

空间电离辐射对镧系光学玻璃透射率的影响

高欣 杨生胜 王云飞 王健 冯展祖

(中国空间技术研究院兰州物理研究所真空低温技术与物理国家重点实验室,兰州 730000)

文摘 利用 ^{60}Co γ 射线对镧火石玻璃和镧冕玻璃进行辐照,研究不同辐照剂量对光学透射率的影响及其在空间光学系统中使用的适应性,辐照总剂量最大达到 10 kGy。结果表明:所有玻璃在辐照后可见光透射率都下降了,而在近红外波段仍然保持较高的透射率。尽管镧火石玻璃 LaF10 平均透射率在辐照前最小,但是辐照后 LaF10 透射率衰减是所有玻璃中最小的。模拟了 8 个不同轨道高度地球辐射环境 10 年累积的总剂量以及经过 10 mm 铝屏蔽后的累积总剂量。发现对于 10 年任务期,在 3 000、6 000 和 10 000 km 轨道需要增加屏蔽层厚度,而在其他 5 个轨道,10 mm 厚的铝屏蔽可以保证镧系玻璃满足系统对透射率的要求。

关键词 光学玻璃,电离辐射,辐射诱发透射率衰减,空间环境

Effects of Space Ionizing Radiation on Transmission of Lanthanum Glasses

Gao Xin Yang Shengsheng Wang Yunfei Wang Jian Feng Zhanzu

(National Lab. of Vacuum & Cryogenics Technology and Physics, Lanzhou Institute of Physics,
Chinese Academy of Space Technology, Lanzhou 730000)

Abstract A study of the effects of ^{60}Co gamma radiation on the transmission of lanthanum flint and lanthanum crown glasses was presented for application in space optics. The max total dose attained was 10 kGy, and the experimental results show that the visible transmission for all samples decreases, while the near-infrared transmission shows a slight decrease. Although the transmission of the lanthanum flint glass LaF10 is the minimum of all samples before irradiation, it also shows a minimum transmittance loss after irradiation. The total accumulated radiation doses with and without a 10 mm-thick Al shielded layer are simulated for the eight orbits of different altitudes in a 10-year-mission. The simulating results indicate that in 3 000 km, 6 000 km and 10 000 km orbit altitudes, a thicker shielded layer is required to reduce the total dose, while in the other five orbits, a 10 mm-thick Al layer is enough for satisfying the optical system performance.

Key words Optical glasses, Ionizing radiation, Radiation-induced transmission degradation, Space Environment

1 引言

空间光学成像系统使用大量的光学玻璃作为折射镜头或窗口材料,而空间电离辐射环境是光学玻璃透射率衰减的主要影响因素。电离辐射环境会在玻璃材料中形成吸收带,由于很多吸收带是在可见光光谱范围内,因此被称为“色心”,造成光学玻璃透射率下降^[1-5]。光学玻璃透射率下降会造成光学成像系统的成像信号衰减,从而使得系统的信噪比降低,这可能导致系统在轨期间失效。对于特定的空间任务,空间光学系统的性能衰减必须在可接受的范围之内。

为使光学系统存在的像差降低到一定范围,需用具有不同折射率和色散的光学玻璃。镧系无色光学玻璃具有特殊的折射率和色散,不仅可以降低像

差,同时可以减少光学系统镜片的数量和质量。本文利用 ^{60}Co γ 射线源对镧系无色光学玻璃进行辐照,研究不同剂量的 γ 射线对光学玻璃透射率的影响,同时模拟了不同轨道高度的电离辐射总剂量以及穿透 10 mm 铝屏蔽层衰减后的总剂量,考察镧系无色光学玻璃在空间辐射环境下应用的适应性。

2 实验

2.1 样品

对五类镧系无色光学玻璃进行辐照试验,分别是:镧火石玻璃 LaF3 和 LaF10;镧冕玻璃 LaK2、LaK3 和 LaK11。所有样品是 $\Phi 20$ mm \times 2 mm 的圆盘状玻璃。

