

硫系玻璃基底减反保护膜及其耐环境适应性的研究

付秀华¹, 黄宏宇^{1*}, 张静¹, 张功¹, 尹士平², 刘克武²

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

²广东先导先进材料股份有限公司, 广东 清远 511517

摘要 基于硫系玻璃 IRG206($\text{As}_{10}\text{Se}_{60}$)基底, 研制了 8~12 μm 波段的减反保护膜。该薄膜包含介质膜与类金刚石(DLC)保护膜两部分, 可用于无热化红外探测系统窗口片中。研究了介质膜的破损机理, 通过优化介质膜的沉积温度, 提高了介质膜的附着力。研究了压强对 DLC 薄膜微观结构和应力的影响, 通过将 DLC 薄膜拆分为低应力黏结层与高应力耐摩擦层, 提升了薄膜耐摩擦性能与膜层牢固度, 并降低了膜层应力。测试结果表明, 减反保护膜在 8~12 μm 波段的平均反射率为 3.0%, 且通过了 GJB2485-1995 标准测试中的盐雾测试、高低温测试和重摩擦测试, 具有良好的耐环境适应性能。

关键词 薄膜; 光学薄膜; 窗口片; 应力; 耐摩擦

中图分类号 O484

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2131002

Anti-Reflection Protective Film of Chalcogenide Glass Substrate and Its Environmental Adaptability

Fu Xiuhua¹, Huang Hongyu^{1*}, Zhang Jing¹, Zhang Gong¹, Yin Shiping², Liu Kewu²

¹School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²Guangdong Vital Advanced Materials Co., Ltd., Qingyuan, Guangdong 511517, China

Abstract Based on the chalcogenide glass IRG206 ($\text{As}_{10}\text{Se}_{60}$) substrates, we prepare the 8–12 μm anti-reflection protective films. This kind of film contains two parts: dielectric film and diamond-like carbon (DLC) protective film. It can be applied in the window lens of the non-thermalized infrared detection system. Moreover, the fracture mechanism of dielectric films is studied, and the deposition temperature of dielectric films is optimized to improve the adhesion of dielectric films. In addition, the effect of pressure on the microstructures and stress of DLC films is studied. By splitting the DLC film into the low-stress adhesive layer and the high-stress friction-resistant layer, the film stress is reduced, but the friction resistance as well as firmness of films are improved. The test results reveal that the average reflectivity of anti-reflection films at 8–12 μm is 3%. Furthermore, the anti-reflection films pass through the salt spray test, high and low temperature test, and severe abrasion test specified by GJB2485-1995, and possess good environmental adaptability.

Key words thin films; optical thin film; window lens; stress; friction resistance

OCIS codes 310.1210; 310.1515; 310.1860; 040.3060

1 引 言

近年来, 红外探测技术在各个领域得到了广泛使用, 而红外窗口镜片作为整个光学系统中的重要防护元器件, 其性能决定了光学系统的使用期限。因此, 具有高透过率并可适应恶劣环境的高性能窗口镜片成为研究的重点。

本文选用的硫系玻璃的牌号为 IRG206, 该硫系

玻璃的化学成分为 $\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$, 其折射率约为 2.78 (波长为 10 μm)。该材料在 1~12 μm 波段透明, 相对于其他牌号具有更宽的透过波段。相对于传统的红外镜片 Ge、ZnS 和 ZnSe 等, 其折射率受温度的影响较小, 生产成本低, 使用性能优, 成为了研究热点。

2003 年, Zhang 等^[1] 针对硫系玻璃 $\text{Ge}_{22}\text{As}_{20}\text{Se}_{58}$ 制备的减反射薄膜在 8~11 μm 波段的平均透过率大于 97%。2017 年, 费海明^[2] 在硫系玻璃 ($\text{As}_{10}\text{Se}_{60}$)

收稿日期: 2020-06-30; 修回日期: 2020-07-16; 录用日期: 2020-07-24

基金项目: “十三五”装备预备基金(414xxxx0202)

* E-mail: huanghyfilm@126.com

基底上制备的增透保护膜的平均透过率大于 90%，薄膜的抗磨强度和耐环境适应性达到了 JB/T8226.1-1999 标准要求。2017 年，金扬利等^[3]针对 (As₄₀Se₆₀) 硫系玻璃制备的减反射膜在 8~12 μm 波段的平均剩余反射率为 1%。

