



دکتر اکبر اسحاقی، نویسنده
اول مقاله، دانشگاه صنعتی مالک
اشتر، دانشکده مهندسی مواد

لایه‌نشانی و بررسی خواص لایه نازک کربن شبه الماسی اعمال شده بر پنجره مادون قرمز سیلیکونی

اکبر اسحاقی*، عباسعلی آقایی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

چکیده: پنجره‌های مادون قرمز به عنوان محافظ سامانه‌های الکترواپتیک در صنایع هوایی و فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال این پنجره‌ها تحت تاثیر شرایط نامساعد محیطی قرار گرفته و در نتیجه عملکرد سامانه‌های الکترواپتیک نیز دچار اختلال می‌شود. اعمال پوشش‌های محافظ بر پنجره‌های مادون قرمز باعث افزایش عملکرد این پنجره‌ها خواهد شد. در این تحقیق لایه نازک کربن شبه الماسی با استفاده از دو گاز هیدروژن و متان به روش رسوب شیمیایی بخار تقویت شده به کمک پلاسما با منبع تغذیه فرکانس رادیویی (RF-PECVD) بر سطح پنجره‌های مادون قرمز سیلیکونی اعمال گردید. ارزیابی ساختاری پوشش با استفاده از آنالیز پراش سنجی پرتو ایکس و طیف‌سنجی رامان صورت گرفت. به منظور تعیین ضریب شکست لایه نازک کربن شبه الماسی روش بیضی‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. طیف بازتاب نمونه‌ها با استفاده از دستگاه UV-Vis-NIR recording spectrophotometer و همچنین برای اندازه‌گیری طیف عبور از روش طیف‌سنجی تبدیل فوری مادون قرمز استفاده شد. تست سایش ملایم و شدید نیز با هدف بررسی مقاومت سایشی پوشش صورت گرفت. نتایج نشان داد با اعمال لایه نازک کربن شبه الماسی میزان عبور بستره‌های سیلیکونی افزایش یافته است. همچنین نتایج تست سایش نشان داد کربن شبه الماسی با ضخامت ۵۴۰ nm در برابر سایش ملایم و شدید مقاوم بوده و عبور نمونه‌ها در اثر سایش کاهش نیافته است.

کلمات کلیدی: پنجره مادون قرمز، خواص اپتیکی، کربن شبه الماسی، لایه نازک.

۱- مقدمه

فناوری مادون قرمز یکی از فناوری‌های جدید و پرکاربرد در زمینه‌های گوناگون صنعتی، نظامی و پزشکی است. از جمله مهمترین کاربردهای پنجره‌های مادون قرمز می‌توان به دام محافظ ردیاب موشک‌های جنگی، محافظ سیستم تصویربرداری و انتقال سیگنال مادون قرمز در موشک‌های مافوق صوت، سیستم‌های نظارت، سامانه‌های شناسایی هوایی، سیستم رادارهای لیزری، دوربین‌های مادون قرمز پزشکی و نیز کاربردهای آزمایشگاهی اشاره کرد [۱-۵]. پنجره‌های مادون قرمز به سه دسته تک کریستال، پلی کریستال و شیشه تقسیم می‌شوند. سیلیکون به دو شکل تک کریستال و پلی کریستال به عنوان پنجره مادون قرمز استفاده می‌شود [۱]. در این تحقیق از قرص سیلیکونی پلی کریستال به عنوان زیرلایه استفاده شد.

شفافیت بالای یک پنجره مادون قرمز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سیلیکون به عنوان پنجره مادون قرمز در محدوده طول موجی ۳-۵ میکرون کاربرد بیشتری دارد اما ضریب شکست سیلیکون به اندازه‌ای بالا است که اتلاف بازتابشی قابل توجهی را ایجاد می‌کند، به طوری که میزان عبور یک زیرلایه سیلیکونی جلا داده شده در محدوده ۳-۵ میکرون حدود ۵۵٪ می‌باشد [۶]. از این رو، این ماده به تنهایی نمی‌تواند نیازهای کاربردهای عملی را برآورده سازد و ضرورت اعمال یک پوشش ضدبازتاب مشخص می‌شود.

