



لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيلیكون با خواص ضدبازتابی و پایداری محیطی

عباسعلی آقائی^{۱*}، اکبر اسحاقی^۱، مظاهر رضائی^۱، حسین زابلیان^۲، مرضیه عباسی فیروزجاه^۳

۱. مجتمع علم مواد و مواد پیشرفته الکترومغناطیس، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان

۲. شرکت صنایع الکترواپتیک اصفهان

۳. گروه علوم مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

چکیده

واژگان کلیدی:

لایه نازک

اکسی نیتريد کربن سيلیكون

کندوپاش مغناطیسی

خواص ضدبازتابی

تنش پسماند

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۱۱

در این مطالعه، لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيلیكون به روش کندوپاش مغناطیسی رادیوفراکانسی بر زیرلایه سيلیكونی پوشش دهی شد. سپس خواص ضدبازتابی و پایداری محیطی پوشش مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمون تبدیل فوریه مادون قرمز و الیپسومتری با هدف تعیین خواص اپتیکی انجام شد. به منظور پیش بینی ضخامت بهینه و نیز طراحی میزان بازتاب لایه نازک اعمالی با ضریب شکست مشخص از نرم افزار "Essential Macleod" استفاده شد. از روش پروفیلومتری و رابطه استونی برای اندازه گیری تنش پسماند لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيلیكون استفاده شد. آزمون های حلالیت در آب و حلالیت در محلول نمک مطابق با استاندارد MIL-C-48947A، چسبندگی مطابق با استاندارد MIL-M-13508C، مه نمکی، سایش ملایم و سایش شدید مطابق با استاندارد MIL-C-675C با هدف بررسی پایداری محیطی لایه نازک مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمون تبدیل فوریه مادون قرمز نشان داد که لایه نشانی لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيلیكون با ضخامت بهینه موجب کاهش ۲۸/۱ درصدی متوسط میزان بازتاب در محدوده طول موج ۵-۳ μm خواهد شد. نتایج آزمون الیپسومتری اثبات نمود که ضخامت پوشش برابر با ۶۰۱/۴۹ nm و نیز ضریب شکست پوشش برابر با ۱/۶ در طول موج ۴ μm است. همچنین طراحی ها نشان داد که ضخامت بهینه برای دستیابی به حداقل بازتاب برابر با ۶۱۹/۷۴ nm است. تنش پسماند لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيلیكون برابر با ۱۰۹ MPa به دست آمد. همچنین لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيلیكون توانست آزمون های پایداری محیطی را با موفقیت بگذراند.

DOI: 10.22034/ISSST.2025.2050005.1648

Silicon carbon oxynitride thin film with anti-reflective properties and environmental stability

Abstract

In this study, silicon carbon oxynitride (SiCON) thin film was deposited on the silicon substrate by radio frequency magnetron sputtering method. Then the anti-reflective properties and environmental stability of the coating were evaluated. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and ellipsometry tests were performed with the aim of determining optical properties. "Essential Macleod" software was used in order to predict the optimal thickness and also to simulate the reflectivity of the applied thin film with a certain refractive index. The profilometric method and Estoni's relationship were used to measure the residual stress of the SiCON thin film. Solubility in water and solubility in salt solution tests according to MIL-C-48947A standard, adhesion according to MIL-M-13508C standard, salt spray, mild wear and severe wear according to MIL-C-675C standard was performed to checking environmental stability of the thin film. The results of the FTIR test showed that the SiCON thin film with optimal thickness will decrease the average reflectance by 28.1% in the wavelength range of 3-5 μm . The results of the ellipsometry test proved that the thickness of the thin film is equal to 601.49 nm and the refractive index of the coating is equal to 1.6 at 4 μm . Also, the designs showed that the optimal thickness to achieve minimum reflection is equal to 619.74 nm. The residual stress of the SiCON thin film was obtained as 109 MPa. Also, the SiCON thin film was able to successfully pass the environmental stability test.

Keywords: Thin film, Silicon carbon oxynitride, Magnetron sputtering, Anti-reflective properties, Residual stress

* Corresponding author E-mail: A_Aghaei@mut-es.ac.ir

۱- مقدمه

سيليسیوم به طور گسترده‌ای به عنوان پنجره و دام مادون قرمز مورد استفاده قرار می‌گیرد. پنجره‌های مادون قرمز سيلیکونی در محدوده طول موج $1/2-6/5 \mu\text{m}$ شفافیت دارند، ولی محدوده‌ی عملیاتی مؤثر و رایج آن‌ها بین $3-5 \mu\text{m}$ است، که با پنجره‌ی اتمسفری MWIR تطابق کامل دارد. این ویژگی، سيلیکون را به گزینه‌ای مناسب برای پنجره‌های حفاظتی و اپتیکی در سنسورهای حرارتی، آشکارسازهای مادون قرمز، و دوربین‌های دید در شب تبدیل می‌کند [۱ و ۲].