目前，对于硫系玻璃表面沉积的光学薄膜，国内的相关研究主要面临薄膜附着力差且难以通过高强度耐环境性能试验^[4-6]的问题。因此，本文主要针对提高硫系玻璃表面光学薄膜的附着力与耐环境适应性展开了一系列研究。

2 材料选择与膜系结构设计

在实际应用过程中，红外探测系统窗口片的一面暴露在大气环境中，需要面对沙尘、盐雾和雨淋等环境问题，而另一面密封在系统中，不会与大气直接接触。因此，在窗片一面上镀制减反射膜与类金刚石(DLC)保护膜，可以提高窗口片的耐环境性能，而在另一面镀制减反射膜可以保证窗口片具有良好的光谱性能。

对于 8~12 μm 波段上的减反射膜，常用的薄膜材料为 YbF₃。但 YbF₃ 薄膜较软，且薄膜应力大，如果直接在 YbF₃ 薄膜上镀制 DLC 保护膜，DLC 薄膜的硬度会受到影响，而且所制备的薄膜附着力低。DLC 的折射率约为 2.0，并且与 Ge 有良好的结合性，因此选取 DLC 膜作为低折射率薄膜材料进行膜系结构的设计。由于 DLC 保护膜需要采用化学气相沉积方法进行制备，而 Ge 需要采用电子束加热蒸发方法进行沉积，二者无法在同一设备中进行蒸镀，若仅用 Ge 和 DLC 进行交替成膜则无法保证工艺的连续性，因此选择 Ge 作为高折射率材料，ZnS 作为中间折射率材料，DLC 作为低折射率材料仅放置于最外层进行膜系结构设计。针对减

反膜面，则选用 Ge、ZnS 和 YbF₃ 三种材料相互搭配，YbF₃ 的折射率低，不仅可以拓展带宽，还可以提高减反效果。

宽波段减反射膜的反射率 R 可采用 Willey 经验公式^[7]进行估算，其具体表达式为

$$R(B, L, T, D) = (4.37/D)(1/T)^{0.31} \cdot [\exp(B - 1.4) - 1](L - 1)^{3.5}, \quad (1)$$

式中： B 为低反射带宽度； L 为最外层薄膜的折射率； T 为膜系的总光学厚度； D 为材料高低折射率的差值。(1)式也表明，将 DLC 放置于最外层可获得较小的剩余反射率。因此，将保护膜面初始膜系结构确定为 Sub|H M₁ H M₂|Air，将减反膜面初始膜系结构确定为 Sub|H M₁ H M₁ L M₁|Air，其中 Sub 代表 IRG206，H 代表 Ge，M₁ 代表 ZnS，M₂ 代表 DLC，L 代表 YbF₃，Air 代表空气。

大量实验表明，在镀制过程中，过厚的 DLC 薄膜容易破裂，其经验厚度不宜超过 1.1 μm。因此，为了防止 DLC 脱膜，相对于锗基底上镀制的 DLC 薄膜厚度，镀制在硫系玻璃基底上的 DLC 薄膜厚度较小，故将外层 DLC 厚度固定设置为 1 μm。使用 Macleod 膜系设计软件中的单纯型优化方法对前三层进行优化，优化后的膜系结构为 Sub|2.5H 0.3M₁ 4.1H 3.6M₂|Air，设计的单面减反射保护膜的理論平均反射率为 2.2%，如图 1(a)所示。

对于减反膜面，窗口片的使用环境较恶劣，而 YbF₃ 自身易吸潮且为软料，厚度大于 120 nm 的 ZnS 具有较好的防潮作用并且硬度高于 YbF₃^[8]，综合考虑两种材料的自身性质，将 ZnS 放在膜层的最外侧。利用 Macleod 膜系设计软件中的单纯型优化方法进行优化后，膜系结构为 Sub|1.4H 0.7M₁ 1.2H 1.3M₁ L 0.5M₁|Air，设计的单面减反膜的理論平均反射率为 0.36%，如图 1(b)所示。

