

环境试验与观测

硅基底增透膜典型自然环境 适应性评价研究

杨玉萍, 宋建华, 刘剑, 周晓瑜, 刘艳芳,
戈帆, 赵远荣, 王冲文, 罗瑞, 刘云红

(云南北方光电仪器有限公司, 昆明 650114)

摘要: **目的** 掌握硅基底增透膜在自然环境中的环境适应性。**方法** 采用棚下暴露试验方法, 开展硅基底增透膜样品自然环境试验。以0.5、1、1.5、2 a为检测周期, 测试样品外观形貌、微观形貌、光谱透射比和表面化学成分等性能, 根据性能随试验时间和试验环境的退化规律来对硅基底增透膜的环境适应性进行评价。**结果** 经过0.5 a的湿热雨林(版纳站)、暖湿酸雨(江津站)、寒冷(漠河站)、南海岛礁(永兴岛站)气候环境试验, 硅基底增透膜光谱透射比出现少量下降, 表面部分区域出现了明显的变色和脱膜, 样品已失效。随着试验时间的延长, 变色和脱膜区域变多、变大, 光谱透射比出现明显下降, 尤其是经过2 a南海岛礁气候环境试验后, 光谱透射比下降了80%左右。**结论** 对各性能参数进行比较, 硅基底增透膜在南海岛礁气候环境中的环境适应性最差, 其次是暖湿酸雨气候环境, 再次是湿热雨林气候环境, 相对好一点的是寒冷气候环境。

关键词: 硅基底增透膜; 典型自然环境试验; 外观; 光谱透射比; 环境适应性

中图分类号: TN213

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)12-0127-10

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.12.018

Assessment on Environmental Adaptability of Antireflective Films on Silicon in Typical Natural Environment

YANG Yu-ping, SONG Jian-hua, LIU Jian, ZHOU Xiao-yu, LIU Yan-fang, GE Fan,
ZHAO Yuan-rong, WANG Chong-wen, LUO Rui, LIU Yun-hong

(Yunnan North Photoelectric Instrument Co., Ltd., Kunming 650114, China)

ABSTRACT: The work aims to know the environmental adaptability of antireflective films on silicon in natural environment. The exposure test method under shed was used to conduct natural environment test of antireflective films on silicon. The appearance, micro morphology, spectral transmittance and surface chemical composition of the samples were tested according to the cycle of 0.5 year, 1 year, 1.5 years and 2 years. The environmental adaptability of antireflective films on silicon was evalu-

收稿日期: 2022-01-26; 修订日期: 2022-10-26

Received: 2022-01-26; Revised: 2022-10-26

基金项目: 国防科技工业技术基础科研项目(JSHS2017209B001); 云南省科技与人才计划(202005AM070019)

Fund: The Nation Defense Technology Foundation Project(JSHS2017209B001); The Science and Technology and Talent Plan of Yunnan(202005AM070019)

作者简介: 杨玉萍(1982—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为环境试验与观测。

Biography: YANG Yu-ping(1982-), Female, Senior engineer, Research focus: environment test and observation.

引文格式: 杨玉萍, 宋建华, 刘剑, 等. 硅基底增透膜典型自然环境适应性评价研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(12): 127-136.

YANG Yu-ping, SONG Jian-hua, LIU Jian, et al. Assessment on Environmental Adaptability of Antireflective Films on Silicon in Typical Natural Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(12): 127-136.

ated according to the degradation law of performance with test time and test environment. After 0.5 year of environment tests in humid and hot rain forest (Banna Station), warm and humid acid rain (Jiangjin Station), cold (Mohe Station) and island-reef climate of the South China Sea (Yongxing Island Station), the spectral transmittance of antireflective films on silicon decreased a little, there were obvious discoloration and film removal in some areas of the surface, the sample failed. With the extension of test time, the discoloration and film removal areas became larger and larger, and the spectral transmittance decreased significantly, in particular, the spectral transmittance decreased by about 80% after environment test of 2 years in the island-reef climate of the South China Sea. According to comparison of performance parameters, it is concluded that the island-reef climate of the South China Sea makes antireflective films on silicon have the worst environmental adaptability, followed by the warm and humid acid rain climate, and then the humid and hot rainforest climate. The environmental adaptability of antireflective films on silicon is relatively good in the cold climate.

KEY WORDS: antireflective film on silicon; typical natural environment test; appearance; spectral transmittance; environmental adaptability

红外光学材料的研究及其应用,已成为现代光学技术发展的一个重要方向,而其发展水平主要取决于红外光学材料和红外探测器的水平。红外光学材料是指在红外热像仪、红外导引头等红外光学仪器中用于制造透镜、棱镜、窗口、滤光片、整流罩等光学元件的一类材料。晶体材料是最早使用的一类红外光学材料,其具有较为良好的红外光学特性。因此,现阶段各类红外光学仪器上使用的光学元件,特别是透射光学元件,大部分采用的材料均为晶体材料,其中又以锗、硅、砷化锌、硫化锌等晶体材料的使用最为常见,其在热像仪等红外光学仪器中的使用量达到了总使用量的 80%以上^[1-3]。

硅是一种金刚石结构的半导体晶体材料,化学性质稳定,不溶于水,而且不溶于大多数酸类溶液,红外光学性能良好,折射率较高,色散系数较小,在 3~5 μm 波段被普遍用于制作窗口、透镜和整流罩等。但红外线在其表面的反射损失非常高,因此在硅的表面覆盖一层增透膜是有实际应用价值的^[4-6]。

镀增透膜对于透射式红外光学元器件是不可缺少的工艺,它不但提高了光学元件的透过率,排除了杂光,还对镜片本身起到了保护作用。但增透膜也有自身的缺陷,如在潮热环境条件下易脱落,这对光学镀膜是一种严酷的考验。一旦镀膜脱落,不但对镜片起不到保护作用,使透过率下降,而且会造成散射,使能量下降,直接影响观察效果^[6-10]。风沙、雨水侵蚀等恶劣环境的影响使增透膜的力学性能和红外透过率降低,甚至导致其制成的红外探测器丢失目标^[11-13]。因此,有必要开展红外光学镀膜元件的环境适应性研究。目前,国内针对光学增透膜环境适应性检验的主要依据是 GB/T 26332.3—2015《光学和光子学 光学薄膜 第 3 部分:环境适应性》^[14]和 GB/T 26331—2010《光学薄膜元件环境适应性试验方法》^[15],美国针对光学薄膜环境适应性检验的主要依据是 MIL-C-48497A《单层或多层干涉薄膜的环境适应性

