

بررسی یکنواختی لایه نازک SiO_2 ، تولید شده با روش تبخیر باریکه الکترون و تبخیر گرمایی

رضا شکوری^۱، حسن حیدری^۲

دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره) ، دانشکده علوم، گروه فیزیک^۱ rezashakouri@ymail.com

مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران^۲

چکیده - در این مقاله لایه نازک دی اکسید سیلیسیم، SiO_2 ، با دو روش تولید شده است: در روش اول، SiO_2 مستقیماً توسط تفنگ الکترونی تبخیر می‌شود و همزمان برای جبران کمبود اکسیژن، گاز اکسیژن به محیط تزریق می‌شود. در روش دوم، منواکسید سیلیسیم، SiO ، توسط تبخیر گرمایی، بخار می‌شود و در حین تبخیر آن، زیر لایه با یون‌های اکسیژن که توسط یک منبع یون تولید شده‌اند بمباران می‌شود. ضریب شکست، ضریب خاموشی و ضخامت لایه به کمک حل عددی روابط عبور و بازتاب محاسبه شده‌اند. از میزان جا به جایی منحنی عبور مقدار نایکنواختی لایه محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که اگر مقدار جریان و انرژی یون‌های اکسیژن به طور مناسب انتخاب شوند، لایه SiO_2 تولید شده در روش دوم، جذب ندارد. بعلاوه لایه SiO_2 تولید شده توسط روش دوم به مراتب یکنواخت‌تر از لایه تولید شده با روش اول می‌باشد.

کلید واژه- دی اکسید سیلیسیم، منواکسید سیلیسیم، یکنواختی، ضریب شکست
PAC Number : ۶۸, ۸۰, ۸۱

Investigation of uniformity SiO_2 thin film deposited by electron beam and thermal evaporation method

R. Shakouri, Hassan Haydari

Imam khomeini international university, Qazvin, Iran, Iranian National Center for Laser Science and Technology

PAC Number : ۶۸, ۸۰, ۸۱

In this paper, SiO_2 thin film is produced by two methods: at the first method, SiO_2 is evaporated by the electron gun and oxygen gas is injected to compensate for oxygen loss due to dissociation. At the second method, silicon monoxide is evaporated by thermal evaporation and during the evaporation time, substrate is bombarded by the ion oxygen that produced by an ion source. The refraction index, the extinction coefficient and the thickness layer are calculated by numerical method of the transmittance and reflectance equations. By the shift in the spectral transmittance, amount of non uniformity is calculated. Results show that if the quantity of the current and the ion energy are selected properly, SiO_2 film will not have absorption. Moreover, SiO_2 film produced by the second method is more uniform than that of by the first method.

