

激光薄膜和基底在不同空间环境中的损伤性能研究进展

崔云¹ 易葵¹ 沈自才² 邵建达¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所 强激光材料重点实验室, 上海 201800)
(² 北京卫星环境工程研究所 可靠性与环境工程重点实验室, 北京 100094)

摘要 随着激光在航天器中应用的增加,出现了激光系统在空间环境中失效的现象。激光薄膜和基底元件(包括晶体和玻璃)是激光产生和输出的重要组成部分,空间环境对它们损伤性能的影响直接关系到激光系统的稳定性、使用寿命和光束质量,因此它们的空间损伤效应成为急需研究和论证的问题。总结了国内外激光薄膜和基底在不同空间环境(包括真空度、温度、污染、空间辐照等)的性能变化、损伤机理和改进措施,为用于航天器的激光薄膜和基底元件的性能评估、预测和性能改进提供理论依据和分析方法。

关键词 薄膜;激光薄膜;损伤;空间环境;基底

中图分类号 TN249;V19

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.040001

Research Progress of Damage Performances for Laser Coatings and Substrates Used in Space

Cui Yun¹ Yi Kui¹ Shen Zicai² Shao Jianda¹

¹ Key Laboratory of Materials for High-Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

² Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering Laboratory, Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China

Abstract Application of laser is increasing in spacecraft now, but laser systems in space already have the sudden phenomenon of failure. The optics performances composed of coatings and substrates such as crystal and glass are important elements for laser generation and output. The changes of damage performances will affect the stability, lifetime and beam quality of laser system in space. Space effects of optics have become an urgent problem to research and discuss. We summarize the variation trend, damage mechanism and some improvement measures for optics in different conditions of vacuum, temperature, contamination, solar ultraviolet radiation and proton radiation, respectively. The conclusions will be helpful to the future laser applications and research in space.

Key words thin films; laser coatings; damage; space environment; substrate

OCIS codes 310.6870; 140.3330; 350.6090

1 引言

随着空间技术的发展,激光技术及激光器系统在航天器上有着越来越重要的应用,主要包括激光武器、测距、测高、空间通信、光侦察、遥感、动力系统、空间太阳能电站等方面。如目前国际上正在使用和研制的激光高度计有火星轨道激光高度计(MOLA)、地球激光高度计(GLAS)^[1]、月球激光高度计等,用于遥感探测的有大气激光多普勒仪、云层浮质雷达观测系统、臭氧激光探测系统^[2]等,应用于动力系统的有大尺寸空间望远镜精确定位和姿态控制用光子激光推进器等^[3],应用于太阳能电站的有日本的 SSPS 项目计划(拟采用微波系统计划和激光系统计划两种方案)^[4]等。

收稿日期: 2011-09-05; 收到修改稿日期: 2011-10-19; 网络出版日期: 2012-02-24

作者简介: 崔云(1978—),女,博士,助理研究员,主要从事激光损伤及防护等方面的研究。

E-mail: cuiyun@siom.ac.cn

激光薄膜和基底(包括晶体和玻璃)是空间激光系统中激光产生和输出的重要组成部分。在激光振荡器中,它们是构成谐振腔、形成激光束的必要元件;在激光传输中,由其组成反光、折光、分光、合束元件。

空间用薄膜元件和基底不仅需要满足光学性能和损伤阈值等方面满足系统设计要求,还需要承受特殊空间恶劣环境的考验。本文针对激光薄膜元件和基底在不同空间环境中性能的变化及其机理进行分析总结,初步探讨了薄膜元件和基底应对各种空间效应的改进措施。

2 激光薄膜元件和基底在不同空间环境中损伤性能的变化和改进措施

在运行的空间激光系统中,有大量激光输出镀膜窗口元件暴露于空间环境中,也有一些关键激光镀膜元件工作在特殊的环境中,它们的性能变化直接影响激光系统的稳定性、使用寿命和光束质量,而在空间环境中很难更替它们。过去,几种空间激光系统如 MOLA 和 GLAS 已经遭遇了运行一段时间后反常的性能丧失或失效^[5,6]。