با پیشرفت و افزایش سرعت وسایل هوافضایی، شرایط محیطی برای پنجره‌ها و دام‌های مادون قرمز بیش از پیش سخت‌تر شده است. این امر منجر به انجام پژوهش‌هایی برای توسعه پوشش‌های ضد بازتاب و محافظ شده است که علاوه بر عبور مادون قرمز بالا و جذب پایین، در برابر گرما، سایش و شوک حرارتی مقاوم بوده و چسبندگی خوبی به زیرلایه داشته باشند. بر این اساس، مواد با پایداری و دوام بسیار بالا نظیر کربن شبه الماسی (DLC)، کربن-ژرمانیوم ($\text{Ge}_{1-x}\text{C}_x$)، فسفید بور (BP)، فسفید گالیم (GaP) و الماس توسعه یافته-اند [۱-۴]. کربن شبه الماسی پوششی است که برای کاربرد روی پنجره‌های سيليسیومی به شدت مورد توجه قرار گرفته است. هرچند کربن شبه الماسی برای محافظت در مقابل سایش ذرات جامد، بسیار عالی است اما برای فرسایش در برابر قطرات باران نامناسب می‌باشد و به دلیل تنش ذاتی بالای پوشش و محدودیت لایه‌نشانی با ضخامت بالای یک میکرون، از نظر صنعت برای دام‌های موشک غیر قابل استفاده است [۵ و ۶].

پوشش دیگری که به تازگی مورد توجه قرار گرفته است، لایه نازک SiCON است. لایه‌های نازک ترکیبات سيلیکون برای چند دهه است که مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و در صنایع مختلف نظیر میکروالکترونیک‌ها، فوتونیک و اپتیک، فوتولتائیک و زمینه‌های دیگر استفاده می‌شود [۷].

لایه نازک SiCON مخلوطی از ساختار شبکه‌ای و حلقه‌ای شامل مجموعه پیوندها می‌باشد. عمده پیوندهای موجود در لایه نازک SiCON شامل پیوندهای Si-C، Si-N، Si-O، C-N و H می‌باشد که با تغییر پارامترهای لایه‌نشانی می‌توان نوع پیوندها را تغییر داده و خواصی مطلوب را حاصل نمود [۸].

ضریب شکست ($1/45$ الی $2/85$ در طول موج 550 nm) تنظیم‌پذیر اکسی نیتريد کربن سيلیکون سبب شده است که این ماده به عنوان یک پوشش ضد بازتاب روی زیرلایه‌های سيلیکونی قابل استفاده باشد [۹ و ۱۰].

لایه‌های نازک پایه سيلیکونی مانند دی‌اکسید سيلیکون (SiO_2)، اکسی نیتريد سيلیکون، کربونیتريد سيلیکون و SiCON به روش‌های مختلفی نظیر رسوب شیمیایی بخار تقویت شده به وسیله پلاسماي رادیوفرکانسی، رسوب شیمیایی بخار تقویت شده به وسیله پلاسماي میکروویو، رسوب شیمیایی بخار فشار پایین، رسوب شیمیایی بخار به-وسیله فیلمان داغ، پوشش دهی لیزر پالسی، کندوپاش بیم یونی و کندوپاش مغناطیسی قابل پوشش دهی هستند [۹ و ۱۱].

اما به تازگی به دلیل مزایایی چون چسبندگی مناسب، دانسیته بالای پوشش، ساختار نهایی آمورف و خواص مکانیکی مطلوب روش کندوپاش مغناطیسی به منظور لایه‌نشانی لایه-های نازک پایه سيلیکونی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۱ و ۱۲]. وجود مزایای زیاد روش کندوپاش مغناطیسی برای دستیابی به خواص اپتیکی و پایداری محیطی از پوشش-های اعمالی بر پنجره‌های مادون قرمز سيلیکونی و عدم وجود تحقیقی که در آن از این روش جهت لایه‌نشانی لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيلیکون استفاده نموده باشند دلایلی برای انتخاب روش کندوپاش مغناطیسی رادیوفرکانسی است. همچنین در این تحقیق برای نخستین بار پایداری محیطی لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيلیکون نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در تحقیقات قبلی پارامترهای بهینه لایه‌نشانی اکسی نیتريد کربن سيلیکون با ارزیابی‌های ساختاری و

استفاده قرار گرفت. ابتدا یک چیدمان اپتیکی سه لایه برای نرم افزار تعريف شد که در آن زیرلایه سيلیکون و لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيلیکون به نرم افزار معرفی گردید. سپس با استفاده از مدل پراکندگی لورنتز ثوابت اپتیکی ضریب شکست و ضخامت لایه نازک تعیین شد. برای پیش‌بینی ضخامت بهینه و نیز شبیه‌سازی میزان عبور و یا بازتاب لایه نازکی با ضریب شکست مشخص از نرم افزار "Essential Macleod" استفاده شد.