2.2 实验过程

利用 Perkin-Elmer Lambda 900 光谱仪测量样品

收稿日期:2009-08-18

基金项目:真空低温技术与物理国家级重点实验室基金(9140C5503060802)资助项目;国家高技术研究发展计划(2007AA042431)资助项目

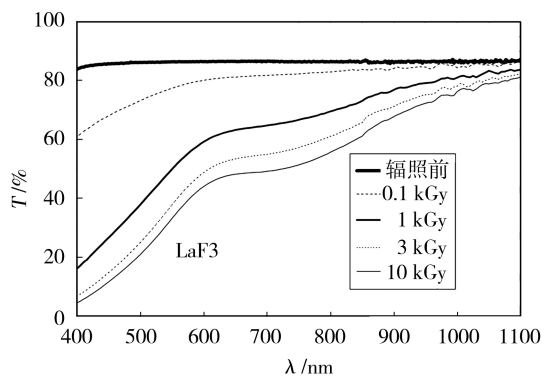
作者简介:高欣,1972 年出生,博士,高级工程师,主要从事空间辐射环境与效应研究。E-mail:gaoxin510@hotmail.com

辐照前后的透射率,测量范围为 400 ~ 1 100 nm,精度为 ± 0.01 nm。

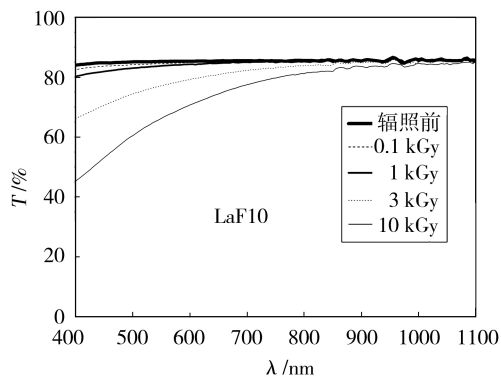
利用 ^{60}Co γ 射线源(1.17 和 1.32 MeV)进行辐照试验,剂量率为 0.1 kGy/h,辐照剂量点分别为 0.1、1、3 和 10 kGy (Si)。在辐照试验中,首先将样品辐照到第一个剂量点,辐照结束后将样品从辐照室取出,运送到光谱分析地点。整个运送过程环境温度是不可控制的,温度变化范围在 20 ~ 30 $^{\circ}\text{C}$ 。透射谱的测量是在辐照结束后的 1 h 内完成的。然后重复辐照-测量过程,直到累积的总剂量达到 10 kGy 试验结束。

3 结果和讨论

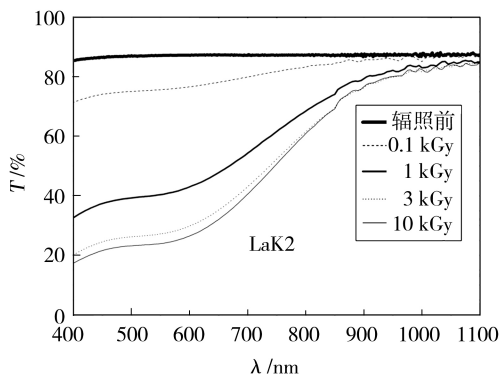
图 1 为 γ 射线辐照前后,五类镧系无色光学玻璃在 400 ~ 1 100 nm 的透射谱。



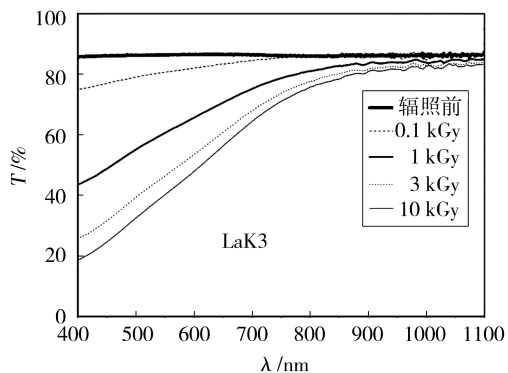
(a) LaF3



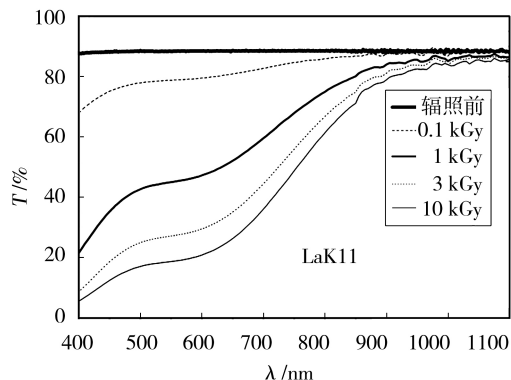
(b) LaF10



(c) LaK2



(d) LaK3



(e) 镧冕玻璃 LaK11

图 1 五类玻璃辐照前后的透射谱(400 ~ 1100 nm)