较之地面使用的激光光学元件,航天器应用的激光元件要经受真空度、温度、空间辐射(包括太阳电磁辐射和带电粒子辐射)、空间污染、空间碎片撞击等环境因素的影响,尤其是处于元件最外层的光学薄膜,受到的影响最为明显。美国国家航空航天局(NASA)研究中心、德国航天中心、日本大阪大学激光工程研究所、法国 LP3 Pôle 科学和技术中心、中国科学院空间科学与应用研究中心、中国科学院上海光学精密机械研究所等研究机构都开展了空间环境对激光光学元件影响的研究。

2.1 真空度的影响

真空度与卫星轨道高度密切相关^[7],90 km 高度时真空度约为 10^{-1} Pa,400 km 高度时约为 10^{-6} Pa,1000 km 高度时约为 10^{-8} Pa。真空度对致密的晶体和玻璃影响不大,而对致密度不高的薄膜则存在较大的影响。

国内外对薄膜真空效应的研究较多,德国空间中心对电子束蒸发镀制的 355 nm 高反(HR)薄膜的多脉冲损伤研究表明,致密度不高的薄膜在真空环境中的激光损伤阈值(LIDT)较低,如图 1 所示^[8]。中国科学院上海光学精密机械研究所的研究结果也同样表明电子束沉积的多孔薄膜在真空环境下损伤阈值降低^[9]。

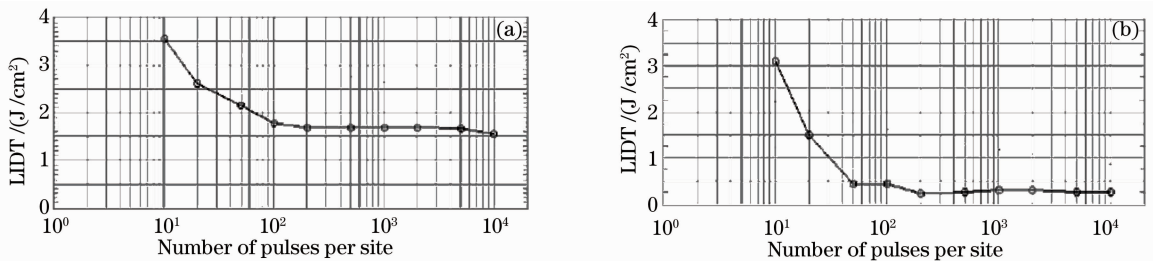


图 1 电子束沉积的 355 nm 高反膜在(a)大气和(b)真空(4.2×10^{-4} Pa)环境中的多脉冲 LIDT 曲线

Fig.1 Characteristic damage curves of e-beam evaporated coating with high reflection at 355 nm for LIDT tests in (a) air and (b) vacuum (4.2×10^{-4} Pa)

研究人员对这一变化过程进行分析,首先利用有限元方法分析了气体热传导对大气及真空环境下光学薄膜损伤的影响,分析表明气体热传导差异不是大气环境与真空环境损伤差异的原因。随后建立了多孔薄膜的堆积密度与薄膜热导率的变化关系,利用热传导方程和损伤阈值表达式,从热力损伤过程及缺陷诱导损伤过程分析了电子束沉积的多孔薄膜真空过程中的本征损伤机制——膜层堆积密度对损伤的影响关系,计算结果表明真空效应降低了电子束沉积的多孔膜层的热导率,从而加剧了膜层内本征材料和缺陷的温升,导致真空环境下薄膜的损伤阈值降低。

为了降低薄膜的真空效应,提高膜层堆积密度,德国空间中心^[8]使用离子束辅助沉积(IAD)或溅射镀制致密薄膜,测试结果(图 2)表明在大气和真空中的损伤阈值无明显差异,从而有效克服了真空效应的影响。