طیف بازتابی لایه نازک اعمالی با استفاده از پارامترهایی چون ضریب شکست و ضخامت پوشش توسط نرم افزار ترسیم و با طیف بازتابی حاصل از طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون‌قرمز مقایسه شد. تطابق طیف برای لایه نازک اعمالی در این تحقیق صحت نتایج الیپسومتری را اثبات نمود. همچنین از این نرم افزار برای تعیین ضخامت بهینه جهت دستیابی به کمینه میزان بازتاب اپتیکی و نیز ترسیم طیف بازتاب قبل از لایه‌نشانی با داشتن پارامترهایی چون ضریب شکست و ضریب خاموشی لایه نازک اعمالی استفاده شد و به این ترتیب میزان کمینه بازتاب قبل از لایه‌نشانی تعیین شد. از روش پروفیلومتری و رابطه استونی برای اندازه‌گیری تنش پسماند لایه نازک بهینه استفاده شد. برای این منظور انحنای زیرلایه شیشه بروسیلیکاتی قبل و بعد از لایه‌نشانی اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری انحنای سطح زیرلایه توسط پروفیلومتر انجام شد. به منظور ارزیابی پایداری محیطی لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيلیکون، آزمون‌های حلالیت در آب و حلالیت در محلول نمک مطابق با استاندارد MIL-C-48947A و آزمون مه نمکی مطابق با استاندارد MIL-C-675C هر کدام به مدت ۲۴ ساعت روی نمونه صورت گرفت. آزمون‌های چسبندگی مطابق با استاندارد MIL-M-13508C، سایش ملایم و سایش شدید مطابق با استاندارد MIL-C-675C طبق شرایط استاندارد روی نمونه انجام شد.

مورفولوژیکی و بررسی خواص اپتیکی بدست آمد [۱۳-۱۵]. در این پژوهش ضخامت اپتیکی لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيلیکون بهینه با استفاده از نرم‌افزار مکلود اندازه‌گیری و لایه‌نشانی با ضخامت اپتیکی روی زیرلایه سيلیکونی انجام شد. سپس میزان عبور و بازتاب لایه نازک SiCON بهینه با ضخامت اپتیکی اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری تنش پسماند و پایداری محیطی پوشش بهینه نیز صورت گرفت.

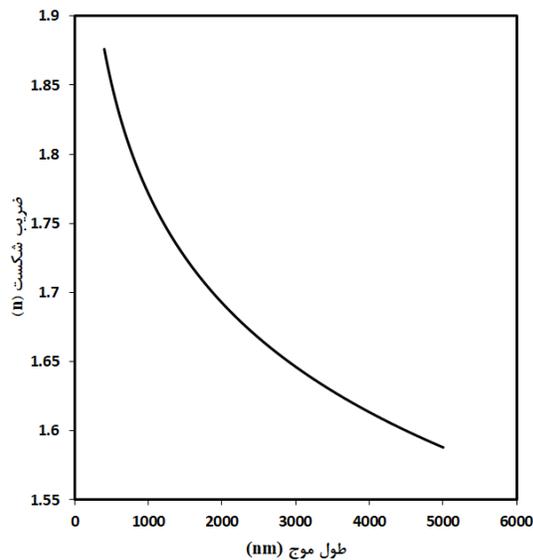
۲- مواد و روش تحقیق

لایه‌نشانی لایه نازک SiCON با استفاده از دستگاه کندوپاش مغناطیسی (ساخت شرکت Angstrom Engineering، مدل Pure Lab HE GP-1) صورت گرفت. در این فرایند گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹۹٪ به عنوان گاز مورد استفاده جهت کندوپاش تارگت به کار رفت. از تارگت SiO_2 با خلوص ۹۹٪/۹۹۹ جهت تامین سيلیکون و اکسیژن استفاده شد. همچنین گاز متان و نیتروژن هر دو با خلوص ۹۹/۹۹۹٪ به ترتیب جهت تامین کربن و نیتروژن پوشش مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق از زیرلایه قرص سيلیکون تک کریستال (یک طرف پولیش شده و دو طرف پولیش شده) دارای قطر ۲/۵ cm و ضخامت ۳ mm استفاده شد. پوشش‌دهی با توان ۶۰۰W وات در فشار کاری ۴ mtorr و دمای زیرلایه 70°C انجام شد. شار متان و نیتروژن به ترتیب ۲۰ sccm و ۱۰ sccm در نظر گرفته شد.