要求》^[16-17]。国内外光学薄膜环境适应性试验主要采用高温、低温、温度循环、恒定湿热、交变湿热、盐雾等实验室加速试验方法进行,针对典型自然环境下的环境适应性研究较少^[18-19]。

文中以波段在 3~5 μm 的硅基底增透膜为研究对象,在西双版纳湿热雨林、江津暖湿酸雨、漠河寒冷及永兴岛南海岛礁典型自然环境下开展棚下暴露试验(即试样静置暴露在有顶棚盖的敞开式或百叶窗式暴露棚下,样品不直接经受太阳辐射和雨淋的作用^[20]),以试验 0.5、1、1.5、2 a 为检测周期,对试验样品进行了宏观形貌、微观形貌、光谱透射比、表面化学成分的检测^[21]。结合气候特点,对性能数据变化规律进行分析研究,并对硅基底增透膜在典型自然环境中的环境适应性进行评价。

1 试验

1.1 样品

以红外光学材料硅为基底,采用增强 APS 离子源偏置电源 BIAS VOLTAGE 进行离子辅助的方法在其上镀制增透膜。增透膜材料主要成分是 Ge、ZnS、YbF₃、Y₂O₃ 等,膜层结构示意图见图 1,试验样品规格为 $\phi 25\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 。

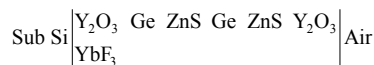


图 1 增透膜的结构示意图
Fig.1 Structural diagram of antireflection film

1.2 典型自然环境棚下暴露试验

将硅基底增透膜样品在湿热雨林(西双版纳)、暖湿酸雨(江津)、寒冷(漠河)及南海岛礁(永兴岛)典型自然环境下开展大气棚下暴露试验,按 0.5、1、1.5、2 a 的试验周期进行取样和性能检测。

1.3 性能检测

每个试验周期结束后, 取回 3 件平行样品进行宏观形貌、微观形貌、光谱透射比、表面化学成分等的检测, 其中宏观形貌采用肉眼观察, 微观形貌采用金相显微镜和扫描电子显微镜放大观察, 主要观察腐蚀、脱膜、变色、开裂等现象。形貌检测完成后, 用酒精乙醚溶液对样品表面进行清洁处理, 采用傅里叶红外光谱仪对样品的光谱透射比进行检测。选择典型样品, 采用能谱仪对其表面化学成分进行分析。

2 结果与讨论

2.1 宏观形貌分析

硅基底增透膜样品在不同典型自然环境中, 棚下

暴露试验不同时间后的表面宏观形貌如图 2 所示。由图 2 可以看出, 在湿热雨林、暖湿酸雨、寒冷及南海岛礁典型自然环境中试验 0.5 a 后, 硅基底增透膜表面均出现不同程度的腐蚀、变色、脱膜现象, 其中南海岛礁气候环境中的较严重, 其次是暖湿酸雨气候环境, 再次是湿热雨林气候环境, 寒冷气候环境中的腐蚀和变色相对较轻。随着试验时间的延长, 腐蚀和变色加重, 腐蚀和变色区域逐渐变大。试验 2 a 后, 湿热雨林、暖湿酸雨、南海岛礁典型自然环境中的试验样品整个表面基本被腐蚀, 寒冷气候环境中的试验样品 2/3 的表面也基本被腐蚀。