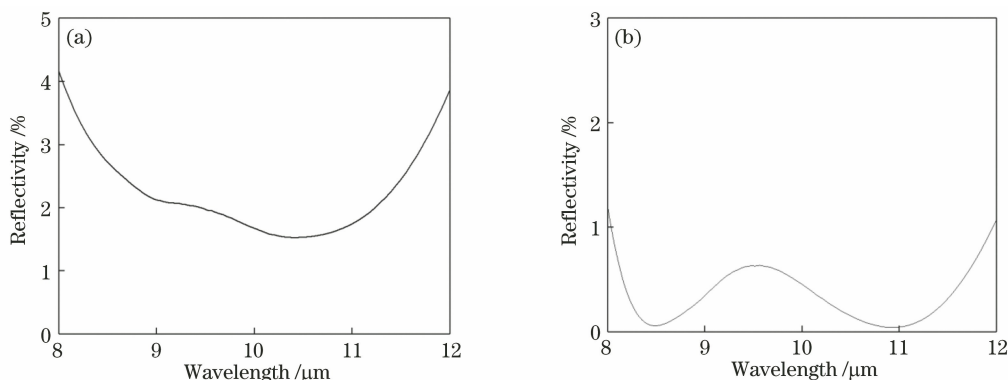


图 1 优化后的理論反射率曲线。(a)减反保护膜；(b)减反膜

Fig. 1 Theoretical reflectivity after optimization. (a) Anti-reflection protective film; (b) anti-reflection film

3 薄膜的制备与分析

3.1 介质膜的制备

在 ZZS-1100 型镀膜机上镀制介质膜。在镀制薄膜之前,为了避免由划痕、残留水汽与灰尘导致的沉积的薄膜不牢靠,先对基片进行擦拭处理,可用擦拭布蘸取少量试剂依次进行处理:乙醇-丙酮-乙醇-抛光液-乙醇-丙酮。将擦拭好的基片放到真空室中的公转盘上进行镀膜,烘烤温度设置为 140 °C,同时采用离子源进行辅助沉积。制备完成后,基片经 3M 胶带粘拉后出现脱膜现象,如图 2 所示。



图 2 140 °C 下的脱膜样片

Fig. 2 Sample with film falling off at 140 °C

根据 Townsend 等^[9]所提出的公式,可计算出第 i 层薄膜所产生的热应力 σ_i 为

$$\sigma_i = \frac{E_i(\alpha_s - \alpha_i)}{1 - \nu_i} \Delta T, \quad (2)$$

表 1 介质膜离子源参数

Table 1 Ion source parameters of dielectric film

Parameter	Plate voltage /V	Acceleration voltage /V	Anode voltage /V	Neutralizing current /A	Cathodic current /A	Ion beam current /mA
Value	350	235	50	13.5	27	50

3.2 类金刚石薄膜的制备

使用 LWT700-VI 型射频等离子体化学气相沉积设备镀制类金刚石薄膜,射频电源的功率为 400 W,反应气体为甲烷,载气为氩气,真空压强为 15 Pa,不加烘烤温度。在介质膜上镀制完 DLC 薄膜后,取出基片,经摩擦测试后, DLC 表面出现了细微划痕, CX500 显微镜下的放大图如图 4 所示。因此,需进一步提高 DLC 薄膜的硬度^[10]。

DLC 薄膜的原子轨道杂化方式主要是 sp^2 键杂化与 sp^3 键杂化,已知 sp^3 键含量越高 DLC 薄膜的性能越接近金刚石。因此通过调整工艺来提高 sp^3 键的含量,进而增强 DLC 薄膜的硬度,使 DLC

式中: $\alpha_s = 21.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 为基底热膨胀系数; E_i 、 α_i 和 ν_i 分别为第 i 层材料的杨氏模量、热膨胀系数和泊松比; ΔT 为温差(环境温度为 20 °C)。第一层材料为锗,锗的参数为 $E_1 = 102 \text{ GPa}$, $\alpha_1 = 5.75 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\nu_1 = 0.32$ 。经计算,锗热应力 σ_1 随 ΔT 的变化关系如图 3 所示。

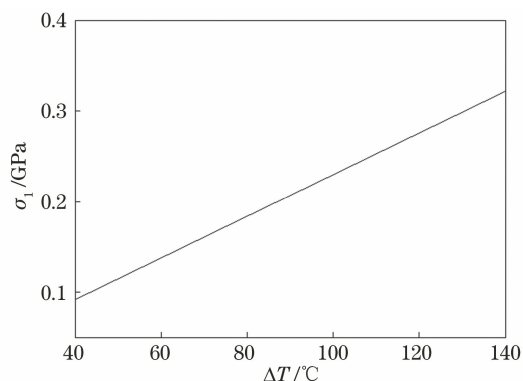


图 3 锗材料的热应力随温差的变化

Fig. 3 Relationship between thermal stress of germanium material and temperature difference