به منظور تهیه طیف بازتاب لایه نازک در ناحیه طول‌موجی ۳-۵ μm از دستگاه طیف‌سنج تبدیل فوریه مادون‌قرمز مدل Shimadzu-8400S استفاده شد و طیف بازتاب و عبور لایه نازک اعمالی در محدوده عدد موج $4000-400\text{ cm}^{-1}$ تهیه شد. از بیضی‌سنج مدل SE 800 ساخت شرکت Sentech برای اندازه‌گیری ضریب شکست و ضخامت لایه‌های نازک اکسی نیتريد کربن سيلیکون استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها در محدوده طول‌موج ۴۰۰-۴۰۰۰ nm و در زاویه تابش $69/93^\circ$ درجه انجام شد. نرم‌افزار Spectraray برای تطبیق نتایج، مورد

جدول ۱. نتایج حاصل از آزمون‌های FTIR و الیپسومتري و نیز طراحی با نرم افزار مکلود روی لایه نازک اعمالی

بازتاب در طول موج $4 \mu\text{m}$ (%)	متوسط بازتاب در محدوده طول موج $3-5 \mu\text{m}$ (%)	ضخامت واقعی بر اساس الیپسومتري (nm)	ضخامت اپتیکی بر اساس طراحی با نرم افزار (nm)	ضریب شکست در طول موج $4 \mu\text{m}$
۲/۳	۳/۲	۶۰۱/۴۹	۶۱۹/۷۴	۱/۶



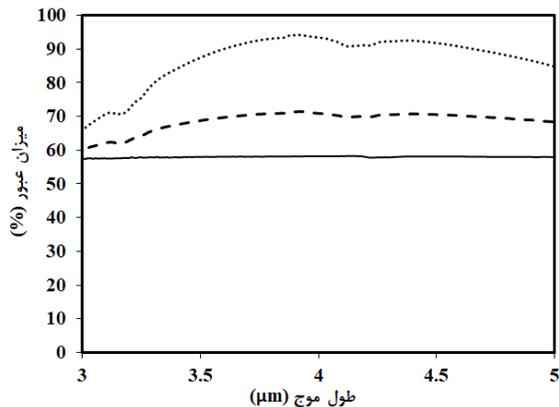
شکل ۱. نمودار تغییرات ضریب شکست لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيلیکون بر حسب طول موج.

با استفاده از نرم افزار مکلود طیف بازتاب برای لایه نازک اکسی نیتريد سيلیکون با ضخامت بهینه طراحی شد. در شکل ۲، میزان بازتاب اندازه گیری شده از لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيلیکون، میزان بازتاب طراحی شده وقتی که یک طرف زیرلایه توسط لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيلیکون با ضخامتی برابر با ضخامت اندازه گیری شده و ضریب شکستی برابر با ضریب شکست اندازه گیری شده لایه نشانی شود، نمایش داده شده است. در این شکل همچنین میزان بازتاب طراحی شده در حالتی که یک طرف زیرلایه توسط لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيلیکون با ضخامت بهینه و ضریب شکستی برابر با ضریب شکست اندازه گیری شده

به منظور بررسی فصل مشترک لایه نازک با زیرلایه تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی از سطح مقطع پوشش گرفته شد. از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی، ساخت شرکت آمریکایی FEI مدل Quanta FEG 450 استفاده شد. به منظور رسانا شدن لایه های نازک و جلوگیری از تمرکز الکترونی روی سطح، یک لایه نازک نانومتری از جنس طلا توسط دستگاه کندوپاش روی لایه های نازک لایه نشانی شد.

۳- نتایج و بحث

در تحقیق قبلی گروه محققین تشکیل لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيلیکون با انجام آزمون های پراش سنجی پرتو ایکس، رامان و طیف سنجی فوتوالکترونی پرتو ایکس اثبات شد [۱۳]. در این تحقیق پس از لایه نشانی، میزان بازتاب از یک سطح لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيلیکون اعمالی روی سيلیکون یک طرف پولیش تک کریستال به روش آزمون طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز اندازه گیری شد. همچنین ضریب شکست و ضخامت واقعی پوشش ها از طریق آزمون الیپسومتري به دست آمد. خلاصه ای از نتایج حاصل در جدول ۱ آمده است. بر طبق نتایج پوشش دهی لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيلیکون میزان بازتاب را به طور چشمگیری کاهش داده است. با اعمال لایه نازک میزان متوسط بازتاب در محدوده طول موج $3-5 \mu\text{m}$ از مقدار $31/1$ به $3/2$ ٪ کاهش یافته است. در شکل ۱ نمودار تغییرات ضریب شکست لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيلیکون بر حسب طول موج رسم شده است. همان طور که در جدول ۱ بیان شد، میزان ضریب شکست لایه نازک اعمالی در طول موج $4 \mu\text{m}$ برابر با $1/6$ محاسبه شد.



شکل ۳. طیف عبور (خط پر) سیلیکون؛ (خط چین) سیلیکون دارای پوشش بهینه با ضخامت اپتیکی در یک طرف؛ (نقطه چین) سیلیکون دارای پوشش بهینه با ضخامت اپتیکی در دو طرف.

تنش پسماند لایه نازک توسط رابطه استونی محاسبه شد [۹-۱۱].

$$\sigma = \frac{E_s \cdot t_s^2}{6(1-\nu_s) \cdot t_c} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) \quad (1)$$

که σ تنش پسماند لایه نازک، E_s مدول یانگ زیرلایه، t_s ضخامت زیرلایه، t_c ضخامت لایه نازک، ν_s ضریب پواسون زیرلایه، R شعاع انحنای مجموعه لایه نازک-زیرلایه و R_0 شعاع انحنای زیرلایه بدون لایه نازک است. از این رابطه می‌توان استنباط کرد که تنش کششی مثبت است و تنش فشاری منفی است.