یکی از چالش‌های دیگر در استفاده از پنجره‌های مادون قرمز، حفاظت آن‌ها از آسیب به وسیله برخورد با ذرات است. زیرا این عنصر خارجی‌ترین بخش سامانه بوده و همواره در معرض عوامل بسیاری مانند: فشار اتمسفر، تنش پرتاب، شوک حرارتی ناشی از برخورد قطرات سرد، فرسایش، برخورد ذرات جامد و غیره می‌باشد. بنابراین، انتخاب یک ماده مناسب به منظور افزایش مقاومت

سایشی سیلیکون نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کربن شبه الماسی، پوشش‌های ژرمانیم-کربن، پوشش‌های پایه فسفر و الماس از جمله پوشش‌هایی است که به عنوان پوشش مقاوم به سایش در پنجره‌های مادون قرمز کاربرد دارد [۷۱]. در نتیجه به منظور بهبود عبوردهی به واسطه کاهش بازتاب و حفاظت در برابر فرسایش باران و ماسه، نیاز به پوشش‌های ضدبازتاب و محافظ احساس می‌شود. کربن شبه الماسی دارای ضریب شکست متغیر در محدوده ۱/۷ تا ۲/۲ است، لذا می‌تواند به عنوان پوشش ضدبازتاب استفاده شود. همچنین از آن جایی که این پوشش دارای سختی متغیر (محدوده کمتر از ۱۰۰۰ تا 2000 kg/mm^2) می‌باشد، برای محافظت در مقابل سایش ذرات جامد، بسیار عالی است. این ماده، چسبندگی بسیار خوبی به ژرمانیم و سیلیکون دارد [۸۱]. در این تحقیق ابتدا پارامترهای بهینه برای لایه‌نشانی کربن شبه الماسی با ضریب شکست مناسب به روش رسوب شیمیایی بخار تقویت شده به کمک پلازما تعیین شد. سپس ضخامت بهینه برای داشتن بیشینه عبور محاسبه گردید و در ادامه لایه نازک کربن شبه الماسی به عنوان یک پوشش ضدبازتاب و مقاوم به سایش بر یک طرف و دو طرف پنجره‌های مادون قرمز سیلیکونی اعمال گردید. در نهایت مقاومت سایشی پوشش بررسی شد.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد

برای ساخت لایه نازک کربن شبه الماسی از دو گاز هیدروژن و متان با خلوص به ترتیب ۹۹/۹۹۵٪ و ۹۹/۹۹۹٪ استفاده شد. همچنین از قرص سیلیکونی خام (بدون هیچ گونه پوششی) با قطر ۲۵ میلی‌متر به عنوان زیرلایه استفاده گردید.

۲-۲- لایه‌نشانی

در این پژوهش ابتدا نمونه‌ها با آب و صابون و الکل به دقت شستشو شدند. در مرحله بعدی فرآیند پلازما اسپینگ هیدروژن به عنوان فرآیندی تکمیلی جهت رفع آلودگی‌های ناخواسته احتمالی و فعال‌سازی سطح به منظور افزایش چسبندگی پوشش به سطح زیرلایه انجام گرفت [۹]. پارامترهای فرآیند پلازما اسپینگ در جدول ۱ آورده شده است. پس از این فرآیند، فرآیند لایه نشانی به روش رسوب شیمیایی بخار تقویت شده به کمک پلازما صورت گرفت. پارامترهای این فرآیند در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای فرآیند پلازما اسپینگ هیدروژن

مقدار	پارامتر (واحد)
10^{-5}	فشار اولیه (torr)
100 ± 2	توان فرکانس (W)
۴۶/۵	دبی گاز هیدروژن (sccm)
۱	فشار کاری (torr)
۲۰	زمان اسپینگ (min)
دمای محیط	دمای فرآیند (oC)
۱/۵	فاصله آند و کاتد (cm)

جدول ۲- شرایط فرآیند لایه نشانی لایه نازک کربن شبه الماسی

مقدار	پارامتر (واحد)
100 ± 2	توان فرکانس (W)
۹/۶ به ۳۸/۴	دبی گاز هیدروژن به متان (sccm)
۱	فشار کاری (torr)
دمای محیط	دمای فرآیند (°C)
۱/۵	فاصله آند و کاتد (cm)

۲-۳- روش‌های مشخصه‌یابی

تشکیل لایه نازک کربن شبه الماسی و حالت کربن در ساختار با استفاده از آنالیز طیف‌سنجی رامان ارزیابی شد. در این تحقیق از دستگاه طیف‌سنج رامان مدل Senterra ساخت شرکت آلمانی Burker استفاده و طیف‌سنجی در محدوده طول‌موجی ۲۲۰۰-۷۰۰ nm انجام شد.