2.2 微观形貌分析

采用扫描电子显微镜对典型自然环境棚下暴露试验后硅基底镀增透膜样品的表面微观形貌进行了

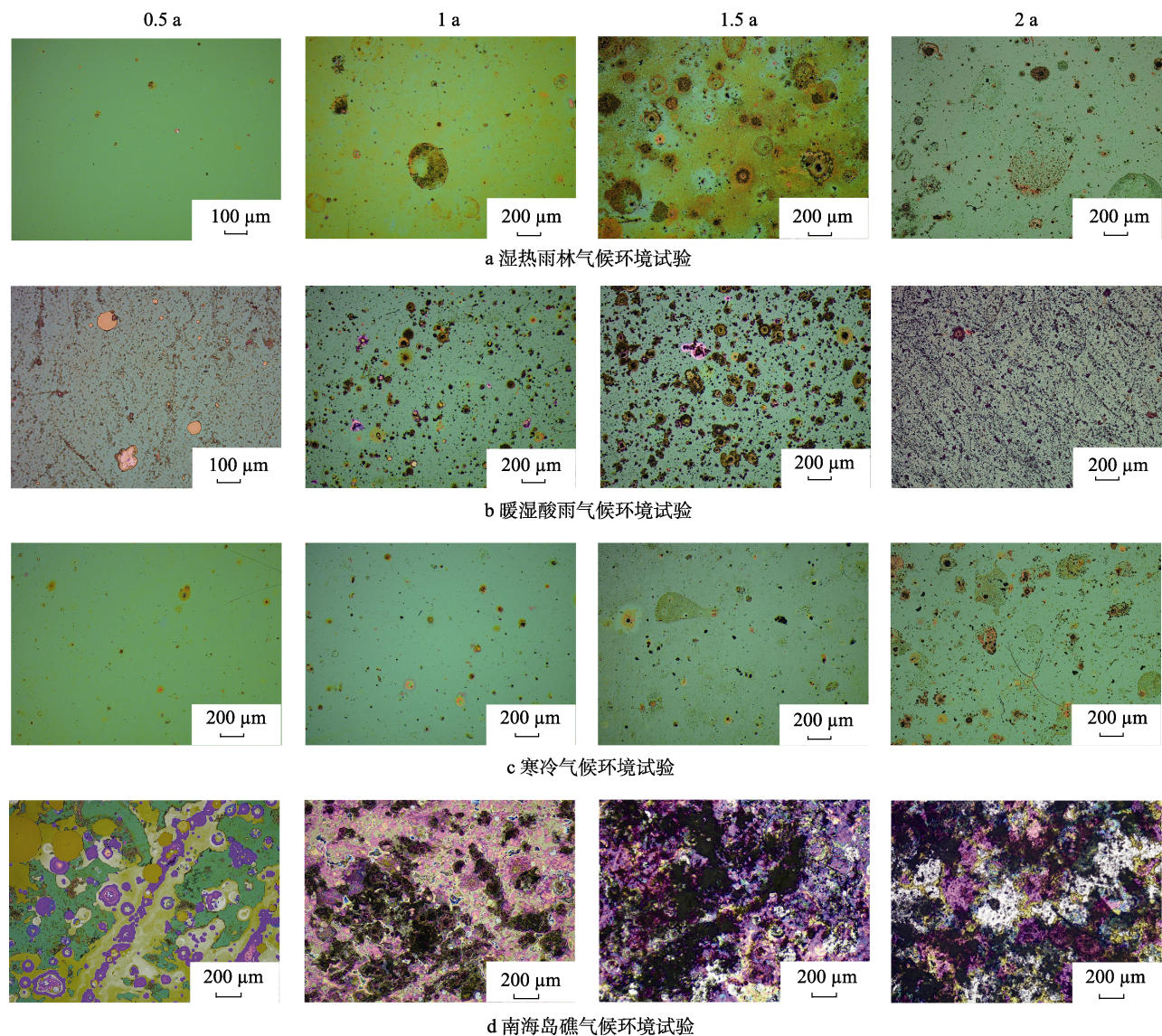


图 2 硅基底增透膜在不同自然环境棚下暴露试验后表面微观形貌

Fig.2 Surface micro morphologies of antireflection films on silicon after exposure test under shed in different natural environments: a) environment test in humid and hot rain forest climate; b) environment test in the warm and humid acid rain climate; c) environment test in the cold climate; d) environment test in the island-reef climate of the South China Sea

分析, 分析结果见图 3 和图 4。由 SEM 形貌可以看出, 经过 0.5 a 的湿热雨林、暖湿酸雨、寒冷气候环境试验后, 硅基底镀增透膜样品表面微区出现极小的缺陷(如脱膜点), 但膜层基本平整。经过 0.5 a 的南

海岛礁气候环境试验后, 样品表面微区的膜层已凹凸不平, 出现了微裂纹。随着裂纹的扩展, 将出现块状脱膜, 说明南海岛礁气候环境对硅基底增透膜产生了恶劣影响。经过 2 a 的典型自然环境试验后, 硅基底

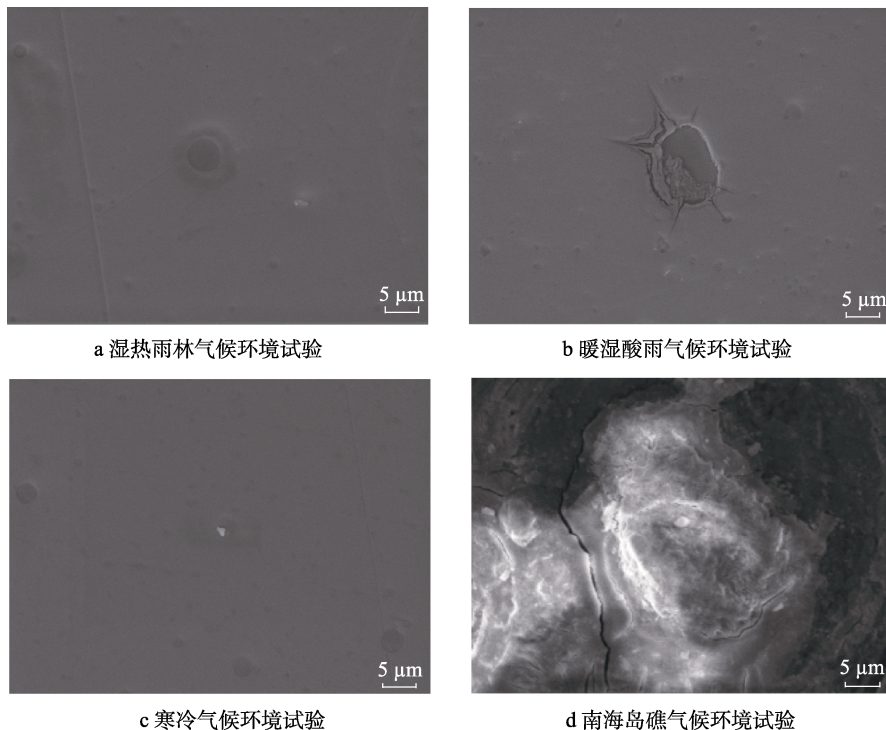


图 3 典型自然环境棚下暴露试验 0.5 a 样品的 SEM 形貌

Fig.3 SEM morphologies of samples exposed under shed after 0.5 years in typical natural environment: a) environment test in the humid and hot rain forest climate; b) environment test in the warm and humid acid rain climate; c) environment test in the cold climate; d) environment test in the island-reef climate of the South China Sea

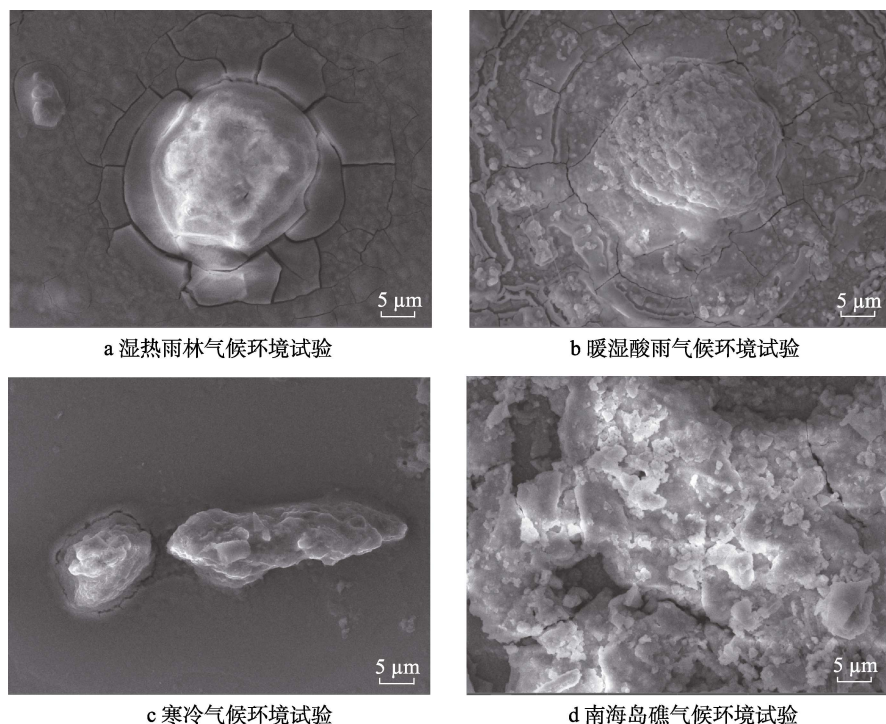


图 4 典型自然环境棚下暴露试验 2 a 样品的 SEM 形貌

Fig.4 SEM morphologies of samples exposed under shed after 2 years in typical natural environment: a) environment test in the humid and hot rain forest climate; b) environment test in the warm and humid acid rain climate; c) environment test in the cold climate; d) environment test in the island-reef climate of the South China Sea