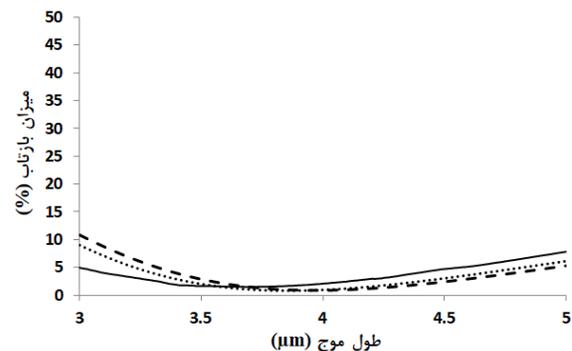
شعاع انحنای مجموعه لایه نازک-زیرلایه نیز از رابطه ۲ قابل محاسبه است [۹ و ۱۱].

$$R = \frac{l^2}{2x} \quad (2)$$

در این رابطه l نصف طول زیرلایه پوشش‌دهی شده بر حسب m و همچنین x ارتفاع برآمدگی زیرلایه خمیده شده در مرکز نمونه بر حسب m هستند.

در شکل ۴ تصویر شیشه بروسیلیکاتی لایه‌نشانی شده با لایه نازک بهینه به منظور انجام آزمون پروفیلومتری نشان داده شده است. همچنین شکل ۵ طرح‌واره‌ای از مقطع زیرلایه بدون پوشش و زیرلایه لایه‌نشانی شده تحت تأثیر تنش فشاری را نشان می‌دهد [۹].

لایه‌نشانی شود، آورده شده است. بررسی طیف بازتاب طراحی شده برای پوشش دارای ضخامت بهینه نشان می‌دهد که میزان بازتاب تا ۱/۹٪ در طول موج ۴ μm و به طور متوسط تا ۳/۰٪ در محدوده طول‌موج ۳-۵ μm قابل کاهش است.



شکل ۲. طیف بازتاب لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيليكون روی زیرلایه سیلیکون یک طرف پولیش (خط پر) اندازه‌گیری شده با دستگاه طیف‌سنج FTIR؛ (نقطه چین) طراحی شده وقتی که لایه نازکی با ضخامتی برابر با ضخامت اندازه‌گیری شده و ضریب شکستی برابر با ضریب شکست اندازه‌گیری شده دارد؛ (خط چین) طراحی شده در حالتی که لایه نازکی با ضخامت بهینه و ضریب شکستی برابر با ضریب شکست اندازه‌گیری شده دارد.

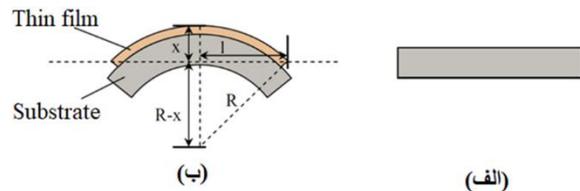
بنابراین پوشش با ضخامت بهینه روی قرص سیلیکونی تک‌کریستال دو طرف پولیش لایه‌نشانی شد. طیف عبور بعد از اعمال پوشش بهینه در یک طرف و نیز در دو طرف نمونه، اندازه‌گیری شد که در شکل ۳ آمده است. مشخص است که اعمال پوشش در دو طرف سیلیکون، میزان عبور را از ۵۷٪ تا ۹۴٪ افزایش داده است. افزایش میزان عبور از ۵۷٪ به ۹۴٪ در طول موج ۴ μm ، معادل یک بهبود حدود ۶۵٪ در بهره‌وری اپتیکی سامانه است که در سیستم‌های اپتیکی MWIR (مثلاً حسگرهای حرارتی یا ردیاب‌های موشکی) اهمیت حیاتی دارد.

ضخامت‌های ۴۰۰ nm و ۶۰۰ nm به ترتیب برابر با ۱ GPa و ۳ GPa گزارش کردند. این تنش ذاتی بالا در پوشش کربن شبه‌الماسی از عوامل چسبندگی ضعیف پوشش و نیاز به جایگزینی پوشش‌های جدیدی چون SiCON را مشخص می‌کند. مقدار تنش فشاری ۱۰۹ MPa در مقایسه با پوشش‌های DLC که تنش‌هایی تا چند گیگاپاسکال دارند، بسیار پایین‌تر بوده و این خود نشانه‌ای از پایداری مکانیکی بلندمدت لایه است [۱۷]. تنش پسماند به عوامل مختلفی بستگی دارد. از جمله این عوامل می‌توان به شرایط فرایند لایه‌نشانی، جنس لایه و زیرلایه و سایر فرایندهایی که بعد از لایه‌نشانی روی زیرلایه اتفاق می‌افتد، اشاره کرد. مزیت لایه-نشانی SiCON به روش کندوپاش مغناطیسی این است که در دمای پایین انجام می‌شود. لذا تنش حرارتی در پوشش ایجاد نخواهد شد [۱۸].