ساختار لایه نازک کربن شبه الماسی با استفاده از دستگاه پراش سنج پرتو ایکس مدل D8 Advance از شرکت Burker ساخت کشور آلمان مورد بررسی قرار گرفت. در پراش‌سنجی پرتو ایکس از تابش $K\alpha$ مس استفاده شد و طیف‌سنجی در بازه $2\theta=5-80$ صورت گرفت.

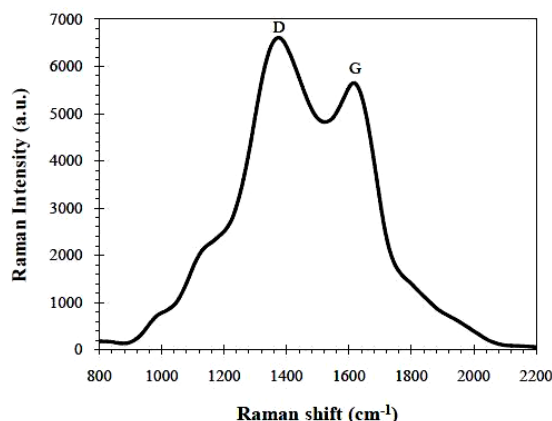
برای تعیین منحنی ضریب شکست لایه نازک کربن شبه الماسی از دستگاه بیضی‌سنج مدل Horiba در محدوده طول‌موج nm ۱۰۰۰-۳۷۰ استفاده شد. طیف بازتاب توسط دستگاه UV-VIS-NIR Recording Spectrophotometer بدست آمد. لازم به ذکر است دقت کالیبره دستگاه استفاده شده در حدود ۰/۵٪ عبوردهی و خطای دستگاه در حد صدم درصد عبوردهی می‌باشد. همچنین به منظور بررسی میزان شفافیت نمونه‌های سیلیکونی از دستگاه FTIR استفاده گردید. این طیف‌سنجی در محدوده طول موجی $2-15 \mu m$ انجام گرفت. مقاومت سایشی پوشش توسط تست سایش ملایم و شدید بررسی شد.

برای انجام تست سایش ملایم پارچه کتانی و نمونه پوشش داده شده لازم می‌باشد. بعد از انجام این تست، نباید هیچ نشانه واضحی از بدتر شدن کیفیت لایه نظیر وجود رگه یا خراش در قطعه مشاهده گردد. روش تست به این صورت است که در زمان ۱ ساعت پس از تست رطوبت، نمونه لایه‌نشانی شده، تحت سایش ملایم قرار می‌گیرد. این کار با سایش سطح لایه‌نشانی شده به کمک یک پارچه کتانی درشت بافت (که استاندارد MIL CCC-C-440 را پاس می‌نماید) با ضخامت ۶/۴ میلی‌متر که دارای پهنای ۹/۵ میلی‌متر می‌باشد، صورت می‌گیرد. این پارچه بر روی تستر ثابت شده و سطح آن را به طور کامل می‌پوشاند. تستر باید عرض سطح قطعه را از یک نقطه تا نقطه دیگر در یک مسیر، برای ۲۵ دور کامل (۵۰ بار رفت و برگشت) با نیروی حداقل ۱ پوند که به طور متوالی اعمال می‌گردد طی نماید. طول مسیر باید حداقل ۲ برابر پهنای پارچه بوده و جهت اعمال نیرو باید همواره بر سطح قطعه عمود می‌باشد. سپس قطعه بر اساس روش تمیزکاری سطوح لایه‌نشانی شده تمیز و خشک گردیده و آسیب‌های احتمالی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