从图 3 可以看出,随着温度的升高,热应力急剧增加,因此高温下制备的薄膜的附着力差。通过降低烘烤温度来解决脱膜问题,每次降低 20 °C,重复进行试验,最终当温度降低到 90 °C 左右时,制备出的薄膜经 3M 胶带粘拉后未出现脱膜现象。同时,由于温度降低,薄膜的聚集密度减小,因此对离子源参数进行了反复的优化,具体参数如表 1 所示。

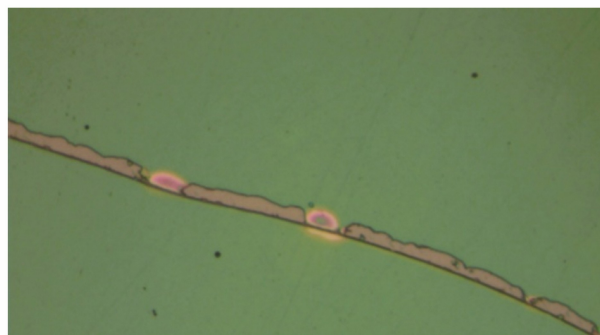


图 4 15 Pa 下制备的 DLC 薄膜的放大图

Fig. 4 Enlarged view of DLC film prepared at 15 Pa
薄膜具有良好的耐摩擦性能。通过改变沉积压强可

以很好地改变耐摩擦性能^[11]。在锗片上镀制 DLC 薄膜,沉积压强分别为 5, 10, 15 Pa, 镀制时间为 1500 s。制备完成后,以波长约为 514.5 nm 的激光作为激发光源,对锗片上的 DLC 薄膜进行拉曼光谱测试,结果如图 5(a)所示。经测试,DLC 薄膜共有两个拉曼特征峰,分别是位于 1200~1450 cm⁻¹ 的 D 峰(由缺陷或 sp² 碳环呼吸振动引起的)和位于 1500~1700 cm⁻¹ 的 G 峰(由 sp² 原子伸缩振动引起的),同时对拉曼光谱进行高斯拟合,拟合曲线如图 5(b)~(d)所示。计算 D 峰和 G 峰所包含的面

积 I_D 和 I_G ,利用 I_D/I_G 表征 sp² 键含量与 sp³ 键含量之间的比例,结果如表 2 所示。可以看出,随着压强的增加,D 峰向低波数方向移动,G 峰向高波数方向移动,说明所制备的类金刚石薄膜中的 sp² 键的含量减少且 sp³ 键的含量增加,同时 I_D/I_G 逐渐增大,sp³ 键的相对含量逐渐减少^[12];sp³ 键是 C=C 双键,属于强键,而 sp² 键是 C-C 单键,sp³ 键的相对含量增多会使薄膜的结合力增强,硬度增大。因此,低压强下制备的 DLC 薄膜的耐摩擦性能得到提高。