آزمون‌های حلالیت در آب، حلالیت در محلول نمک، مه نمکی، چسبندگی، سایش ملایم، آزمون سایش شدید مطابق با استانداردهای معرفی شده در بخش مشخصه‌یابی به صورت متوالی روی لایه نازک بهینه انجام شد. پس از هر تست بازرسی چشمی نمونه صورت گرفت و سالم بودن لایه نازک مطابق با استاندارد مربوطه تایید شد. برای اطمینان بیشتر از سالم بودن لایه نازک و عملکرد صحیح آن به عنوان پوشش ضدبازتاب، میزان عبور نمونه، قبل و بعد از انجام سایر آزمون‌ها، اندازه‌گیری شد. در شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب تصویر نمونه سيليكون دارای لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيليكون با ضخامت بهینه قبل و بعد از سایر آزمون‌های محیطی آمده است. مطابق با شکل‌های ۶ و ۷ هیچ‌گونه تغییری در ظاهر نمونه بعد از آزمون‌های محیطی مشاهده نمی‌شود. در شکل ۸ میزان عبور از سيليكون لایه‌نشانی شده توسط لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيليكون بهینه قبل و بعد از آزمون‌های پایداری محیطی در ناحیه طول‌موجی ۳ الی ۵ μm نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود،

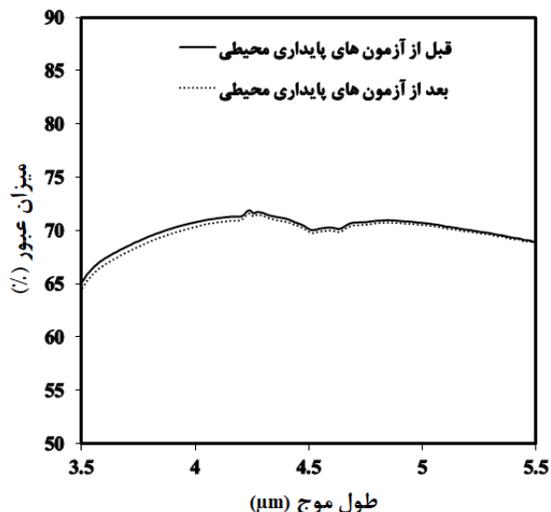


شکل ۴. تصویر شیشه بروسيليكاتي لایه‌نشانی شده با لایه نازک بهینه به منظور انجام آزمون پروفیلومتری.



شکل ۵. طرح‌واره‌ای از مقطع عرضی (الف) زیرلایه بدون پوشش و (ب) زیرلایه قرار گرفته در معرض تنش فشاری به واسطه لایه‌نشانی لایه نازک [۱۰].

با استفاده از روش پروفیلومتری و رابطه ۲ شعاع انحنای زیرلایه بروسيليكاتي و زیرلایه بروسيليكاتي لایه‌نشانی شده با لایه نازک SiCON با ضخامت بهینه اندازه‌گیری شد. از آنجا که ضریب پواسون زیرلایه بروسيليكاتي برابر با ۰/۲۱، مدول یانگ زیرلایه برابر با ۷۲/۹ GPa و ضخامت زیرلایه بروسيليكاتي ۱۴۵ μm است [۱۲]. همچنین ضخامت لایه نازک SiCON برابر با ۶۱۹ nm می‌باشد. بنابراین با استفاده از رابطه استونی مقدار تنش پسماند لایه نازک N10-C20-R1 برابر با ۱۰۹ MPa اندازه‌گیری شد. با توجه به منفی بودن میزان تنش پسماند، تنش از نوع فشاری در لایه نازک وجود دارد. تنش پسماند می‌تواند روی عملکرد و خواص چسبندگی پوشش تاثیر منفی بگذارد [۱۶]. در تحقیقی لی و همکاران تنش فشاری را در پوشش کربن شبه‌الماسی با

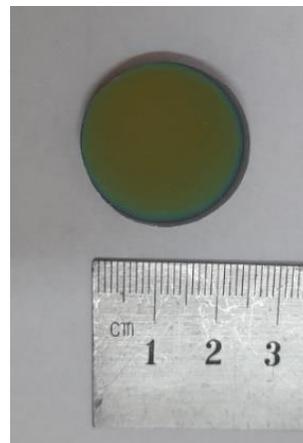


شکل ۸. میزان عبور سيليكون پوشش دهی شده با لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيليكون با ضخامت بهينه قبل و بعد از تمامی آزمون‌های پایداری محیطی در ناحیه طول موجی ۳-۵ μm.

نتایج آزمون‌های پایداری محیطی گرچه به صورت کیفی ارائه می‌شود، اما به عنوان یکی از اصلی‌ترین معیارهای پذیرش لایه‌های نازک در صنایع اپتیکی مطرح است. در کاربردهای صنعتی، پایداری لایه‌های نازک اپتیکی در شرایط کارکرد، به اندازه میزان عبور و محدوده شفافیت این پوشش‌ها، از اهمیت برخوردار هستند.