Keywords: Silicon Dioxide, Silicon Monoxide, Uniformity, refractive index

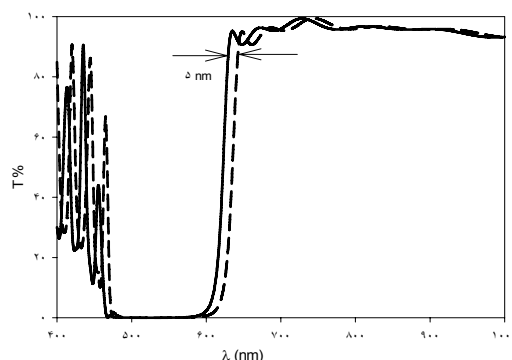
PAC Number: ۶۸, ۸۰, ۸۱

دی اکسید سیلیسیم SiO_2 در ساخت ابزار میکروالکترونیک و میکروالکترومکانیک هم به دلیل خواص عایقی و هم خواص مکانیکی مورد توجه است. لایه دی اکسید سیلیسیم اگر به طور مناسب تولید شود می‌تواند آستانه تخریب بالایی داشته باشد [۱]. در ساخت فیلترهای تداخلی در ناحیه مرئی و مادون قرمز دی اکسید سیلیسیم همراه با دی اکسید تیتانیم TiO_2 ، از پرکاربردترین مواد بین اکسیدهای فلزی محسوب می‌شوند. به عنوان مثال اگر تعداد سیزده لایه، متشکل از TiO_2 و SiO_2 که به طور یک در میان با ضخامت اپتیکی ربع طول موج در ناحیه مرئی بر روی یک زیر لایه‌ای از جنس شیشه لایه نشانی شده باشند می‌توانند بازتاب نور را در ناحیه مرئی تا ۹۹٪ افزایش دهند. در ناحیه طول موجی فرابنفش به دلیل جذب نسبتاً بالای TiO_2 ، برای ساخت فیلترهای تداخلی از این ماده نمی‌توان استفاده کرد. اما در ناحیه فرابنفش می‌توان از SiO_2 و اکسید هافنیم HfO_2 یا اکسید آلومینیم Al_2O_3 برای ساخت فیلترهای تداخلی استفاده کرد [۴-۷]. لایه دی اکسید سیلیسیم استرس^۱ نسبتاً زیادی دارد و این، بعضاً منجر به خمیدگی و در نتیجه ترک خوردن لایه می‌شود. در مرجع [۵] استرس زیاد لایه منجر به تغییر توزیع انرژی بر روی نمونه لایه نشانی شده می‌شود [۶]. به روش فیزیکی PVD^۲ لایه نازک دی اکسید سیلیسیم را هم می‌توان با روش تفنگ الکترونی^۳ و هم با روش کند و پاش^۴ تولید کرد. لایه تولید شده با هر روش ویژگی‌های مخصوص به خود را دارد. برای افزایش استحکام لایه، روش معمول، افزایش دمای زیر لایه در حین لایه نشانی می‌باشد اما در بیست سال اخیر برای افزایش استحکام لایه از روش انباشت به کمک باریکه یون^۵ IAD نیز استفاده شده است، هر چند این روش معمولاً منجر به ایجاد جذب لایه می‌شود. در لیزرهای پر توان وجود جذب در لایه امری مضر محسوب می‌شود زیرا باعث تخریب سریع تر لایه در مواجهه با نور لیزر پر توان می‌شود. از طرفی یک مزیت مهم روش IAD این است که نیاز به افزایش درجه حرارت زیر لایه در حین لایه نشانی ندارد. در واقع یون‌ها با انتقال اندازه حرکت به اتمهای بخار، انرژی لازم را برای تحرک اتمها بر روی سطح زیر لایه [۷] تامین می‌کنند. پایین بودن درجه حرارت زیر لایه، امکان لایه نشانی، بر روی زیر لایه‌های با نقطه ذوب پایین (نظیر پلاستیک) را فراهم می‌کند.

یکنواختی لایه از نظر ضخامت نیز در عملکرد فیلترهای تداخلی اهمیت بسیار زیادی دارد. در شکل-۱ منحنی عبور دو نمونه فیلتر تداخلی موسوم

^۱ Stress
^۲ Physical Vapor Deposition
^۳ Electron Gun Technique
^۴ Sputtering
^۵ Ion Assistant Deposition

به فیلتر بالا گذر^۶ نشان داده شده است که هر نمونه از بیست و یک لایه SiO_2 و TiO_2 بر روی یک زیر لایه شیشه‌ای تشکیل شده است. تنها، تفاوت ضخامت ۲ درصد در هر لایه باعث جابجایی لبه منحنی عبور به اندازه ۵ نانومتر شده است. برای بهبود یکنواختی لایه در برخی دستگاه‌های لایه نشانی، زیر لایه بر روی یک هولدر قرار می‌گیرد که این هولدر درون مخزن خلا حرکت سیاره‌ای^۷ دارد. در لایه نشانی‌هایی که ما انجام داده‌ایم از سیستم سیاره‌ای استفاده شده است (شکل-۲ را ببینید). با وجود این، حتی در این سیستم‌ها نیز لایه نازک بطور صد در صد یکنواخت نیست [۸].



شکل-۱: جابجایی منحنی عبور در یک فیلتر بالا گذر به ازای افزایش ضخامت لایه‌ها به اندازه ۲ درصد

همچنانکه می‌دانیم ضریب شکست هر ماده در حالت کلی به صورت $n^* = n + ik$ نمایش داده می‌شود. برای هر ماده که k صفر باشد، آن ماده یک دی الکتریک خالص است. در مواردی که k صفر نباشد، لایه جذب دارد و ضریب جذب α با رابطه $\alpha = 4\pi k / \lambda$ تعریف می‌شود که λ طول موج و نسبت شدت نور عبور کرده به شدت نور فرودی از رابطه $I/I_0 = e^{-\alpha t}$ بدست می‌آید که در آن t ضخامت لایه می‌باشد. لایه نازک هر ماده تولید شده با روش‌های مختلف می‌توانند ضریب شکست متفاوتی داشته باشند. علت وجود ضرایب شکست متفاوت این است که روش‌های مختلف انباشت لایه منجر به تشکیل ساختارهای متفاوتی از لایه‌ها می‌شوند.