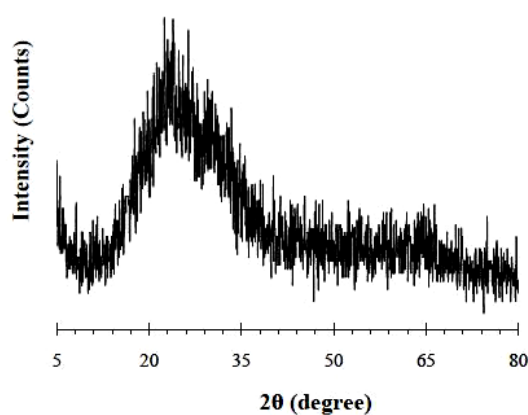
برای انجام تست سایش شدید پاک‌کن استاندارد و نمونه پوشش داده شده لازم می‌باشد. بعد از تست سایش شدید نباید هیچ‌گونه آسیب واضحی نظیر کنده شدن لایه و یا خراش در قطعه مشاهده گردد. در این تست لازم است که مقاومت به سایش نمونه لایه‌نشانی شده، به کمک مداد پاک‌کن مورد تأیید استاندارد MIL-E-12397 که بر روی یک تستر قرار گرفته مورد بررسی قرار گیرد. مداد پاک‌کن باید عرض سطح قطعه را از یک نقطه تا نقطه دیگر در یک مسیر، برای ۱۰ دور کامل با نیروی برابر ۲ تا ۲/۵ پوند که به طور متوالی به آن اعمال می‌گردد طی نماید. طول مسیر باید تقریباً سه برابر قطر مداد پاک‌کن بوده و جهت اعمال نیرو باید همواره بر سطح قطعه عمود می‌باشد. سپس قطعه بر اساس روش تمیزکاری سطوح لایه‌نشانی شده تمیز خشک گردیده و سپس آسیب‌های احتمالی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳- نتایج و بحث

نتیجه آنالیز طیف‌سنجی رامان در شکل ۱ نشان داده شده است. تشکیل پیک D (ناشی از پیوندهای گرافیتی نامنظم) و نیز پیک G (ناشی از پیوندهای گرافیتی تک کریستال) به ترتیب در عددهای موجی 1340 cm^{-1} و 1550 cm^{-1} تشکیل لایه نازک کربن شبه‌الماسی را اثبات می‌کند [۱۱ و ۱۰]. میزان نسبی شدت I_D/I_G و نیز موقعیت پیک G، نسبت SP^3/SP^2 را در پوشش مشخص می‌کند. با افزایش نسبت I_D/I_G میزان SP^2 در پوشش افزایش می‌یابد [۱۲ و ۱۳]. طیف پراش‌سنجی پرتو ایکس لایه نازک کربن شبه الماسی در شکل ۲ نشان داده شده است. عدم وجود پیک تیز در طیف مشخص می‌کند که پوشش دارای ساختاری آمورف است [۱۴ و ۱۰].



شکل ۱- طیف پراش سنجی پرتو ایکس لایه نازک کربن شبه الماسی



شکل ۲- طیف پراش سنجی پرتو ایکس لایه نازک کربن شبه الماسی

پارامترهای فرایند لایه‌نشانی به گونه‌ای انتخاب گردیده است که ضریب شکست پوشش، به مقدار بهینه نزدیک باشد. برای این منظور از رابطه ۱ استفاده می‌شود [۱۵ و ۱۶].

$$n_{AR} = \sqrt{n_o n_{si}} \quad (1)$$

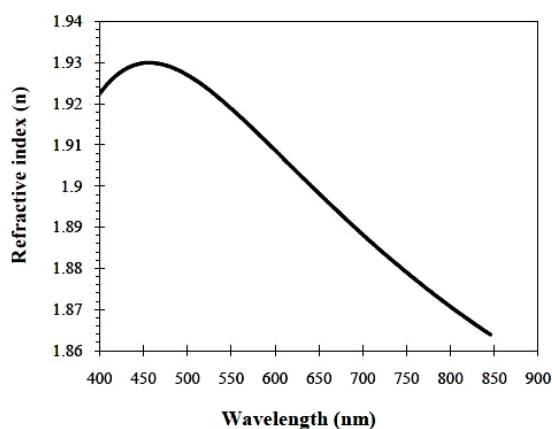
در این رابطه n_{AR} ضریب شکست پوشش ضد بازتاب، n_o ضریب شکست هوا، n_{si} ضریب شکست زیر لایه سیلیکونی در طول موج ۴۰۰۰ nm است که با جایگذاری مقادیر ۱ برای ضریب شکست هوا و ۳/۴۲۵ برای ضریب شکست سیلیکون، ضریب شکست بهینه پوشش از نظر تئوری در طول موج ۴۰۰۰ nm برابر ۱/۸۵ بدست می‌آید [۱۷]. از طرفی چون ضریب شکست لایه نازک کربن شبه الماسی تنظیم‌پذیر است، می‌توان در ضمن فرایند لایه‌نشانی با تغییر پارامترهای لایه‌نشانی ضریب شکست پوشش را تا حد قابل قبولی به مقدار ۱/۸۵ نزدیک کرد [۱۰]. شکل ۳ منحنی ضریب شکست لایه نازک کربن شبه الماسی را نسبت به طول موج نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، لایه نازک کربن شبه الماسی اعمال شده بر سطح نمونه‌های سیلیکونی دارای ضریب شکست برابر ۲/۰۲ در طول موج ۵۵۰ nm است. بررسی منحنی شکل ۱ نشان می‌دهد ضریب شکست این لایه در طول موج ۱۰۰۰ nm برابر ۱/۹۵ شده است. بنابراین از شیب نمودار ضریب شکست بر حسب طول موج و با استفاده از روش برون‌یابی می‌توان نتیجه گرفت که ضریب شکست پوشش در طول موج ۴۰۰۰ nm با مقدار تئوری (بدست آمده از رابطه ۱) مطابقت خوبی دارد.