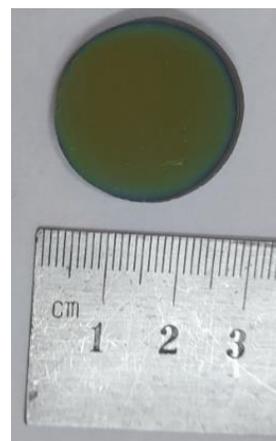
لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيليكون با ضخامت بهينه آزمون‌های حلالیت در آب، حلالیت در محلول نمک و مه نمکی را با موفقیت گذراند و نشان داد که لایه نازک لایه‌نشانی شده بدون تخلخل، بدون ترک، بدون جدایش فیلم در فصل مشترک و در کل فاقد محل‌هایی برای نفوذ رطوبت بین فصل مشترک فیلم و زیرلایه است. اگر روی سطح لایه نازک اعمالی منافذی وجود داشت، رطوبت می‌توانست بین فصل مشترک فیلم و زیرلایه نفوذ کند و امکان ایجاد جدایش فیلم از زیرلایه فراهم شود. در شکل ۹ تصویر سطح مقطع لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيليكون نشان داده شده است. مطابق با شکل ۹ لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيليكون با سطحی صاف، متراکم، بدون منافذ، بدون ترک و یکنواخت

طیف‌های عبوری قبل و بعد از انجام سایر آزمون‌ها کاملاً بر هم منطبق اند.



شکل ۶. تصویر نمونه سيليكون پوشش دهی شده با لایه نازک

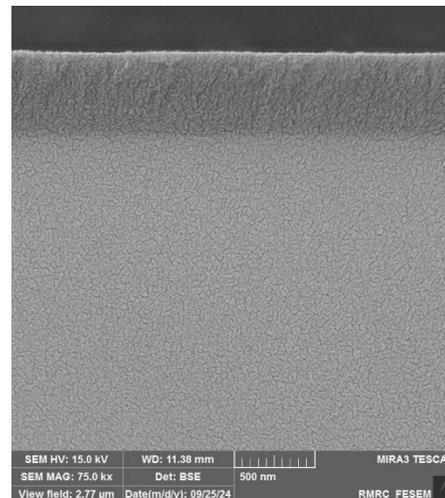
اکسی نیتريد کربن سيليكون با ضخامت بهينه قبل از آزمون‌های حلالیت در آب، حلالیت در محلول نمک، مه‌نمکی، چسبندگی، سایش ملایم و سایش شدید.



شکل ۷. تصویر نمونه سيليكون پوشش دهی شده با لایه نازک

اکسی نیتريد کربن سيليكون با ضخامت بهينه بعد از آزمون‌های حلالیت در آب، حلالیت در محلول نمک، مه‌نمکی، چسبندگی، سایش ملایم و سایش شدید.

تشکیل شده است. عدم وجود جدایش و ترک در فصل مشترک، تراکم و یکنواختی ضخامت لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيليكون در تصویر سطح مقطع اثبات شده است. قبلاً تشکیل لایه نازک کربونیتريد سيليكون به روش کندوپاش مغناطیسی روی زیرلایه سيليكونی با سطحی صاف و بدون عیب گزارش شده است [۱۹].



شکل ۹. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی از سطح مقطع لایه نازک SiCON در بزرگنمایی ۷۵ هزار برابر.

لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيليكون با ضخامت بهینه آزمون چسبندگی را نیز با موفقیت گذراند و نشان داد که چسبندگی لایه نازک اعمالی به زیرلایه به اندازه‌ای است که تنش پسماند فشاری فیلم (که برابر با ۱۰۹ MPa اندازه‌گیری شد) توانایی جداکردن فیلم از زیرلایه و ورقه‌ورقه کردن فیلم را ندارد. همچنین لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيليكون با ضخامت بهینه آزمون‌های سایش ملایم و سایش شدید را با موفقیت گذراند، بنابراین سختی لایه نازک به اندازه‌ای است که در شرایط محیطی خشن دچار خراشیدگی، ترک و جدایش از زیرلایه نمی‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق لایه‌نشانی اکسی نیتريد کربن سيليكون به روش کندوپاش مغناطیسی رادیوفرکانسی روی زیرلایه سيليكونی انجام شد. سپس خواص ضدبازتابی لایه نازک بهینه، تنش پسماند و پایداری محیطی آن ارزیابی شد. برطبق نتایج:

- ۱- ضریب شکست لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيليكون برابر با ۱/۶ در طول موج ۴ μm به دست آمد.
- ۲- با استفاده از طراحی در نرم‌افزار مکلود ضخامت بهینه برای دستیابی به حداقل بازتاب ۶۱۹ nm به دست آمد.
- ۳- اعمال لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيليكون با ضخامت بهینه موجب افزایش میزان عبور در طول موج ۴ μm تا مقدار ۹۴ درصد شد.