2.2 温度的影响

极端温度是空间环境的一大特点^[10]。空间没有大气对流导热,容易使材料暴露在极端温度下。航天器外

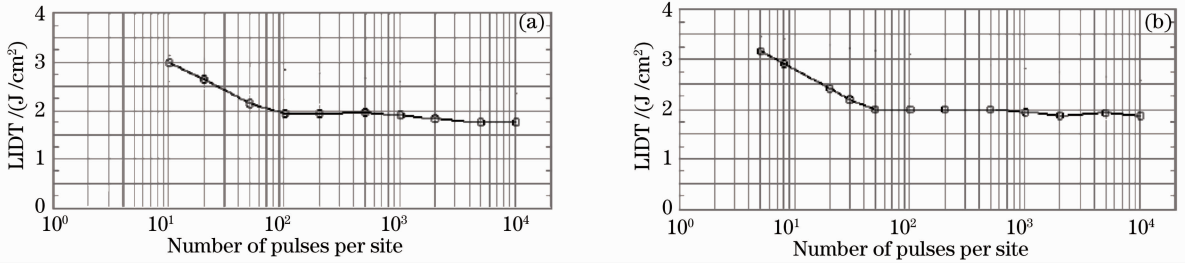


图 2 离子辅助沉积的 355 nm 高反膜(a)大气和(b)真空(7×10^{-4} Pa)环境中的多脉冲 LIDT 曲线

Fig. 2 Characteristic damage curves of IAD coating anti-reflective at 355 nm for LIDT tests in (a) air and (b) vacuum (7×10^{-4} Pa)

露部件长期在空间冷黑背景下,其温度有时由于辐射散热会降低至 $-180\text{ }^\circ\text{C}$;而在太阳辐照下,有时温度会上升至 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 。即使是密闭在航天器中的材料,由于受航天器自身温度的影响,工作温度也有别于地面环境。

2009 年日本大阪大学报道了石英玻璃在 1064 nm 和 355 nm 波长纳秒激光辐照下 $-200\text{ }^\circ\text{C} \sim 200\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内的损伤阈值(图 3)^[11],法国研究者报道了 Ti:sapphire 晶体在 532 nm 波长纳秒激光辐照下 $-130\text{ }^\circ\text{C} \sim 25\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内的损伤阈值(图 4)^[12],结果表明,所有样品的损伤阈值不受激光波长的影响,均随着温度的降低线性增长。究其原因是低温可以降低被激光辐照区域产生的温升,提高了元件产生热破坏所需的激光能量密度。

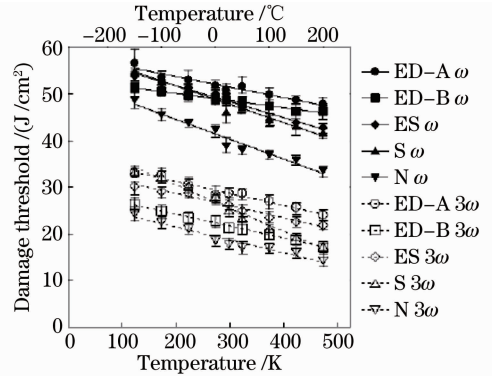


图 3 石英玻璃在不同温度下的损伤阈值

Fig. 3 Temperature dependence of LIDT of fused silica

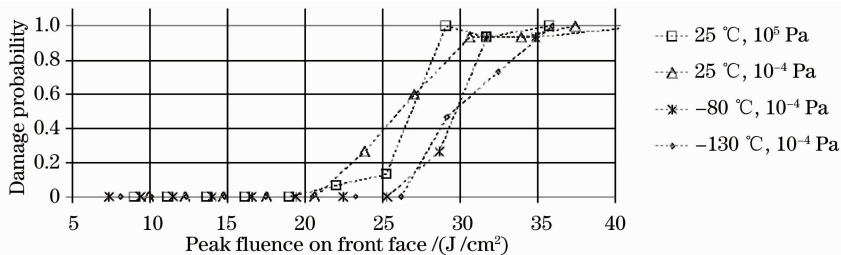


图 4 未镀膜的 Ti:sapphire 晶体前表面在不同温度和压强条件下的损伤性能

Fig. 4 Damage probability on uncoated Ti:sapphire crystal front face for different conditions of temperature and pressure