پس از تعیین ضریب شکست بهینه، ضخامت بهینه اپتیکی جهت برخورداری کربن شبه الماسی از خواص ضد بازتابی با استفاده از رابطه (۲) بدست می‌آید [۱۵ و ۱۶]:

$$d_{AR} = \frac{n \lambda_o}{4 n_{AR}} \quad (2)$$

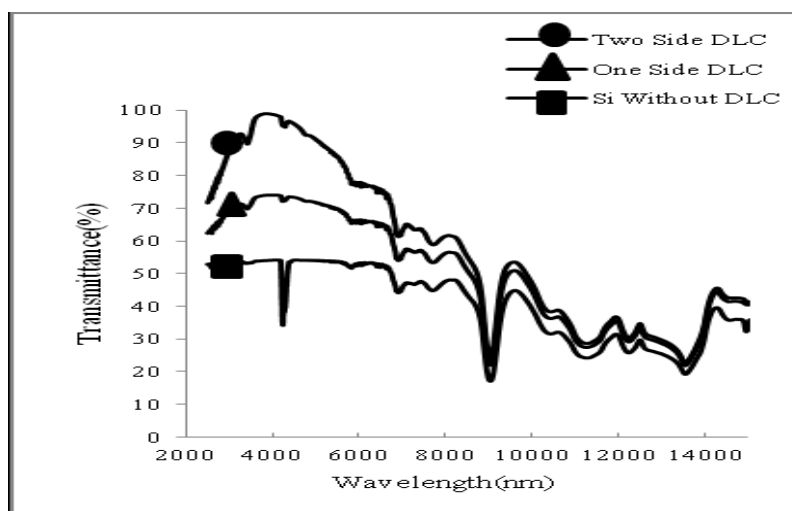
در این رابطه d_{AR} ضخامت بهینه اپتیکی (nm)، λ_0 طول موج (nm) و n_{AR} ضریب شکست بدست آمده از شکل ۱ است. با جای گذاری مقادیر در رابطه (۲) ضخامت بهینه بدست می آید:

$$d_{AR} = \frac{4000}{4 \times 1.85} = 540.54 \text{ nm}$$



شکل ۳- منحنی ضریب شکست لایه نازک کربن شبه الماسی

بنابراین ضخامت بهینه لایه نازک کربن شبه الماسی برای داشتن کمترین بازتاب برابر ۵۴۰ نانومتر است که در ادامه این ضخامت در دو حالت یک طرف و دو طرف سطح نمونه های سیلیکونی اعمال شد. به منظور بررسی شفافیت نمونه های سیلیکونی پس از اعمال لایه نازک کربن شبه الماسی، طیف عبور در سه حالت نمونه بدون پوشش، یک طرف پوشش دار و دو طرف پوشش دار تهیه گردید. این طیف سنجی در محدوده ۱۵-۲ میکرون صورت گرفته که در شکل ۴ نشان داده شده است.