۴- لایه نازک SiCON بهینه N10-C20-R1 با تنش پسماند برابر با ۱۰۹ MPa لایه‌نشانی شد.

۵- لایه نازک اکسی نیتريد کربن سيليكون با موفقیت آزمون‌های پایداری محیطی را گذراند.

۵- مراجع

- [1] D.C. Harris, Materials for infrared windows and domes: properties and performance, SPIE Optical Engineering Press, Washington, 1999.
- [2] T. Hu, B. Dong, X. Luo, T.Y. Liow, J. Song, C. Lee and G.Q. Lo, Silicon photonic platforms for mid-infrared applications. Photonics Research 5 (2017) 417-430.
- [3] L.M. Goldman, S. K. Jha, N. Gunda, R. Cooke, N. Agarwal, S.A. Sastri, A. Harker and J. Kirsch, Durable Coating for IR Windows, Window and Dome Technologies and Materials IV 5786(2005)381-392.
- [4] L. Zhang, Characterization of low-dielectric-constant SiCON films grown by PECVD under different RF power, 9th International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology, IEEE, Beijing, China, 20-23 October (2008) 202-208.

- [13] A.A. Aghaei, A. Eshaghi, M. Ramazani, H. Zabolian and M. Abbasi-Firouzjah, Investigation of silicon carbon oxynitride thin film deposited by RF magnetron sputtering Applied Surface Science Advances 19 (2024) 100546.
- [14] A.A. Aghaei, A. Eshaghi, M. Ramazani, H. Zabolian and M. Abbasi-Firouzjah, Effect of N₂ reactive gas flow rate on the structural, optical and wettability properties of silicon carbon oxynitride thin film Heliyon 10 (2024) e35019.
- [15] A.A. Aghaei, A. Eshaghi, M. Ramazani, H. Zabolian and M. Abbasi-Firouzjah, Effect of deposition rate on anti-reflection and wettability properties of RF magnetron sputtering SiCON thin film Optical and Quantum Electronics 56(6) (2024) 924.
- [16] S. Massahi, L.M. Vu, D.D.M. Ferreira, F.E. Christensen, N. Gellert, P.L. Henriksen and M. Bavdaz, Balancing of residual stress in thin film iridium by utilizing chromium as an underlayer. In Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray 11444 (2020) 744-759).
- [17] Y.H. Lee, D. Kwon and J.I. Jang, Evaluation of Thin-Film Residual Stress Using Nano-Indentation Combined with an Atomic Force Microscope. International Journal of Modern Physics B 17 (2003) 1141-1146.
- [18] M. Huff, M. Residual stresses in deposited thin-film material layers for micro-and nano-systems manufacturing. Micromachines, 13(12) (2022) 2084.
- [19] V.S. Sulyaeva, A.N. Kolodin, M.N. Khomyakov, A.K. Kozhevnikov and M.L. Kosinova, Enhanced Wettability, Hardness, and Tunable Optical Properties of SiC_xN_y Coatings Formed by Reactive Magnetron Sputtering, Materials 16 (2023) 1467.
- [5] S.C. Hamm, J. Waidmann, J.C. Mathai, K. Gangopadhyay, L. Currano and Sh. Gangopadhyay, Characterization and versatile applications of low hydrogen content SiOCN grown by plasma-enhanced chemical vapor deposition, Journal of Applied Physics 116 (2014) 104902.
- [6] V.S. Sulyaeva, A.N. Kolodin, M.N. Khomyakov, A.K. Kozhevnikov and M.L. Kosinova, Enhanced Wettability, Hardness, and Tunable Optical Properties of SiC_xN_y Coatings Formed by Reactive Magnetron Sputtering, Materials 16 (2023) 1467.
- [7] Y. Zhu, P. Gu, H. Ye and W. Shen, Optical properties study of silicon oxynitride films deposited by RF magnetron sputtering, MEMS/MOEMS Technologies and Applications II 5641 (2004) 124-129.
- [8] L. Pinard and J.M. Mackowski, Synthesis and physicochemical characterization of silicon oxynitride thin films prepared by rf magnetron sputtering, Applied Optics 36 (1997) 5451-5460.
- [9] C. Corbella Roca, Thin film structures of diamond-like carbon prepared by pulsed plasma techniques, University of Barcelona. Department of Applied Physics and Optics, Doctor's degree, 2005.
- [10] M.R. Ardigo, M. Ahmed and A. Besnard, Stoney formula: Investigation of curvature measurements by optical Profilometer, Advanced Materials Research 996 (2014) 361-366.
- [11] R. Charavel, B. Olbrechts and J.P. Raskin, Stress release of PECVD oxide by RTA, The International Society for Optical Engineering 5116 (2003) 596-606.
- [12] Marienfeld, Chemical and physical properties, Microscope cover glasses made of borosilicate glass D 263® M, Paul Marienfeld GmbH & Co. KG, www.marienfeld-superior.com, Last modified: September 17 2020.