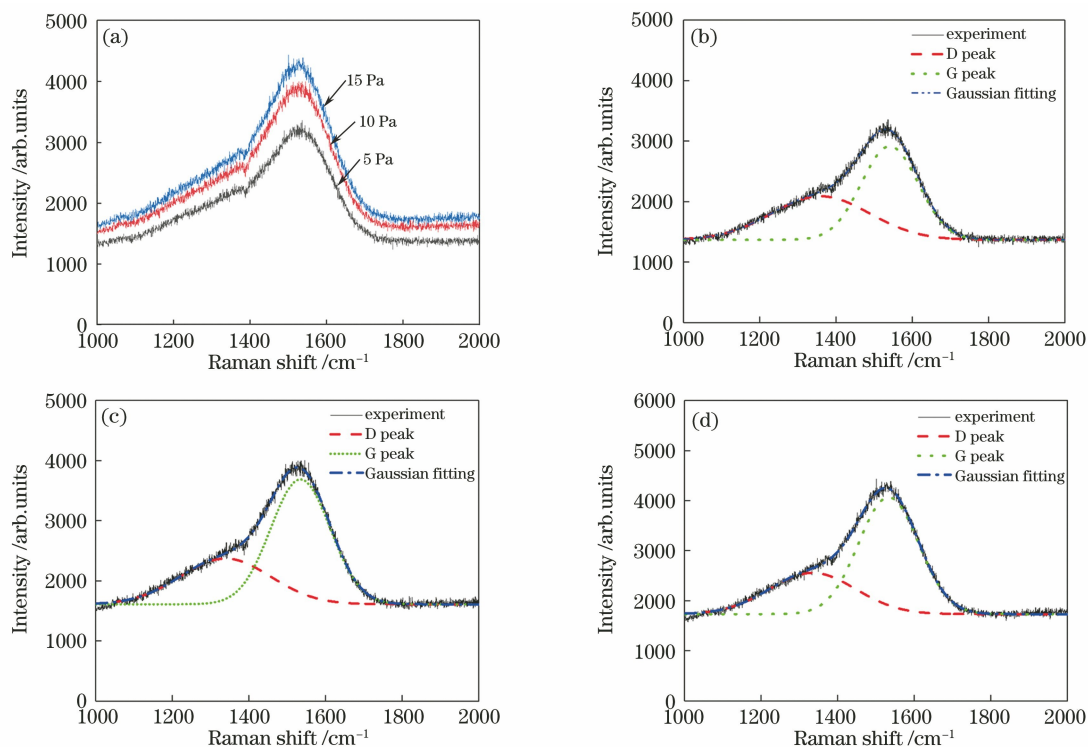


图 5 DLC 薄膜的拉曼光谱。(a)对比图;压强分别为(b) 5 Pa,(c) 10 Pa 和(d) 15 Pa 时的高斯拟合图

Fig. 5 Raman spectra of DLC film. (a) Comparison; Gaussian fitting diagrams under different pressures of (b) 5 Pa, (c) 10 Pa and (d) 15 Pa

表 2 不同压强下 DLC 薄膜的拉曼光谱拟合数据

Table 2 Raman spectral fitting data of DLC film under different pressures

Pressure /Pa	Central wavelength of D peak /cm ⁻¹	I_D	Central wavelength of G peak /cm ⁻¹	I_G	I_D/I_G
5	1338	231286	1529	515154	0.44
10	1329	265851	1531	529437	0.50
15	1325	279301	1534	534952	0.67

根据上述测试结果,在镀制完介质膜的硫系玻璃基底上,以 10 Pa 的沉积压力镀制 DLC 薄膜,经过耐摩擦测试后,DLC 薄膜出现划痕,如图 6(a)所示。由于耐摩擦效果随着压强的减少而提高。因此在 5 Pa 的沉积压力下制备 DLC 薄膜,制备后的 DLC 出现脱膜的现象,如图 6(b)所示。

为了进一步研究 DLC 薄膜的破损机理,对不同压强条件下制备的 DLC 薄膜进行应力分析。

3.3 应力分析

当薄膜沉积到基片表面时,由于应力的作用,基片表面型面会发生微弱改变。利用 Zygo 干涉仪测量出基片镀膜前后的 PV 值(波面峰值与谷值之差),

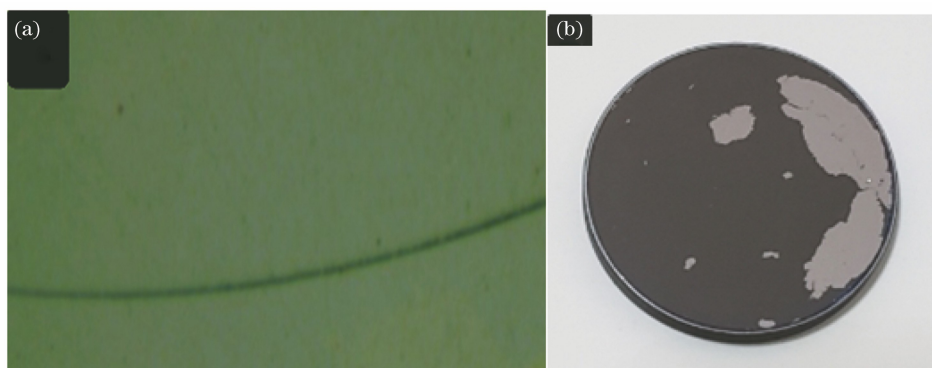


图 6 不同压强下制备的 DLC 薄膜。(a) 10 Pa 下制备的 DLC 薄膜的显微图;(b) 5 Pa 下制备的 DLC 脱膜样片

Fig. 6 DLC films prepared at different pressures. (a) Micrograph of DLC film prepared at 10 Pa;
(b) sample with DLC film falling off at 5 Pa

并结合 Stoney 公式^[13]即可计算出薄膜的表面应力 σ :

$$\sigma = \frac{4E_s}{3(1-\nu_s)} \times \frac{t_s^2}{t_a D_s^2} \Delta p, \quad (3)$$