法国研究人员还进一步对镀多层减反(AR)膜的 Ti:sapphire 晶体前表面在不同温度条件下的损伤阈值进行了测试(图 5)^[12]。镀减反膜后元件随温度降低阈值升高的变化趋势虽然存在,但比未镀膜的晶体损伤阈值低。阈值降低的原因主要有以下几个方面:1) 薄膜自身易损伤,与薄膜的致密度和缺陷密度有关;2) 薄膜与晶体界面结合力不够,激光辐照时的温升产生的应力导致膜层脱落;3) 薄膜与晶体界面引入了污

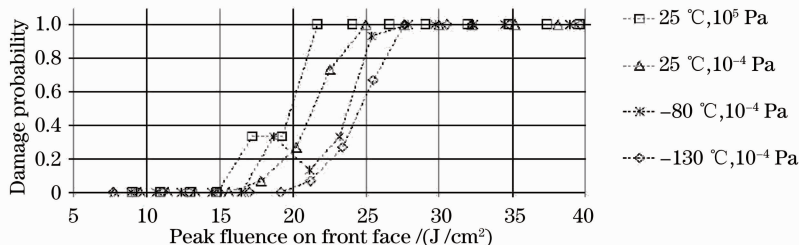


图 5 镀减反膜的 Ti:sapphire 晶体前表面在不同温度和压强条件下的损伤性能

Fig. 5 Damage probability on AR coated Ti:sapphire crystal front face for different conditions of temperature and pressure

染层,在激光辐照过程中形成污染点诱导损伤;4) 薄膜的热膨胀系数远大于晶体,激光辐照引起的温度变化使膜层形变产生应力导致破坏。因此,如何清洁晶体表面,在晶体上镀制高结合力、高损伤阈值、热膨胀系数匹配的膜层成为今后研究的重点。

目前温度环境对损伤影响的研究主要集中在纳秒激光,纳秒激光损伤最基本的过程还是热过程,光通过本征吸收、杂质吸收和非线性吸收转化为热,由热熔融或热力耦合导致薄膜的最终损伤,因此低温对损伤有一定的抑制作用。对于飞秒激光,其损伤机理有别于纳秒激光,主要表现为光致离化提供初始种子电子,并和碰撞离化一起发展,通过光致离化和碰撞离化的非线性过程,激发导带自由电子,当自由电子数达到临界等离子体密度时,会对后续激光强烈吸收,引起薄膜的破坏。在飞秒激光作用下,元件损伤随温度变化的趋势仍需进一步研究。

2.3 紫外辐射和带电粒子辐射的影响

紫外辐射和带电粒子辐射是两种重要的空间辐射,在此仅对这两种辐射进行阐述,不讨论其他辐射的影响。

空间中由于没有大气吸收,太阳辐射度比地面强得多,平均达 1353 W/m^2 ,其中紫外光能量约占 8.7% ,约 118.7 W/m^2 ,但是单个紫外光子的能量很高,可以使大多数薄膜材料分子的化学键断裂,尤其是波长小于 240 nm 的紫外辐射对材料具有极强的破坏作用。如在紫外辐射过程中 SiO_2 膜会产生孔洞^[13], ZnS 膜层在 240 nm 处的反射率^[14]可从 30% 减小到接近 0 , CaF_2 在 200 nm 处的透射率可下降到 0 。

虽然国内外对紫外辐射后元件激光损伤阈值的变化还未见报道,但紫外辐射后分子键的断裂会改变元件光学特性,降低紫外波段的透射率,降低元件的损伤阈值。因此,评估与预测元件紫外辐射后激光损伤性能的理论依据和分析方法有待进一步研究。