Fig. 1 Transmittance of LaF3, LaF10, LaK2, LaK3 and LaK11 before and after irradiation

不同剂量的 γ 射线辐照后,所有样品的透射率均下降,而且发生了着色现象,为黄棕色。 γ 射线辐照在可见光和近红外波段引起了很宽的吸收带。由于这些玻璃的组分和杂质含量不同,这些吸收带的中心波长位置也有所不同。对于大部分玻璃来说,这些吸收带都很宽,难以区别。一般来说,玻璃材料中的杂质缺陷含量越低,辐照诱发的吸收也越低,通常含有大量多价杂质离子或缺陷的玻璃材料,在电离后可以形成多个可区分的吸收带^[3]。

表 1 给出了辐照前样品的折射率和平均透射率(400 ~ 1100nm)。可以看出,透射率的变化规律说明辐照前样品内部吸收可以忽略。

表 1 镧系玻璃辐照前的折射率和平均透射率

Tab. 1 Refractivity and average transmittance of lanthanum glasses before irradiation

样品名称	折射率	平均透射率/%
LaF3	1.744	86.34
LaF10	1.788	85.39
LaK2	1.692	87.16
LaK3	1.747	86.27
LaK11	1.665	88.41

辐照后,不同样品的透射率衰减差别很大,表明辐照诱发的色心浓度不同。受辐照影响最小的是

LaF10 [图 1(b)], 在 0.1 kGy 的辐照剂量下透射率几乎不变, 即使在 10 kGy 时, 透射率衰减情况甚至比其他样品在低辐照剂量时的要好, 表明具有最好的抗辐射性能。镧冕玻璃中, LaK3 [图 1(d)] 抗辐射性能要更好一些。在 0.1 ~ 1 kGy 总剂量范围, 只有 LaF10 在 400 ~ 1 100 nm 波段的透射率是可以接受的, 而其他样品在可见光波段衰减严重; 当在近红外波段时, LaF10 和 LaK3 玻璃在 10 kGy 的辐射剂量下, 也能满足系统对透射率的要求。

当辐照剂量为 0.1 kGy 时, 五个样品在 400 ~ 1 100 nm 的透射率都下降了。随着波长向更短的方向飘移, 透射率下降得越来越严重, 而在近红外波段下降不明显。当辐照剂量增加到 10 kGy, 透射率进一步降低, 其随波长衰减的关系与 0.1 kGy 的情况相类似。而透射率衰减的趋势随着辐照剂量的增加反而变缓了, 表明在达到一定剂量后, 透射率衰减对 γ 辐照剂量的增加变得不敏感了。随着辐照剂量的增大, 透射曲线显现出重叠的趋势, 这或许是色心的产生与湮灭达到了动态平衡^[6]。

地球轨道累积的总剂量主要来自范艾伦辐射带的质子和电子。对于一个 10 mm 铝屏蔽的空基光学系统, 在 10 年的任务期内, 累积的总剂量在 0.01 ~ 10 kGy 间^[7], 光学玻璃透射率的下降必须在可接受的范围之内, 才能保证光学系统的性能在任务期的后半段也能满足要求。本文模拟计算了 10 年任务期内, 不同轨道高度累积的总剂量及经过 10 mm 铝屏蔽层后累积的总剂量, 模拟结果如图 2 所示。

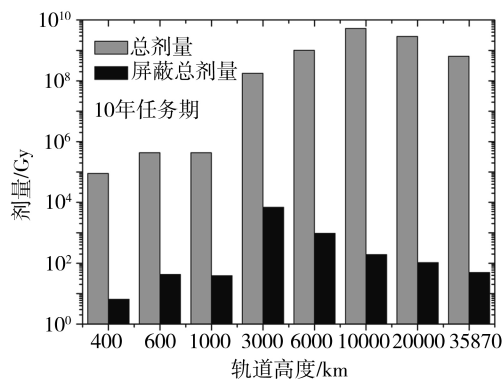


图 2 不同圆形轨道高度 10 年任务期累积的总剂量及穿过 10 mm 铝屏蔽层后的衰减总剂量

Fig.2 Accumulated total dose in 10-year mission with and without 10 mm-thick Al shielded layer in different circular orbits