镀增透膜样品表面微区的膜层均出现了不同程度的损伤。根据微区膜层损伤面积分析,在南海岛礁气候环境的损伤最大,其次是暖湿酸雨气候,再次是湿热雨林气候,相对损伤最小的是寒冷气候。由此可以说明,硅基底增透膜在南海岛礁、暖湿酸雨、湿热雨林、寒冷气候环境下的环境适应性都不太好,尤其是经受南海岛礁气候环境棚下暴露试验的时间不到 0.5 a。

2.3 光谱透射比检测数据分析

典型自然环境棚下暴露试验前,对硅基底增透膜样品的光谱透射比进行了检测,3~5 μm 波段范围内的光谱透射比平均值为 97.28%。与试验前的光谱透射比平均值进行比较,试验 0.5、1、1.5、2 a 后的光谱透射比平均值下降比例见表 1,光谱透射比曲线见图 5。由光谱透射比下降比例可以直观看出,南海岛礁气候环境试验后,硅基底增透膜样品的光谱透射比出现明显下降,随着试验时间的延长,下降比例逐渐增大。试验 1 a 后,光谱透射比下降比例接近 50%;试验 2 a 后,光谱透射比下降比例接近 80%。按光谱

透射比下降比例进行排序,南海岛礁气候环境中样品的光谱透射比下降比例最大,其次是暖湿酸雨气候环境,再次是湿热雨林气候环境,最小的是寒冷气候环境。这与微观形貌检测结果一致,说明微观形貌的变化与光谱透射比下降有很强的相关性。由光谱透射比曲线可以看出,经过 0.5、1、1.5、2 a 的自然环境试验后,硅基底镀增透膜样品的光谱透射比在 3~5 μm 波段范围内均出现了下降,说明典型气候环境试验对硅基底镀增透膜整个使用波段的光谱透射比产生了不利影响。

表 1 硅基底增透膜样品光谱透射比下降比例
Tab.1 Decreasing ratio of spectral transmittance of antireflection film sample on silicon

试验时间/a	湿热雨林气候环境	暖湿酸雨气候环境	寒冷气候环境	南海岛礁气候环境
0.5	0.3	1.9	0.7	23.4
1	1.6	7.3	1.6	45.3
1.5	3.4	7.3	3.1	62.1
2	6.9	9.7	3.0	78.7

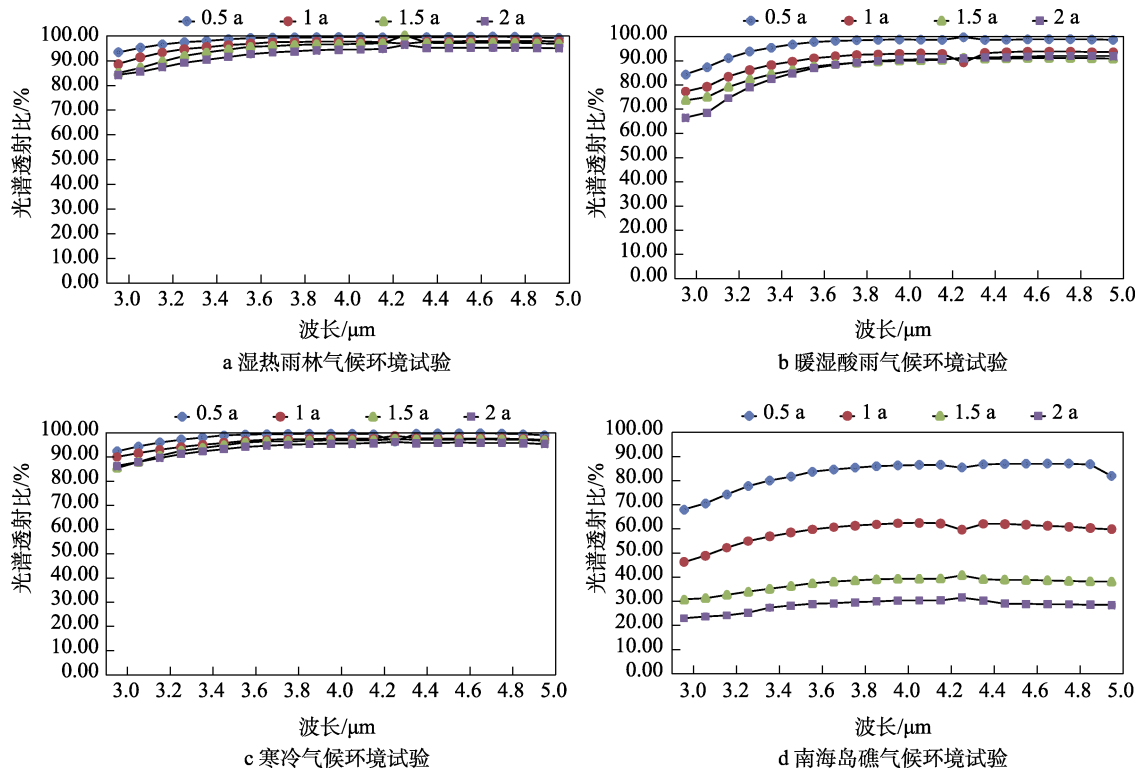


图 5 典型自然环境棚下暴露试验不同周期后的光谱透射比曲线

Fig.5 Spectral transmittance curve after different cycles of exposure test under shed in typical natural environment: a) environment test in the humid and hot rain forest climate; b) environment test in the warm and humid acid rain climate; c) environment test in the cold climate; d) environment test in the island-reef climate of the South China Sea

2.4 表面化学成分分析

采用扫描电子显微镜和能谱仪对典型自然环境棚下暴露试验后硅基底增透膜样品表面的化学成分

进行了分析,分析结果见图 6—9 和表 2、表 3。
由能谱分析结果可以看出,与试验 0.5 a 相比,经过 2 a 的湿热雨林气候环境试验后,Yb、F 的原子含量明显降低,O、Si 的原子含量明显增加,说明最