式中: $E_s=158$ GPa 和 $\nu_s=0.24$ 分别为基底杨氏模量和泊松比; $t_s=2$ mm 和 $D_s=2.5$ mm 分别为基

底的厚度和直径; $t_a=0.0022$ mm 为薄膜的厚度; Δp 为镀膜前后 PV 值的变化量。测试中所采用的中心波长 λ 为 632.8 nm, 且采用同批次硫系玻璃以保证测试结果精准。利用 Zygo 干涉仪测量 15 Pa 压强时制备的测量样片(未脱膜)与 5 Pa 压强时制备的测试样片(脱膜)的保护膜面型, 结果如图 7 所示。

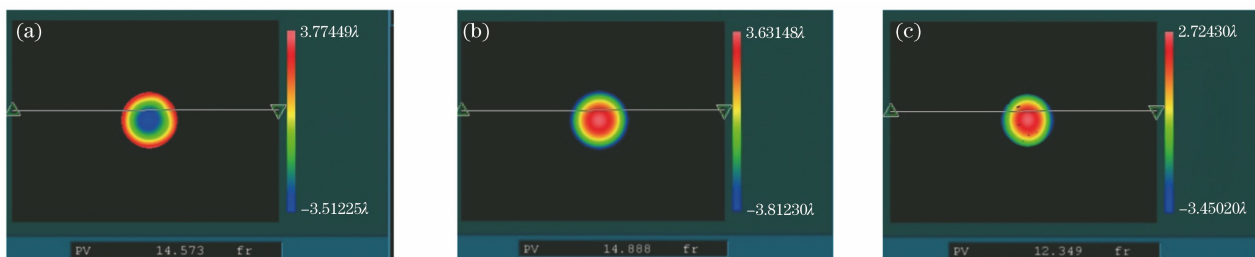


图 7 Zygo 干涉仪测试的面型图。(a) 未镀膜的硫系玻璃基底;(b) 压强为 15 Pa 时制备的 DLC 薄膜;
(c) 压强为 5 Pa 时制备的 DLC 薄膜

Fig. 7 Surface diagram tested by Zygo interferometer. (a) Uncoated chalcogenide glass substrate; (b) DLC film prepared at pressure of 15 Pa; (c) DLC film prepared at pressure of 5 Pa

镀制完 DLC 薄膜后, 基片面型变化十分明显, 基片中心高于边缘, 说明 DLC 薄膜对基片产生了极大的压应力, 并且随着沉积压强的减小, 薄膜应力从 8.0 GPa 急剧增加到了 64.7 GPa。

经分析可知, 制备工艺的改变使 DLC 薄膜中产生了较大的内应力, 随着沉积压力的减小, 分子之间的碰撞几率大大增加, sp^3 键的含量增多, DLC 膜层的内应力增大, 最终导致 DLC 膜层破裂。

为了解决这一问题, 将外层 DLC 薄膜拆分成两部分, 一部分采用 10 Pa 压强时制备的 DLC 以连接 Ge 材料与耐摩擦层, 另一部分采用 5 Pa 压强时制备的 DLC 以增强耐摩擦效果。将膜系重新优化成 $Sub|2.5H\ 0.3M_1\ 4.1H\ 1.8M_{P1}\ 1.78M_{P2}|Air$, 其中 M_{P1} 为 10 Pa 压强时制备的 DLC 薄膜, M_{P2} 为 5 Pa 压强时制备的 DLC 薄膜。制备完成后, 未出现脱

膜, 且经耐摩擦试验后, 其表面未发现明显划痕, 如图 8(a)、(b) 所示。

4 测试结果与分析

4.1 光谱透过率测试

采用 PerkinElmer Spectrum One 红外光谱仪在 $8\sim 12\ \mu m$ 波段测试减反保护膜的单面剩余反射率以及减反膜与减反保护膜的双面透过率, 测试结果如图 9(a)、(b) 所示。

在 $8\sim 12\ \mu m$ 波段制备的减反保护薄膜的平均剩余反射率达到 3%, 制备的减反膜与减反保护膜的双面平均透过率达到 91.1%。图 9(a)、(b) 整体曲线并未出现漂移, 测试的反射率与透过率均与设计结果存在差异。采用逆向反演分析法进行分析, 这是由于 Ge、ZnS 和 YbF_3 三种材料在远红外