空间带电粒子环境主要来自地球辐射带、银河宇宙射线和太阳宇宙射线,带电离子的能量从几千电子伏到几十吉电子伏,轨道不同辐射剂量也不相同。

空间带电粒子对光学材料的辐射损伤作用主要有电离作用和原子(或离子)的位移作用两种方式。电离过程是带电粒子在核外束缚电子附近掠过时,由于库仑作用,束缚电子获得了足够高的能量便摆脱原子核的束缚成为自由电子,这样就产生了一个自由电子和一个正离子,即电子-空穴对。原子(或离子)的位移是指入射粒子传递超过某一阈值的动能,使固体中的原子(或离子)从其晶格的平衡位置移开,成为间隙原子(或离子),并在其原先占据的格点处留下一个空位,这样的空位-间隙对就称为弗仑克尔缺陷。

空间带电粒子对薄膜材料影响的研究较多。哈尔滨工业大学对 MgF_2 、 ZrO_2 、 Al_2O_3 、 SiO_2 四种镀膜材料的电子质子辐照效应进行了研究,发现四种材料在电子和质子辐照过程中不改变晶体结构,会产生色心(辐照过程中某些特定的先驱点缺陷俘获电子和空穴形成,每种色心具有自己的能带结构,不同色心表现出不同的光吸收),形成不同波长的吸收带^[15]。研究人员通过建立低能带电粒子辐照元件的非弹性电离损伤的物理模型和速率方程^[16]、单分子层电子色心产生模型^[17],推导了材料光学性能退化随辐照剂量的变化关系。研究结果为空间光学膜系设计选材、光学薄膜元件在轨服役性能评价等提供了有效的技术支持。德国空间中心^[18,19]给出了质子辐射KTP晶体的研究结果(图6),KTP晶体透射率的降级有一个饱和效应,在第二次质子辐射时,透射率趋于饱和,与第一次辐射过程相比,透射率没有明显变化,这是由于随着辐照剂量的增加,色心的产生和复合随着吸收剂量的增加趋于平衡,色心的浓度到达饱和。

国内外的研究虽未给出带电粒子辐射对元件激光损伤阈值变化的影响结果,但电离作用和原子(或离子)的位移作用必将在元件内形成色心、空位等缺陷,这种缺陷的尺寸大多在 $0.1 \mu\text{m}$ 以下,对电场分布影响不明显,且要考虑热扩散损失,能导致材料损伤需要的电场强度已经达到材料雪崩离化损伤机制的范围,即在强激光电场作用下,电子密度雪崩式地增加,最终达到足够高的电子密度,通过焦耳热摧毁晶格。最终的

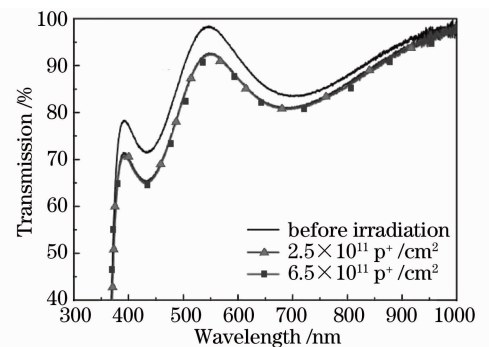


图6 低能(10.8 MeV)质子辐照剂量对KTP晶体透射率的影响

Fig.6 Transmission spectra for KTP crystals before and after low energy (10.8 MeV) proton irradiation

结论还需要通过实验来验证。

降低空间辐射影响的研究大多集中在光学太阳反射镜(OSR)二次表面镜热控器件,通过改变表面材料^[20]或增加功能性薄膜的方式降低空间辐射的影响。而对于激光光学元件,空间辐射带来的多为永久性破坏缺陷,在兼顾光学性能和激光阈值的前提下,还没有一种降低空间辐射影响的实用可行的办法。目前只能通过建立辐射损伤的物理模型、结合实验结果对元件受辐射后激光损伤性能的变化进行实验分析和理论预测。

2.4 空间污染的影响

空间污染包括轨道上的污染源(针对暴露于空间环境的元件)和密闭激光系统污染源(针对激光系统内光学元件)。轨道上的污染源有以下几类:1)高层大气成分,主要包括 O, N₂, O₂, Ar, H, He, NO, N, CO 以及这些气体的离子;2)航天器材料的出气产物,产物的组成依赖于材料种类和它们在地面的制造、保存等过程;3)发动机羽流污染物,对于常用的甲胛/四氧化二氮双组元推进剂来说,其羽烟成分包括 N₂, H₂O, H₂, CO, CO₂, H, OH-以及由它们构成的更为复杂的分子成分。密闭激光系统污染源主要包括:1)激光器内的布线和粘合剂;2)激光腔内材料的放气;3)激光辐照产生的物质喷溅及二次激光辐照喷溅产生的污染。