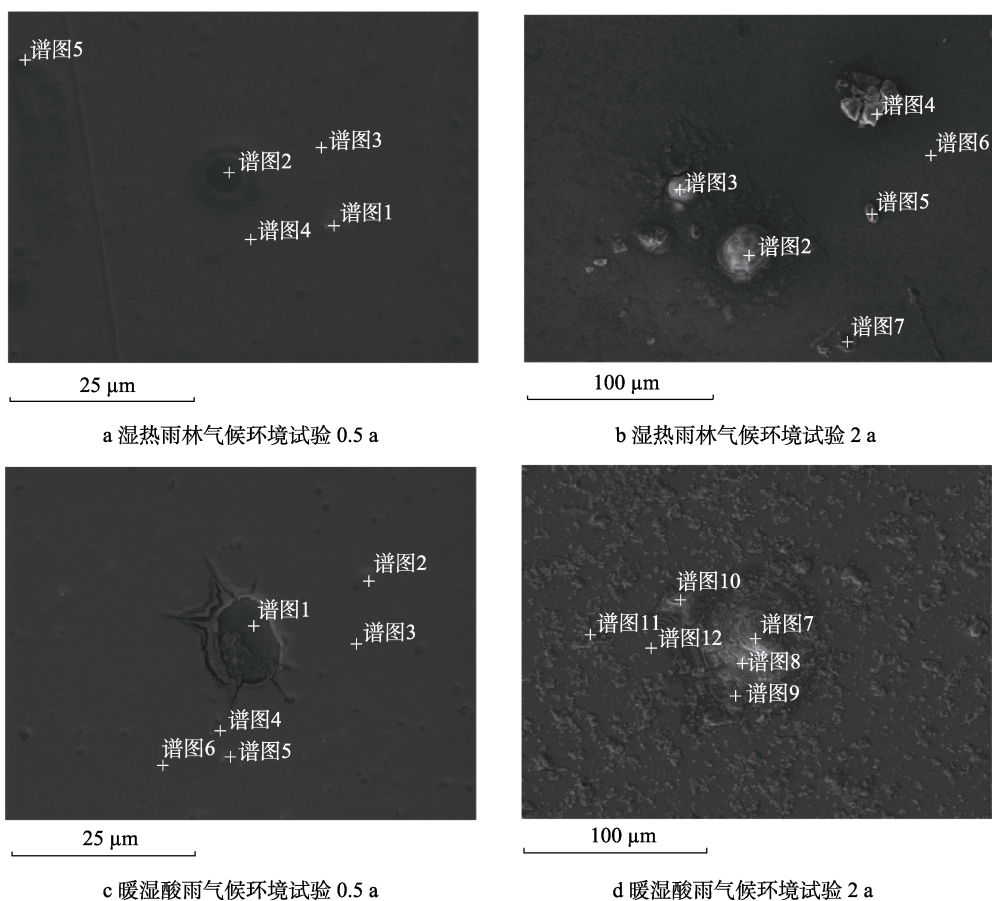


图 6 湿热雨林和暖湿酸雨气候环境试验后样品能谱分析

Fig.6 Energy spectrum analysis diagram of samples after climatic environment test in hot and humid rain forest and warm and humid acid rain climate environment: a) after 0.5-year environment test in the humid and hot rain forest climate; b) after 2-year environment test in the humid and hot rain forest climate; c) after 0.5-year environment test in the warm and humid acid rain climate; d) after 2-year environment test in the warm and humid acid rain climate

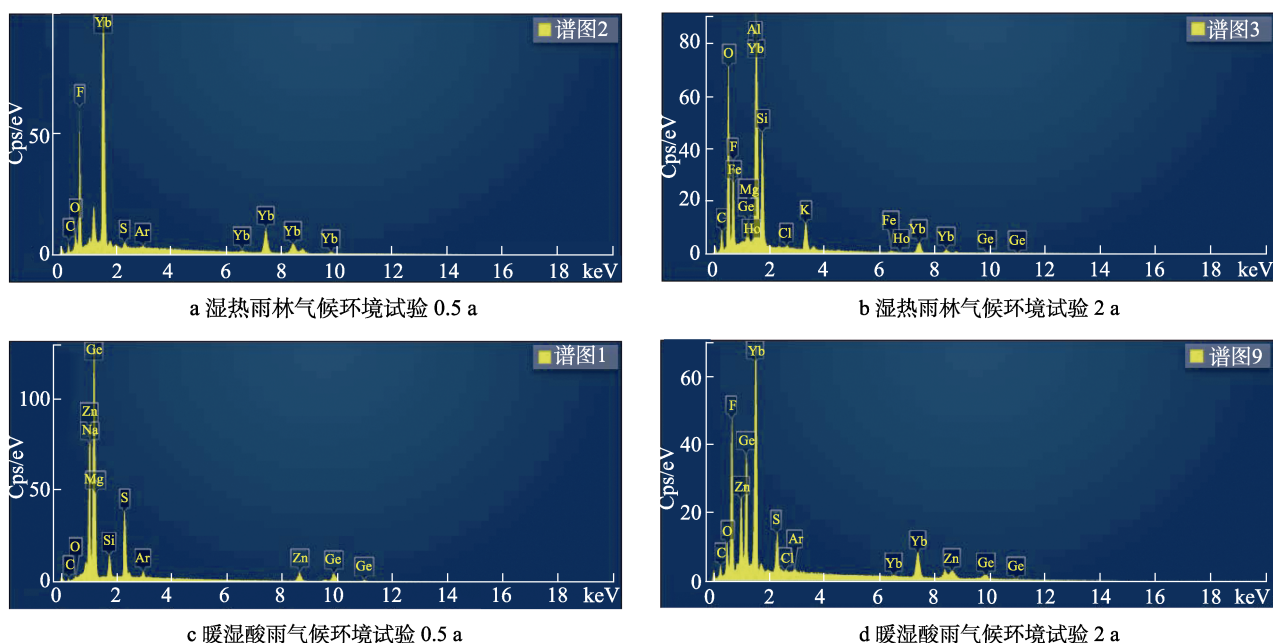


图 7 湿热雨林和暖湿酸雨气候环境试验后样品能谱分析结果

Fig.7 Energy spectrum analysis results of samples after climatic environment test in humid and hot rain forest and warm and humid acid rain climate environment: a) after 0.5-year environment test in the humid and hot rain forest climate; b) after 2-year environment test in the humid and hot rain forest climate; c) after 0.5-year environment test in the warm and humid acid rain climate; d) after 2-year environment test in the warm and humid acid rain climate