در این مقاله لایه نازک دی اکسید سیلیسیم به دو روش تولید شده است:

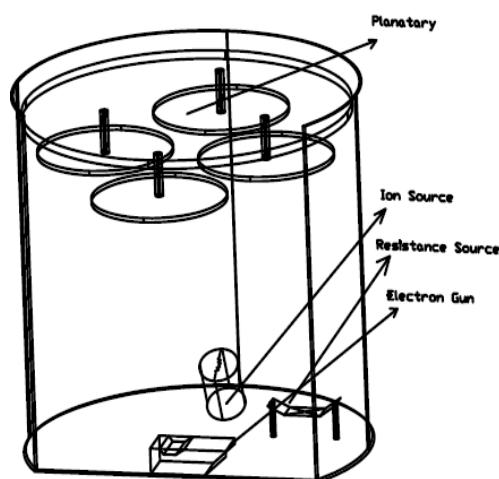
روش اول: دی اکسید سیلیسیم، SiO_2 در بوته مسی تفنگ الکترونی قرار داده می‌شود و همزمان با تبخیر آن گاز اکسیژن به محیط تزریق می‌شود. روش دوم: اکسید سیلیسیم، SiO_2 در بوته مقاومتی قرار داده می‌شود و در حین تبخیر آن، زیر لایه توسط منبع یون^۸ بمباران می‌شود.

^۶ Longwave Pass Filter
^۷ Planetary
^۸ Ion Source

گازی که منبع یون برای تولید یون بکار می‌گیرد گاز اکسیژن است و به این ترتیب در روش دوم هم اکسیژن در محیط وجود دارد و هم SiO ، که توسط تبخیر مقاومتی ایجاد شده است. ترکیب اکسیژن و SiO می‌توانند بر روی زیر لایه، لایه SiO_2 را تشکیل دهند. ضریب شکست و ضخامت لایه‌های تولید شده با حل معادله عبور و بازتاب به روش عددی محاسبه شده‌اند. با اندازه‌گیری میزان جا به جایی طیف عبور، میزان یکنواختی لایه و چگالی تراکم^۹ آن ارزیابی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با روش دوم می‌توان لایه با چگالی تراکم خوب تولید کرد. همچنین یکنواختی لایه در روش دوم بهتر است.

۲- روش و جزئیات آزمایش

سیستم خلا از یک پمپ توربوملکولار و یک پمپ روتاری تشکیل شده است. مخزن با این پمپ‌ها، حداکثر تا فشار 1×10^{-6} Torr تخلیه می‌شود. ماده دی اکسید سیلیسیم که به شکل دانه‌ای^{۱۰} است، روی بوتله مسی قرار داده می‌شوند. فاصله بین زیر لایه تا بوتله تبخیر 60 cm است. زیر لایه، می‌تواند توسط هیتر تابشی تا دمای 300°C سلسیوس گرم شود و در بازه زمانی که لایه نشانی انجام می‌شود دمای زیر لایه توسط یک سیستم کنترل توان که می‌تواند توان هیتر را تغییر دهد ثابت نگه داشته می‌شود. تفنگ الکترونی با زاویه انحراف باریکه، به اندازه 270° درجه و حداکثر توان 5 کیلووات می‌باشد ($V = 10 \text{ kV}$ و $I = 0.5 \text{ A}$). باریکه الکترون به شکل یک دایره، سطح بوتله را جاروب می‌کند تا سطح بوتله به طور یکنواخت گرم شود. در شکل-۲ یک شکل شماتیک از موقعیت تفنگ الکترونی، منبع یون و منبع مقاومتی نشان داده شده است.



شکل- ۲ : موقعیت تفنگ الکترونی، منبع مقاومتی و منبع یون در درون مخزن

ضخامت لایه‌ها با یک ضخامت سنج اپتیکی^{۱۱} اندازه‌گیری می‌شوند زیر لایه‌ها از جنس شیشه با نام تجاری BK۷ می‌باشند. برای جبران کردن تجزیه شدن دی اکسید سیلسیم در هنگام تبخیر آن، با استفاده از یک شیر بسیار دقیق گاز اکسیژن به درون محیط تزریق می‌شود. بوته مقاومتی از جنس مولیبدن می‌باشد که حداکثر توان $P = 3 \text{ kW}$ را می‌توان به آن اعمال کرد. منبع یون می‌تواند یون‌های اکسیژن را با حداکثر ولتاژ ۳۰۰ ولت به سمت زیر لایه شتاب دهد و جریان یون‌ها به میزان گاز اکسیژن ورودی به منبع یون بستگی دارد. اگر انرژی یون‌های اکسیژن فرودی از طرف منبع یون بر روی زیر لایه بیش از حد باشد، لایه تخریب می‌شود. این وضعیت مشابه کند و پاش شدن لایه توسط ذرات پر انرژی می‌باشد [۹، ۱۰]. از طرف دیگر تعداد ملکول‌های اکسیژن در محیط باید آنقدر زیاد باشد تا برای تشکیل SiO_2 ، ذرات SiO بخار شده توسط بوته مقاومتی کمبود اکسیژن نداشته باشند. در آزمایش‌های ما نرخ تبخیر SiO و جریان یون اکسیژن ثابت اختیار شده‌اند. به این ترتیب نسبت O_2 به SiO در محیط ثابت است و تاثیر انرژی یون‌های اکسیژن مشخص می‌شود.