美国 NASA 的研究人员将溅射制备的 633 nm 膜暴露于空间环境中,返回地面后发现表面有层污染物覆盖,使用拉曼光谱设备发现膜层表面的污染层中已经有碳氢化合物的存在^[21]。

H. Schröder 等^[22]研究发现在压力低于 10⁻⁴ Pa 的真空环境中,当存在胶类和环氧树脂、硅树脂、聚氨酯等污染物时,355 nm(3 ns, 100 Hz, 入射激光最大能量密度为 1.1 J/cm²)激光辐照能在窗口表面逐渐沉积污染层(图 7)。这些激光诱导的污染物沉淀不仅引起光学性能衰退,同时会形成破坏源,降低损伤阈值。

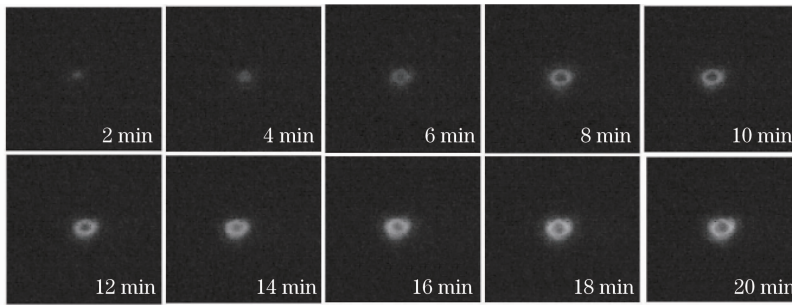


图 7 窗口元件在 355 nm 激光辐射下沉积的形成过程

Fig. 7 Dynamics of deposition formation on the exit window tested at 355 nm

污染物对激光光学元件的光学性能和损伤阈值都有很大影响,可导致元件透射率和损伤阈值降低、激光系统快速失效,而大部分污染物为有机污染物,因此对有机污染物的去除成为研究的目标。Browall^[23]将 TiO₂、WO₃、ZnO 等薄膜应用于 OSR 的前表面,研究了这些薄膜对 OSR 表面有机污染物的去除作用,研究表明,在紫外光辐照情况下, TiO₂、WO₃、ZnO 等薄膜可以有效去除 OSR 表面的有机污染物。美国 Northrop Grumman Aerospace Systems 技术研发部门针对月球表面风化层污染的颗粒尺寸,研究了 TiO₂ 膜层对污染物的光分解作用^[24]。主要原理是 TiO₂ 是一种半导体,它的能带是不连续的,可分为价带、导带和禁带。当能量大于或等于禁带能量的光照射到半导体时,处于价带中的电子被激发跃迁至导带,在价带产生相应的空穴。当光生电子及空穴迁移到 TiO₂ 表面时,空穴与空气当中的水分子结合产生氢氧自由基,它能分解几乎所有的有机化合物和一部分的无机物,将它们分解成无害的二氧化碳及其他物质,而电子与空气当中的氧结合会产生活性氧,也就是超级氧化离子,超级氧化离子也具有很强的氧化分解能力,它可以破坏细菌、霉菌这些有机物的细胞膜,固化病毒的蛋白质。但以上方法的局限性在于需要 H₂O 分子的辅助,不适用于真空环境。美国 NASA 戈达德空间飞行中心根据荷叶憎水的特性,研制了微结构膜层,通过增大表面接触角,减小颗粒吸附所需表面能和接触面积,在太阳风或振动作用下去除污染^[25]。但这种膜层材料目前不能满足激光元件光学性能和损伤性能的要求。因此,适合激光元件的防污或去污方法仍有待进一步研究。