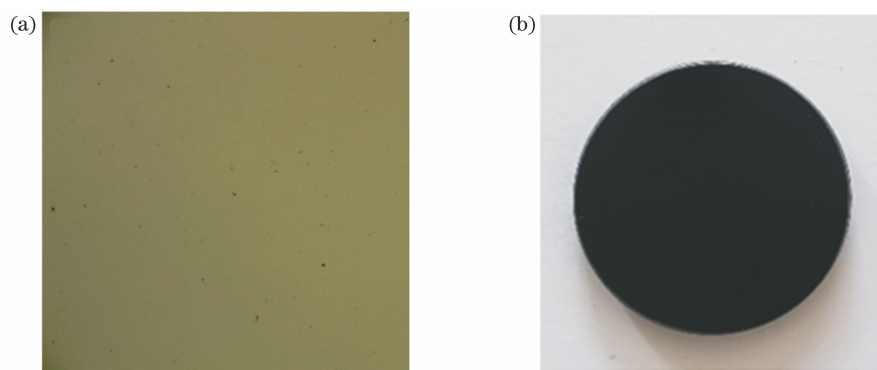


图 8 耐摩擦试验后的 DLC 薄膜。(a)显微放大图;(b)样片

Fig. 8 DLC film after severe abrasion test. (a) Enlarged view; (b) sample

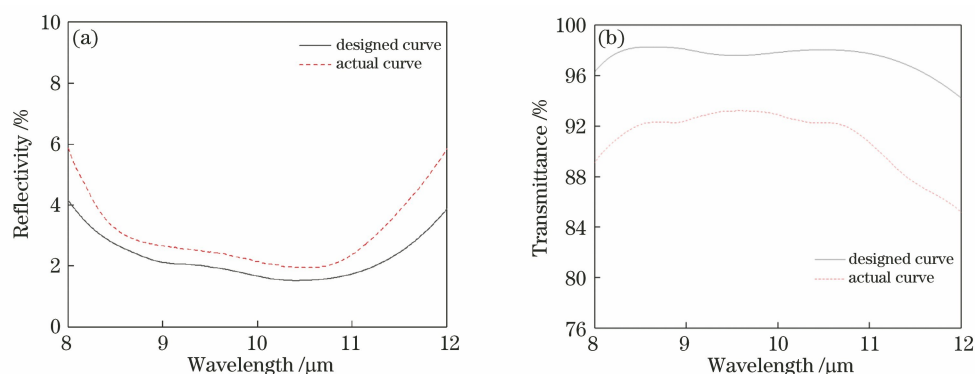


图 9 设计结果与实际测试结果的对比。(a)减反保护膜的单面反射率;(b)减反膜与减反保护膜的双面透过率

Fig. 9 Comparison between designed and actual test results. (a) One side reflectivity of anti-reflection protective film;

(b) double side transmittance of anti-reflection film and anti-reflection protective film

波段均存在微弱的吸收, YbF_3 材料在 $11.5 \mu\text{m}$ 之后的吸收率会逐渐增加,同时基片本身也存在一定的弱吸收,因此实际测试的透过率结果小于设计结果。保护膜面主要的吸收是类金刚石薄膜中的单键振动和变形振动引起的。最终制备的薄膜均满足测试要求。

4.2 环境测试

针对薄膜的耐环境性能,以国军标 GJB2485-1995 作为测试标准,对薄膜进行了一系列的测试。

膜层牢固度测试:采用宽度为 2 mm、黏着力为 $(10 \pm 1) \text{ N}/25 \text{ mm}$ 的 3M scotch 610 胶带粘贴在样品表面,垂直 90° 迅速拉起,结果显示无膜层脱落。

盐雾测试:采用 HY-60 盐雾试验箱,在温度为 $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、体积百分数为 4.9%~5.1%、pH 值为 6.5~7.2 的氯化钠溶液中连续喷雾 24 h,在灯光下进行检验,结果显示,膜层无起皮、脱膜、裂纹和气泡等缺陷。