在模拟的 8 个不同高度的轨道中, 没有屏蔽时, 在 10 000 km 轨道的 10 年累积总剂量最大, 而 400 km 轨道的辐射总剂量最小。经过 10 mm 铝屏蔽衰减后, 累积总剂量最大的是 3 000 km 轨道, 达到了约 7 kGy, 最小的仍然是 400 km 轨道, 约 0.01 kGy。3 000 km 轨道的屏蔽总剂量之所以比 10 000 km 轨道的大, 主要原因是 3 000 km 轨道高能质子 (>100 MeV) 通量很高。

从图 1 来看, 如果光学系统无屏蔽防护, 在 10 年任务期内, 镧系光学玻璃累积的总剂量将会使透射率严重下降。经过 10 mm 铝屏蔽后, 在 3 000、6 000 和 10 000 km 轨道累积的总剂量仍然很高, 对透射率的衰减严重, 很难满足对信噪比要求很高的光学系统长期在轨的要求。因此, 针对这三种轨道需要重新设计屏蔽方案, 例如可以通过增加一定厚度的屏蔽层来减少累积的总剂量。而在其他轨道, 空间电离辐射累积的总剂量在 0.1 kGy 以下, 辐射影响很小, 镧系玻璃透射率应该都可以满足光学系统的要求。由于屏蔽后的总剂量在 7 kGy 以下, 因此在空间实际应用中, 这些光学玻璃辐射诱发的色心浓度一般是不会出现饱和现象, 透射率随时间应该是逐渐衰减的。

4 结论

研究了五类镧系光学玻璃在不同 γ 射线辐照剂量下透射率的变化情况, 最大辐照剂量达到了 10 kGy。辐照后, 所有玻璃在可见光和近红外波段的透射率都有不同程度的下降。尽管辐照前五类光学玻璃内部吸收可以忽略或基本相同, 但是在辐照后, 各类玻璃由于辐射诱发的色心浓度差别很大, 导致透射率衰减不同。尽管 LaF10 玻璃辐照前平均透射率最小, 但辐照后透射率衰减也最小, 是所有玻璃中抗辐射性能最好的。给出了 8 个不同高度地球轨道辐射环境屏蔽前后的累积总剂量, 模拟结果表明 10 mm 的铝屏蔽极大地衰减了辐射总剂量。除了在 3 000、6 000 和 10 000 km 轨道需要考虑增加屏蔽防护之外, 在其他轨道可以保证镧系玻璃在 10 年任务期内满足系统对透射率的要求。

参考文献

- [1] Bartusiak M F, Becher J. Proton-induced coloring of multi-component glasses [J]. Applied Optics, 1979, 18: 3342-3346
- [2] Pellicori S F, Russell E, Watts L A. Radiation induced transmission loss in optical materials [J]. Applied Optics, 1979, 18: 2618-2621
- [3] Appourchaux T P, Gourmelon G, Johlander B. Effect of gamma-ray irradiations on optical filter glass [J]. Optical Engineering, 1994, 33: 1659-1668
- [4] 高祀建, 欧阳世翕. γ 射线辐照石英玻璃吸收光谱的研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2003, 23(6): 1060-1064
- [5] 高祀建, 欧阳世翕. γ 射线辐照对电熔石英玻璃介电性质的影响 [J]. 物理学报, 2003, 52(5): 1292-1296
- [6] Kobayashi M, Leiri M, Kondo K, et al. Radiation hardness of cerium-doped gadolinium silicate $Gd_2SiO_5:Ce$ against high energy protons, fast and thermal neutrons [J]. Nuclear Instrument Methods and Physics Research A, 1993, 330 (1): 115-120
- [7] Benton E R, Benton E V. Space radiation dosimetry in low-Earth orbit and beyond [J]. Nuclear Instrument Methods and Physics Research B, 2001, 184: 255-194

(编辑 李洪泉)