2.5 空间碎片撞击的影响

空间碎片包括两方面,一种是人类航天活动遗弃在空间的废弃物,分布在 2000 km 以下的低轨道区,尺寸在 1~10 mm 范围的空间碎片其数量高达约 4×10⁷ 个;另一种是微流星体,起源于彗星和小行星带并在行星际

空间中运动的固态粒子,一般直径在 1 mm 以下,质量在 1 mg 以下,形状一般为球形,平均速度约为 20 km/s。

空间碎片的高速度导致撞击的力量很大,目前的激光光学材料很难抵御。美国 NASA 的研究人员将热蒸发 ZnSe/ThF₄ 制备的 1064 nm 和 1319 nm 反射膜暴露于空间环境中,返回地面后表面存在很多撞击损伤坑(图 8)^[21]。

目前还没有合适的激光光学材料可抵御空间碎片的撞击,使用激光技术清除空间碎片的研究还处于预研阶段。

3 结束语

基于空间环境效应的重要性,美国 NASA 已将多种激光薄膜和基底材料搭载在国际空间站上,长期暴露于空间环境中,评价它们在空间环境中性能的稳定性和长效性,为它们在低轨、同步轨道和行星际空间任务中的使用提供保障,但后期的分析结果和改进措施少有报道。

从国内外的研究情况看,薄膜元件和基底受真空和温度影响的性能变化规律清晰,可进一步研究改进措施,降低不良影响;受空间辐射、污染影响的性能变化规律、机理分析和改进措施仍有待进一步研究。随着国内航天事业的发展和对激光器应用需求的增加,深入研究激光光学元件的空间环境适应性,对激光光学元件在空间使用过程中的变化进行预估,并提出改进与防护措施,降低激光系统因空间环境效应产生各种故障和异常的几率,具有重要的实用价值。

参 考 文 献

- 1 Anthony W. Yu, Steven X. Li. Spaceborne laser transmitters for remote sensing applications[C]. *SPIE*, 2010, **7808**: 780817
- 2 Narasimha S. Prasada. High energy, single-mode, all-solid-state and tunable UV laser transmitter[C]. *SPIE*, 2006, **6214**: 62140T
- 3 Young K. Bae. Propellantless precision formation flying with photonic laser thrusters for large space telescopes[C]. *SPIE*, 2009, **7436**: 74360F
- 4 Ge Changchun. Space solar power station and its key materials[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, **27**(1): 13~17
葛昌纯. 空间太阳能发电系统及其关键材料[J]. *航天器环境工程*, 2010, **27**(1): 13~17
- 5 W. Riede, P. Allenspacher. Laser damage test bench for space optics[C]. Proceedings of the 5th International Conference on Space Optics, 2004. 839~843
- 6 D. Jolly. Manufacturing experience in reducing environmental induced failures of laser diodes[C]. *SPIE*, 1996, **2714**: 679~682
- 7 Ye Zonghai. Space environment studies for the SZ-4 spacecraft[J]. *Physics*, 2004, **33**(1): 40~48
叶宗海. “神舟”四号中的空间环境研究[J]. *物理*, 2004, **33**(1): 40~48
- 8 W. Riede, P. Allenspacher, L. Jensen *et al.*. Analysis of the air-vacuum effect in dielectric coatings[C]. *SPIE*, 2008, **7132**: 71320F
- 9 Ling Xiulan. Nanosecond Pulse Laser Induced Damage of Optical Coatings in Vacuum Environments[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010. 46~58
凌秀兰. 真空环境下纳秒脉冲激光诱导光学薄膜的损伤研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2010. 46~58
- 10 Feng Weiwan. Evaluation and validation of space environmental applicability of spacecraft materials[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, **27**(2): 139~142
冯伟泉. 航天器材料空间环境适应性评价与认定准则研究[J]. *航天器环境工程*, 2010, **27**(2): 139~142
- 11 K. Mikami, S. Motokoshi, M. Fujita *et al.*. Laser-induced damage thresholds in silica glasses at different temperature[C].