高低温测试:将镀膜片放入高低温试验箱中,在 -60°C 和 70°C 下各保持 2 h,取出后放到室温下,

目视检测结果显示,膜层无起皮、裂纹和气泡,经胶带粘拉后未发现膜层脱落。

耐摩擦测试:用橡皮摩擦头以 9.8 N 的力在膜层表面摩擦 40 次,利用显微镜放大观察,膜层表面均未出现擦痕等损伤。

对经环境测试后的基片进行光谱检测,发现其测试曲线基本与图 8 相同,表明所制备的薄膜具有很好的机械性能和环境适应性。

5 结 论

针对无热化成像系统的窗口片要求,以硫系玻璃($\text{As}_{10}\text{Se}_{60}$)为基底,采用介质膜与硬质 DLC 薄膜相结合的方法进行制备,优化了沉积温度,解决了介质膜的破损问题。将外层 DLC 薄膜拆分成低应力粘结层与高应力耐摩擦层,提高了薄膜的耐摩擦性能,并保证了膜层的牢固度。最终制备的减反保护薄膜的剩余反射率为 3%,并通过了 GJB2485-1995 的盐雾、高低温、重摩擦和牢固度测试。该技术提高了窗口片的透过率及耐环境性能,可广泛应用于多种无热化光学系统中。

参 考 文 献

- [1] Zhang X H, Guimond Y, Bellec Y. Production of complex chalcogenide glass optics by molding for thermal imaging [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2003, 326/327: 519-523.
- [2] Fei H M. Deposition of infrared antireflection hard film on chalcogenide glass [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2017: 51-52.
费海明. 硫系玻璃基底高强减反膜制备工艺技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2017: 51-52.
- [3] Jin Y L, Fu K H, Zhao H, et al. Design and manufacture infrared antireflection coating on $As_{40}Se_{60}$ chalcogenide glass [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(S1): 94-97, 121. 金扬利, 伏开虎, 赵华, 等. $As_{40}Se_{60}$ 硫系玻璃基底减反膜的研制[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(S1): 94-97, 121.
- [4] Luo S J, Huang F Y, Zhan D J, et al. Development of chalcogenide glasses for infrared thermal imaging system [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(1): 9-13. 骆守俊, 黄富元, 詹道教, 等. 硫系玻璃在红外成像系统应用进展[J]. *激光与红外*, 2010, 40(1): 9-13.
- [5] Zhao H, Jin Y L, Zu C K, et al. Study progress on chalcogenide glasses surface coating technology for temperature adaptive infrared thermal imaging system [J]. *Materials Reports*, 2017, 31(S2): 72-76. 赵华, 金扬利, 祖成奎, 等. 温度自适应红外热成像系统用硫系玻璃表面镀膜的研究进展[J]. *材料导报*, 2017, 31(S2): 72-76.
- [6] Fu X H, Jiang H Y, Zhang J, et al. Preparation of short and medium wave infrared anti-reflective coating based on chalcogenide glass [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0903002. 付秀华, 姜洪妍, 张静, 等. 基于硫系玻璃的短中波红外减反膜研制[J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0903002.
- [7] Willey R R. Predicting achievable design performance of broadband antireflection coatings [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(28): 5447-5451.
- [8] Zhang Y H. Research on preparation of low absorption infrared coatings and its environmental stability and reliability [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019: 96-99. 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]. 北京: 中国科学院大学, 2019: 96-99.
- [9] Townsend P H, Barnett D M, Brunner T A. Elastic relationships in layered composite media with approximation for the case of thin films on a thick substrate [J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 62(11): 4438-4444.
- [10] Chen X J, Zhou Y W, Xu Z, et al. Effect of substrate on microstructure and properties of diamond-like carbon films [J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2019, 39(7): 706-710. 陈雪娇, 周艳文, 徐振, 等. 基底对类金刚石薄膜组织性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2019, 39(7): 706-710.
- [11] Su Y Y, Zhao L N, Wang J B, et al. Effects of gas pressure on microstructure and properties of diamond-like carbon films [J]. *China Surface Engineering*, 2013, 26(5): 31-36. 苏永要, 赵黎宁, 王锦标, 等. 气体压强对 DLC 薄膜微观结构及性能的影响 [J]. *中国表面工程*, 2013, 26(5): 31-36.
- [12] Li R W, Zhou Y W, Li J W, et al. Effect of deposition pressure on microstructure and mechanical properties of pulse-PECVD prepared DLC film [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2019, 44(1): 162-167. 李瑞武, 周艳文, 李建伟, 等. 工作压强对 PECVD 法制备 DLC 薄膜微观结构与力学性能的影响 [J]. *金属热处理*, 2019, 44(1): 162-167.
- [13] Wang W C, Chen P Y, Wu Y T. Investigation of non-equibiaxial thin film stress by using stoney formula [M] // Yoshida S, Lamberti L, Sciammarella C. *Advancement of optical methods in experimental mechanics. Conference proceedings of the society for experimental mechanics series*. Cham: Springer, 2016, 3: 307-319.