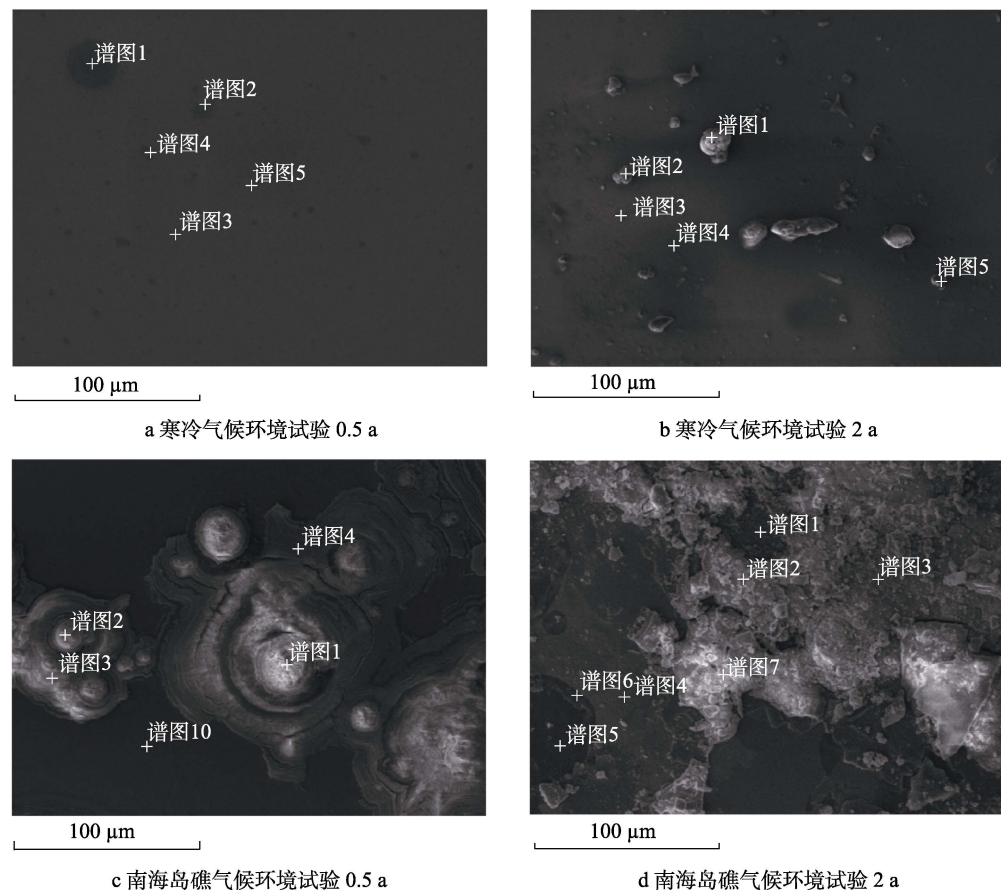


图 8 寒冷和南海岛礁气候环境试验后样品能谱分析图

Fig.8 Energy spectrum analysis diagram of samples after climatic environment test in cold climate and the island-reef climate of the South China Sea environment: a) after 0.5-year environment test in the cold climate; b) after 2-year environment test in the cold climate; c) after 0.5-year environment test in the island-reef climate of the South China Sea ; d) after 2-year environment test in the island-reef climate of the South China Sea

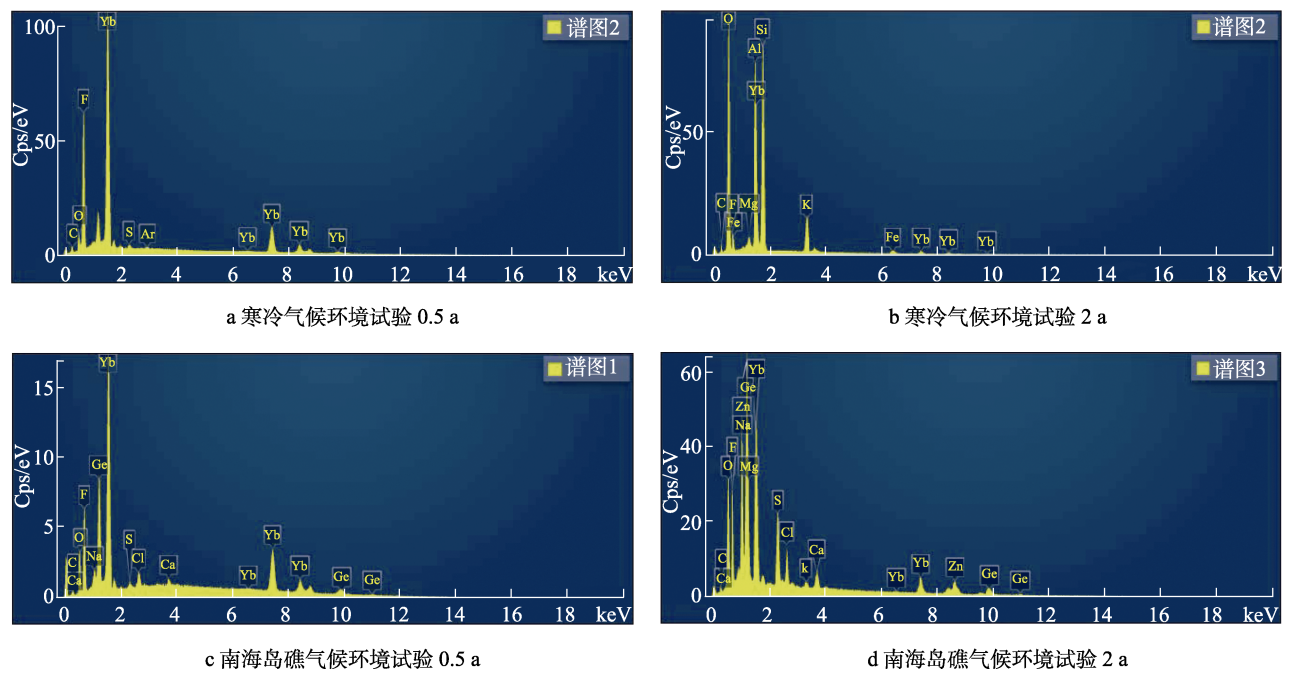


图 9 寒冷和南海岛礁气候环境试验后样品能谱分析结果

Fig.9 Energy spectrum analysis results of samples after climatic environment test in cold climate and the island-reef climate of the South China Sea : a) after 0.5-year environment test in cold climate; b) after 2-year environment test in cold climate; c) after 0.5-year environment test in the island-reef climate of the South China Sea ; d) after 2-year environment test in the island-reef climate of the South China Sea

表2 湿热雨林和暖湿酸雨气候环境试验后样品
表面化学元素原子含量

Tab.2 Atomic content of surface chemical elements of samples after climatic environment test in humid and hot rain forest and warm and humid acid rain climate environment

元素	线类型	湿热雨林气候		暖湿酸雨气候	
		试验 0.5 a	试验 2 a	试验 0.5 a	试验 2 a
		(谱图 2)	(谱图 3)	(谱图 1)	(图谱 9)
F	K 线系	51.45	19.34		39.41
Yb	M 线系	15.95	4.47		11.8
O	K 线系	7.16	40.52		10.74
S	K 线系	0.81		14.94	4.49
Zn	L 线系			14.95	5.06
Si	K 线系		7.83	5.7	
Ge	L 线系				5.02