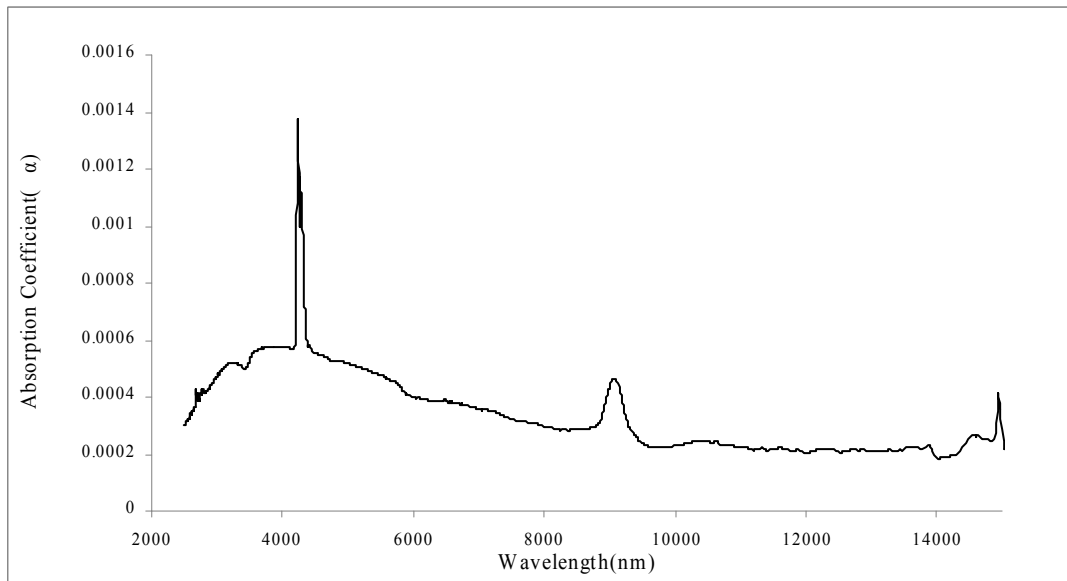
شکل ۴- طیف عبور پنجره مادون قرمز سیلیکونی دو طرف پوشش دار، یک طرف پوشش دار و بدون پوشش

همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود با اعمال لایه نازک ضد بازتاب کربن شبه الماسی شفافیت در محدوده مادون قرمز افزایش می یابد که این میزان افزایش برای حالت دو طرف پوشش دار بیشتر است. بنابراین از لایه نازک کربن شبه الماسی می توان به عنوان یک پوشش اپتیکی به منظور افزایش شفافیت پنجره های مادون قرمز استفاده کرد. با استفاده از میزان عبور نمونه بدون پوشش T_0 و نمونه دارای یک طرف پوشش T طبق رابطه (۳) می توان ضریب جذب نمونه ها را به دست آورد.

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (3)$$

در رابطه (۳) ضخامت نمونه می‌باشد.

منحنی ضریب جذب برحسب طول موج در شکل ۵ آمده است. همان طور که مشاهده می‌شود پوشش دارای ضریب جذب بسیار پایین در محدوده طول موجی ۱۵-۲ میکرون می‌باشد.



شکل ۵- منحنی ضریب جذب لایه نازک کربن شبه الماسی

برای بررسی مقاومت به سایش پوشش تست سایش ملایم به این صورت انجام شد که پارچه کتان برای ۲۵ دور کامل با نیروی برابر با ۱ پوند روی سطح نمونه اعمال شد. بعد از انجام این تست، هیچ نشانه واضحی از بدتر شدن کیفیت لایه نظیر وجود رگه یا خراش در قطعه مشاهده نشد و نمونه سیلیکونی دارای پوشش کربن شبه الماسی با ضخامت ۵۴۰ nm این تست را که طبق استاندارد MIL CCC-C-440 صورت گرفت، با موفقیت گذراند.

برای بررسی مقاومت به سایش نمونه سیلیکونی طبق استاندارد MIL-E-12397، پاک‌کن برای ۱۰ دور کامل با نیروی عمودی ۲٫۵ پوند روی سطح پوشش اعمال شد. بعد از انجام تست سایش شدید هیچ‌گونه آسیب واضحی نظیر کنده‌شدن لایه و یا خراش در قطعه مشاهده نشد و نمونه سیلیکونی دارای پوشش کربن شبه الماسی با ضخامت ۵۴۰ nm این تست را نیز با موفقیت گذراند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش لایه نازک ضدبازتاب کربن شبه الماسی با استفاده از دو گاز هیدروژن و متان به روش رسوب شیمیایی بخار تقویت شده به کمک پلاسما با منبع تغذیه فرکانس رادیویی (RF-PECVD) بر سطح پنجره مادون قرمز سیلیکونی اعمال شد و نتایج زیر به دست آمد:

- ضریب شکست لایه نازک کربن شبه الماسی در این پژوهش با ضریب شکست تئوری بدست آمده از روابط فیزیکی مطابقت دارد که در نتیجه می‌تواند به عنوان یک پوشش ضدبازتاب عمل کند بنابراین ضخامت بهینه اپتیکی در طول موج ۴۰۰۰ nm نانومتر برابر ۵۴۰ nm محاسبه گردید.
- اثبات شد که با اعمال لایه نازک کربن شبه الماسی شفافیت پنجره‌های مادون قرمز سیلیکونی در محدوده طول موج مادون قرمز افزایش می‌یابد.
- همچنین نتیجه می‌شود که با اعمال لایه نازک کربن شبه الماسی بر روی پنجره‌های مادون قرمز سیلیکونی مقاومت به سایش بهبود می‌یابد.

مراجع

- [1] D. C. Harris, "Materials for infrared windows and domes", SPIE Optical Engineering Press, Washington, 1999.
- [2] Y.Liu, Y.He, Z. Yuan, J. Zhu and J. Han, "Numerical and experimental study on thermal shock damage of CVD ZnS infrared window material", *Journal of Alloys and Compounds* Vol. 589, pp. 101–108, 2014.
- [3] B. Tang, Y. Yang, Y. Fan and L. Zhang, "Barium Gallogermanate Glass Ceramics for Infrared Applications", *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 26, pp. 558-563, 2010.
- [4] M. Hopf and J. U. G. Hopf, "Near Infrared Transillumination in Acute Maxillary Sinusitis: Theoretical Background – Clinical Application Diagnostic Potential – Limitations", *Medical Laser Application* Vol. 18, pp. 217–231, 2003.
- [5] D. C. Harris, "Durable 3–5 mm transmitting infrared window materials", *Infrared Physics & Technology* Vol. 39, pp. 185–201, 1998.
- [6] A. Rogalski and K. Chrzanowski, "Infrared devices and techniques", *Opto-Electronics Review*, Vol. 10, pp. 111–136, 2002.
- [7] A.A. Deom, A. Luc, S. Amara and D.L. Balageas, "Towards more realistic erosion simulation tests for high velocity EM and IR windows", *Wear*, pp. 13–24, 1999.
- [8] مجیری، ف، لایه‌نشانی و ارزیابی اثرات لایه نازک DLC بر بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی سیلیکونی، پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد (شناسایی و انتخاب مواد)، دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اردیبهشت ماه ۱۳۹۲.
- [9] W. Seok Choi, K. Kim, J. Yi and B. Hong, "Diamond-like carbon protective anti-reflection coating for Si solar cell", *Materials Letters* 62 (2008) 577–580.
- [10] J. Robertson, "Diamond-like amorphous carbon", *Materials Science and Engineering R*, Vol. 37, pp. 129–281, 2002.
- [11] X. B. Yan, T. Xu, S. R. Yang, H. W. Liu and Q J Xue, "Characterization of hydrogenated diamond-like carbon films electrochemically deposited on a silicon substrate", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 37, pp. 2416-2424, 2004.
- [12] L. Qiang, B. Zhang, Y. Zhou and J. Zhang, "Improving the internal stress and wear resistance of DLC film by low content Ti Doping", *Solid State Sciences*, Vol. 20 pp. 17-22, 2013.
- [13] T. Kitagawa, K. Miyauchi, N. Toyoda, K. Kanda, T. Ikeda, H. Tsubakino, J. Matsuo, Sh. Matsui and I. Yamada, "Influence of residual Arp in Ar cluster ion beam for DLC film formation", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Vol. 206, pp. 884–888, 2003.
- [14] R. Chakraborty, R. Mandal and R. Das, "Studies on the influence of argon flow rate on PECVD grown diamond-like nanocomposite film", *Optik*, Vol. 124 pp. 6915–6918, 2013.
- [15] F. J. Pern, Zh. Panosyan, A. A. Gippius, J. A. Kontsevov, K. Touryan, S. Voskanyan and Y. Yengibaryan, "Diamond-like carbon coatings as encapsulants for photovoltaic solar cells", Prepared for the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference and Exhibition Lake Buena Vista, Florida January, pp. 3–7, 2005.
- [16] O. S. Heavens, "Thin film physics", Distributed in the U.S.A by Halsted press, NewYork, 1970.