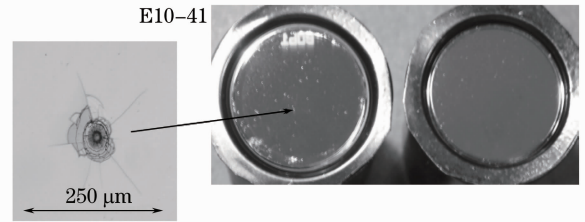


图 8 在蓝宝石基底 ZnSe/ThF₄ 膜上发现的微流星体或空间碎片的损伤(右图是未飞行的对比样品)

Fig. 8 Micrometeoroid or space debris damage found on ZnSe/ThF₄ optical coating on a sapphire substrate (the non-flight control sample is shown for comparison)

- SPIE*, 2009, **7504**: 75041R
- 12 B. Bussi re, O. Ut za. Laser induced damage of sapphire and titanium doped sapphire crystals under femtosecond to nanosecond laser irradiation[C]. *SPIE*, 2009, **7504**:75040N
- 13 Liu Yuming. Studies on space ultraviolet environment and its effects on spacecraft materials[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2007, **26**(6): 139~143
刘宇明. 空间紫外辐射环境及效应研究[J]. *航天器环境工程*, 2007, **26**(6): 139~143
- 14 Wang Yingjian, Wang Yongmei. Effects of solar UV radiation on space optical films[J]. *Chin. J. Space Science*, 2009, **29**(2): 222~228
王英鉴, 王咏梅. 太阳紫外辐射对星上光学膜层的影响[J]. *空间科学学报*, 2009, **29**(2): 222~228
- 15 Hu Jie. Study of the Coloration Effect of Four Optical-Filming Powders[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. 24~66
胡杰. 四种光学镀膜材料的辐照着色效应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士论文, 2009. 24~66
- 16 Zhou Zhongxiang, Wang Hongli, Shen Yanqing *et al.*. Study on the optical property of quartz glass and Al film reflector under charged particles irradiation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(1): 592~599
周忠祥, 王宏利, 申艳青等. 带电粒子辐照下石英玻璃和镀铝膜反射镜光学性能研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(1): 592~599
- 17 Li Danming, Tian Kai, He Deyan. Study for optical performance degradation of ZnO thermal control coatings under electronic irradiation based on monolayer model[J]. *J. Functional Materials*, 2010, **41**(6): 1001~1004
李丹明, 田恺, 贺德衍. 基于单分子层模型的 ZnO 热控涂层电子辐照光学性能退化研究[J]. *功能材料*, 2010, **41**(6): 1001~1004
- 18 Wolfgang Riede, Paul Allenspacher, Helmut Schröder *et al.*. Aspects of laser optics qualification for space applications[C]. *SPIE*, 2009, **7504**: 75040T
- 19 Alessandra Ciapponi, Wolfgang Riede, Georgios Tzeremes. Non-linear optical frequency conversion crystals for space applications[C]. *SPIE*, 2011, **7912**: 791205
- 20 Otto K. Husmann, Karl Kerner. Solar-radiation-resistance improvement of second-surface mirrors and optical solar reflectors by deposition of interference filters[J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1977, **14**(1): 200~204
- 21 Alan F. Stewart, Miria Finckenor. Optical coatings and surfaces in space: MISSE[C]. *SPIE*, 2007, **6403**: 64030S
- 22 H. Schröder, W. Riedea, E. Reinhold *et al.*. *In situ* observation of UV laser-induced deposit formation by fluorescence measurement[C]. *SPIE*, 2007, **6403**: 64031K
- 23 Kenneth W. Browall. Photocatalytic Coatings on Optical Solar Reflectors to Decompose Organic Contaminants[P]. US Patent 6,290,180, 2001-09-18
- 24 Ronald Pirich, John Weir, Dennis Leyble. The effects of ionizing radiation, temperature and space contamination effects on photonic coatings[C]. *SPIE*, 2009, **7467**: 746704
- 25 Danielle V. Margiotta. The lotus coating for space exploration-a dust mitigation tool[C]. *SPIE*, 2010, **7794**: 77940I