。与根据反射率退化数学模型得到的结果 0.793 相比,两者仅差 0.021,说明了数学模型的可靠性。用试验后的试片在 1 lx 照度下进行了模拟成像试验,可以清晰地分辨位置和形状,由此证明了 SR107-ZK 白漆经过单一真空原子氧作用后仍满足实际应用的需求。

- 学性能原位测量[J]. 真空与低温, 2007, 13(4): 213-217.
- LI ZH H, WANG J Y, LI D M, *et al.*. Measurement in-situ for optical properties of samples exposed to atomic oxygen beams [J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2007, 13(4): 213-217. (in Chinese)
- [10] 郑阔海, 李中华, 王敬宜, 等. 低地球轨道航天器不同攻角原子氧通量密度计算模型[J]. 宇航学报, 2010, 31(7): 1855-1863.
- ZHENG K H, LI ZH H, WANG J Y, *et al.*. Model of atomic oxygen fluence for different spacecraft surface in low earth orbit [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(7): 1855-1863. (in Chinese)
- [11] 程书博, 张惠鸽, 刘浩, 等. 科学级光学 CCD 暗电流及机械快门时间响应特性测试[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0204001.
- CHENG SH B, ZHANG H G, LIU H, *et al.*. Performance measurement of mechanical shutter and dark current for scientific-grade optical CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0204001. (in Chinese)
- [12] 徐伟伟, 张黎明, 杨本永, 等. 基于周期靶标的高分辨光学卫星相机在轨 MTF 检测方法[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0711001.
- XU W W, ZHANG L M, YANG B Y, *et al.*. On-orbit MTF measurement of high resolution satellite optical camera using periodic targets [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0711001. (in Chinese)

作者简介:



付瀚毅(1985—), 男, 吉林长春人, 主要从事光学设计, 光学检测等方面的研究。E-mail: fu_hanyi@163.com



柳 华(1977—), 男, 海南海口人, 博士研究生, 主要从事光机结构设计。E-mail: liuhua0898@sohu.com



魏忠伦(1977—), 男, 黑龙江嫩江人, 工程师, 主要从事图像处理软件的开发工作。E-mail: wzl-0@126.com



康玉思(1977—), 男, 黑龙江密山人, 工程师, 主要从事光学设计及光学检测工作。E-mail: kyshdl@163.com



冯 睿(1968—), 男, 吉林长春人, 工程师, 主要从事机械结构设计工作。E-mail: musang3017@tom.com



卢海平(1984—), 男, 江西赣州人, 博士研究生, 主要从事光学设计, 虚拟环境模拟技术以及空间光学等方面的研究。E-mail: luhaiping21@yahoo.com.cn



孙 亮(1983—), 男, 吉林四平人, 硕士研究生, 研究实习员, 2010 年于中国海洋大学获得硕士学位, 主要从事空间光学遥感器计算机控制方面的研究。E-mail: sunstar_102@163.com

导师简介:



刘伟奇(1958—), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要从事 193 光刻中用于光学检测的点衍射干涉仪和菲索干涉仪制造方面的研究。E-mail: liuwq@ciomp.ac.cn