表3 寒冷和南海岛礁气候环境试验后样品
表面化学元素原子含量

Tab.3 Atomic content of surface chemical elements of samples after climatic environment test in cold climate and the island-reef climate of the South China Sea

元素	线类型	寒冷气候		南海岛礁气候	
		试验 0.5 a	试验 2 a	试验 0.5 a	试验 2 a
		(谱图 2)	(谱图 2)	(谱图 1)	(图谱 3)
F	K 线系	55.83	4.86	34.85	19.37
Yb	M 线系	18.06	0.89	17.16	6.56
O	K 线系	7.5	56.55	23.29	27.8
S	K 线系	0.62			5.57
Zn	L 线系				6.69
Si	K 线系		13.56		
Ge	L 线系			6.2	8.77
Cl	K 线系			2.47	3.1
Na	K 线系			1.57	3.93

外层的 YbF_3 已出现了部分脱落, 局部区域膜层已完全脱落, 露出了基底材料硅。检测区域化学主成分, 含有的主要元素有 Yb、F、O、Si, 这些元素基本来源于样品本身。

经过 0.5 a 的暖湿酸雨气候环境试验后, 检测区域 Yb、F 的原子含量已超出设备检出限; 检测出的 Zn、S 原子含量是增透膜中的内层膜成分, 说明部分区域最外层的 YbF_3 已完成脱落; 检测出的 Si 原子是样品的基底材料, 说明部分区域膜层已完全脱落。经过 2 a 的暖湿酸雨气候环境试验后, 检测区域的主成分含有的元素有 Yb、F、O、S、Zn、Ge, 这些元素均来源于增透膜不同膜层, 说明膜层出现了分层脱落。

与 0.5 a 相比, 经过 2 a 的寒冷气候环境试验后, Yb、F 的原子含量明显降低, O、Si 的原子含量明显增加, 说明最外层的 YbF_3 已出现了部分脱落, 局部

区域膜层已完全脱落, 露出了基底材料硅。检测区域化学主成分含有的主要元素有 Yb、F、O、Si, 这些元素基本来源于样品本身。

经过 2 a 的南海岛礁气候环境试验后, 检测区域的化学主成分含有的主要元素有 Yb、F、O、S、Zn、Ge、Na、Cl, 其中 Yb、F、O、S、Zn、Ge 来源于样品本身。由这些元素的原子含量也可以看出, 增透膜最外层的 Yb_3F 出现了部分脱落, 露出内层的 ZnS、Ge 等, 造成 Yb、F 原子含量降低, S、Zn、Ge 原子含量增加。Na、Cl 来源于大气环境中的海洋粒子, 说明大气环境中的有害介质在样品表面出现了沉积。

2.5 分析讨论

由外观形貌可以看出, 硅基底增透膜样品在湿热雨林、暖湿酸雨、寒冷、南海岛礁气候环境试验后, 在试验初期出现了局部点缺陷。随着试验时间的延长, 最初出现的点缺陷逐步扩大, 点缺陷数量也逐步增多。通过查阅文献, 张殷华^[22]在硅基板上制备了氟化铟薄膜, 用扫描电镜观测了其断面的微观结构, 属于典型的柱状结构, 薄膜的堆积密度不高, 因而容易吸附水汽, 导致膜层环境适应性和可靠性差, 可在氟化铟薄膜表面镀硫化锌或者氧化铅薄膜作为保护层, 减少氟化铟对水的吸收, 提升增透膜的稳定性和环境适应性。此外, Pearson、Lissberger、Pulker 和 Guenther 用扫描电子显微镜系统研究了红外薄膜的微观结构, 也发现氟化物薄膜为典型的柱状结构, 这种柱状结构会导致薄膜吸附水汽, 分子之间的偶极子相互作用, 使薄膜产生膨胀或收缩的趋势, 从而引发水致应力, 导致脱膜^[23-27]。由此, 可基本判定论文中的增透膜环境损伤的原因是吸潮及水致应力引起的物理效应。

对外观形貌、微观形貌、光谱透射比、表面化学成分进行综合分析, 可以得出以 YbF_3 为最外层膜的硅基底增透膜在湿热雨林、暖湿酸雨、寒冷、南海岛礁气候环境中的环境适应性较差, 按照 GJB 2485—95《光学膜层通用规范》要求, 光学膜层不允许有脱膜、裂纹、退色、条纹等^[28]。在试验 0.5 a 后, 硅基底增透膜已全部失效, 不满足使用要求。

3 结论

1) 以氟化铟为最外层膜的硅基底增透膜在湿热雨林、暖湿酸雨、寒冷、南海岛礁气候环境中的环境适应性较差, 试验 0.5 a 后, 已全部失效, 不满足使用要求。

2) 4 种典型气候环境进行比较, 硅基底增透膜在南海岛礁气候环境中的环境适应性最差, 其次是暖湿酸雨气候环境, 再次是湿热雨林气候环境, 相对较好一点的是寒冷气候环境。

3) 硅基底增透膜在湿热雨林、暖湿酸雨、寒冷、

南海岛礁气候环境中的损伤模式主要表现在脱膜、变色、光谱透射比下降。脱膜的原因初步分析是外层氟化铟膜层的柱状结构容易吸附水汽,水分子之间的偶极子相互作用,使薄膜产生膨胀或收缩的趋势,从而引发水致应力,最终导致薄膜脱落。

4) 建议在硅基底上镀增透膜时,在满足性能要求的情况下,最外层尽量不选用氟化铟,可在氟化铟薄膜表面镀硫化锌或者氧化铅薄膜作为保护层,减少氟化铟对水的吸收,提升增透膜的稳定性和环境适应性。

参考文献:

- [1] 申卫江. 常用红外光学材料及其加工技术[J]. 科技视界, 2019(15): 147-149.
SHEN Wei-jiang. IR Optical Materials and Processing Techniques[J]. Science & Technology Vision, 2019(15): 147-149.
- [2] 张志坚. 红外光学材料的现状与发展[J]. 云南冶金, 2000, 29(5): 35-41.
ZHANG Zhi-jian. Status Quo and Development of Infrared Optical Materials[J]. Yunnan Metallurgy, 2000, 29(5): 35-41.
- [3] 徐光峰. 红外探测材料的发展及应用[J]. 中国新通信, 2017, 19(24): 90.
XU Guang-feng. Development and Application of Infrared Detection Materials[J]. China New Telecommunications, 2017, 19(24): 90.
- [4] 蔡立. 光学零件加工技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2006.
CAI Li. Optical Parts Processing Technology[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2006.
- [5] 杨益民, 郭建, 杨国伟, 等. 以非晶碳作硅基红外增透膜的实验研究[J]. 光学学报, 2002, 22(11): 1296-1299.
YANG Yi-min, GUO Jian, YANG Guo-wei, et al. Experimental Study on Infrared Film of Antireflective Amorphous Carbon on Silicon[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(11): 1296-1299.
- [6] 吴宗凡, 柳美琳, 张绍举, 等. 红外与微光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 55-81.
WU Zong-fan, LIU Mei-lin, ZHANG Shao-ju, et al. Infrared and Low-Light Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 55-81.
- [7] 杨培志, 刘黎明, 张小文, 等. 长波红外光学材料的研究进展[J]. 无机材料学报, 2008, 23(4): 641-646.
YANG Pei-zhi, LIU Li-ming, ZHANG Xiao-wen, et al. Research Progress of Long-Wavelength Infrared Optical Materials[J]. Journal of Inorganic Materials, 2008, 23(4): 641-646.
- [8] 王建华. 对军用红外光学器件镀膜可靠性的分析[J]. 国防技术基础, 2006(8): 11-12.
WANG Jian-hua. Analysis Reliability of Coating on Military Infrared Optical Devices[J]. Technology Foundation of National Defence, 2006(8): 11-12.
- [9] 杨玉萍, 刘剑, 周晓瑜, 等. 红外增透膜湿热雨林气候环境适应性分析[J]. 红外技术, 2021, 43(12): 1197-1201.
YANG Yu-ping, LIU Jian, ZHOU Xiao-yu, et al. Environmental Adaptability of Infrared Antireflection Films in Humid Hot Rain Forest[J]. Infrared Technology, 2021, 43(12): 1197-1201.
- [10] 何远东, 张伟才, 闫萍, 等. 红外增透薄膜的研究进展[J]. 节能技术, 2016, 34(2): 125-128.
HE Yuan-dong, ZHANG Wei-cai, YAN Ping, et al. Research Progress of Infrared Antireflection Thin Films[J]. Energy Conservation Technology, 2016, 34(2): 125-128.
- [11] 洪冬梅, 陈生, 曹海云, 等. 红外光学用薄膜[J]. 光学仪器, 2004, 26(2): 204-206.
HONG Dong-mei, CHEN Sheng, CAO Hai-yun, et al. Thin Film for Infrared Optics[J]. Optical Instrument, 2004, 26(2): 204-206.
- [12] 王大兴. 氟化镁基底 3~5 μm 红外增透保护膜的研究与制备[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
WANG Da-xing. Design and Deposition of Infrared Antireflection Protection Film on Magnesium Fluoride Substrate For 3-5 μm[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
- [13] 黄占杰. 中红外导流罩及窗口材料的发展趋势[J]. 材料导报, 1998, 12(3): 30-33.
HUANG Zhan-jie. The Trends of Development of Mid-wave Infrared Guided Flow Dome and Optical Window Materials[J]. Materials Review, 1998, 12(3): 30-33.
- [14] GB/T 26332.3—2015, 光学和光子学 光学薄膜第3部分: 环境适应性 [S].
GB/T 26332.3—2015, Optics and Photonics-Optical Coating—Part 3: Environmental Durability[S].
- [15] GB/T 26331—2010, 光学薄膜元件环境适应性试验方法[S].
GB/T 26331—2010, Optical Coatings Environmental Durability Test Methods[S].
- [16] MIL-C-48497A, 单层或多层干涉薄膜的环境适应性要求[S].
MIL-C-48497A, Military Specification Coating Single or Multilayer Interference: Durability Requirements for[S].
- [17] 高鹏, 金秀, 任少鹏, 等. 浅谈国内外光学薄膜技术标准[J]. 真空, 2020, 57(4): 19-23.
GAO Peng, JIN Xiu, REN Shao-peng, et al. Discussion on Optical Coating Standards at Home and Abroad[J]. Vacuum, 2020, 57(4): 19-23.
- [18] 李晓刚. 材料环境适应性评估技术及其进展[J]. 世界科技研究与发展, 2001, 23(4): 11-17.
LI Xiao-gang. The Development of Environment Fitness-for-Service Technology for Materials[J]. World Sci-Tech R & D, 2001, 23(4): 11-17.
- [19] 杨万均. 某军用雷达环境适应性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
YANG Wan-jun. Research on the Environmental Worthi-

- ness of a Military Rader[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
- [20] 汪学华. 自然环境试验技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.
- WANG Xue-hua. Natural Environment Test[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.
- [21] 王雷, 王生云, 侯西旗, 等. 红外光学材料参数测试[J]. 应用光学, 2001, 22(6): 40-42.
- WANG Lei, WANG Sheng-yun, HOU Xi-qi, et al. Parameter Measurement for Infrared Optical Materials[J]. Journal of Applied Optics, 2001, 22(6): 40-42.
- [22] 张殷华. 低吸收红外薄膜制备及其环境稳定性可靠性研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2019.
- ZHANG Yin-hua. Research on Preparation of Low Absorption Infrared Coatings and Its Environmental Stability and Reliability[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [23] MACLEOD H A. 薄膜光学[M]. 徐德刚, 等译. 北京: 科学出版社, 2016: 409-427.
- MACLEOD H A. Thin-Film Optical Filters[M]. XU De-gang, et al. Translated. Beijing: Science Press, 2016: 409-427.
- [24] 王延超, 高劲松. 微结构硅基近红外材料及其光电特性研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- WANG Yan-chao, GAO Jing-song. Microstructure Silicon-Based Near-Infrared Materials and Its Optics, Photoelectric Characteristics Research[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2017.
- [25] 王猛, 李成明, 朱瑞华, 等. 立方 Y2O3 薄膜结构、力学及光学性能的研究[J]. 人工晶体学报, 2014, 43(1): 25-30.
- WANG Meng, LI Cheng-ming, ZHU Rui-hua, et al. Study on Structure, Mechanical and Optical Properties of Cubic Y2O3 Thin Films[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2014, 43(1): 25-30.
- [26] 余怀之. 红外光学材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 55-60.
- YU Huai-zhi. Infrared Optical Material[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 55-60.
- [27] 张昭琳, 苏俊宏. 光学薄膜损伤表面三维微观形貌的仿真与重构[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 80-89.
- ZHANG Zhao-lin, SU Jun-hong. Simulation and Reconstruction of 3D Microscopic Morphology of Damaged Optical Film Surface[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 80-89.
- [28] GJB 2485—95, 光学膜层通用规范[S].
- GJB 2485—95, General Specification for Optical Coating[S].

责任编辑: 刘世忠