بعد از انجام لایه نشانی و تولید لایه SiO_2 ، منحنی عبور و بازتاب هر نمونه توسط اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری می‌شوند. بعد از هر اندازه‌گیری، نمونه، برای چند دقیقه درون آب مقطر قرار داده می‌شود. سپس بعد از خارج کردن نمونه و خشک کردن آن در حدی که آب به وضوح بر روی نمونه دیده نشود، دو باره منحنی عبور و بازتاب نمونه توسط اسپکترومتر اندازه‌گیری می‌شود. با انجام این فرایند برای تمام نمونه‌ها می‌توان اثر رطوبت را از روی تغییر منحنی عبور لایه بررسی کرد. در واقع در صورتی که لایه‌ها به اندازه کافی متراکم نباشند منحنی‌های عبور و بازتاب، به سبب نفوذ ملکول‌های آب به درون آنها جا به جا می‌شوند. میزان جابجایی منحنی را می‌توان به عنوان معیاری برای چگالی لایه در نظر گرفت.

۳- معادلات اساسی و روش محاسبات

برای محاسبه ضریب شکست و ضریب جذب از دو معادله زیر که مقدار بازتاب و عبور را بر حسب ضریب شکست n ، ضریب خاموشی k ، و ضخامت لایه بدست می‌دهند کمک می‌گیریم [۱۱، ۱۲]

$$T = \frac{16n_s(n^2 + k^2)}{E \exp \beta + F \exp(-\beta) + 2G \cos \gamma + 4H \sin \gamma} \quad (1)$$

$$R = \frac{A \exp \beta + B \exp(-\beta) + 2C \cos \gamma + 4D \sin \gamma}{E \exp \beta + F \exp(-\beta) + 2G \cos \gamma + 4H \sin \gamma} \quad (2)$$

که A ، B ، C ، D ، E ، F ، G ، H ، β ، و γ به ترتیب عبارتند از

$$A = [(n - n_s)^\gamma + k^\gamma][(n + n_s)^\gamma + k^\gamma]$$

$$B = [(n + n_s)^\gamma + k^\gamma][(n - n_s)^\gamma + k^\gamma]$$

$$C = (n^\gamma + k^\gamma)(n_s^\gamma + n_s^\gamma) - (n^\gamma + k^\gamma)^\gamma - n_s^\gamma n_s^\gamma - \gamma n_s n_s k$$

$$D = k(n_s - n_s)(n^\gamma + k^\gamma + n_s n_s)$$

$$E = [(n + n_s)^\gamma + k^\gamma][(n + n_s)^\gamma + k^\gamma]$$

$$F = [(n - n_s)^\gamma + k^\gamma][(n - n_s)^\gamma + k^\gamma]$$

$$H = k(n_s - n_s)(n^\gamma + k^\gamma - n_s n_s)$$

$$G = [(n^\gamma + k^\gamma)(n_s^\gamma + n_s^\gamma) - (n^\gamma + k^\gamma)^\gamma - n_s^\gamma n_s^\gamma + \gamma n_s n_s k^\gamma]$$

$$\beta = \gamma \pi k d / \lambda$$

$$\gamma = \gamma \pi n d / \lambda$$

در دو رابطه آخر d ، و λ به ترتیب ضخامت لایه و طول موج نور می‌باشند. بعد از لایه نشانی هر نمونه، مقادیر عبور T و بازتاب R در طول موجهای متفاوت، توسط اسپکترومتر اندازه‌گیری می‌شوند. در دو معادله فوق ضریب شکست زیرلایه (شیشه) $n_s = 1.52$ و هوا، $n_s = 1$ مقادیر معلوم می‌باشند. به این ترتیب سه مجهول در معادلات (۱) و (۲) وجود دارند که به ترتیب عبارتند از: ضریب شکست لایه n ، ضریب خاموشی لایه k و ضخامت d لایه. اگر چه مطابق با آنچه در بخش قبلی بیان شد، ضخامت اپتیکی لایه (حاصلضرب ضریب شکست در ضخامت فیزیکی nd) توسط ضخامت سنج اپتیکی در حین لایه نشانی اندازه‌گیری شده است اما در معادلات (۱) و (۲) ضخامت فیزیکی ظاهر شده است. با استفاده از ضخامت اپتیکی می‌توان برای مقدار ضخامت فیزیکی یک عدد تخمینی بدست آورد. علی‌الاصول معادلات (۱) و (۲) به ازای هر مقدار ضخامت d که بر روی زیر لایه، لایه نشانی شود قابل حل است و مقادیری از n و k در آن صدق می‌کند اما برای تخمین ضخامت زیر لایه، بهتر است اندازه ضخامتی که بر روی زیر لایه، لایه نشانی می‌شود طوری باشد که باریکه‌های بازتابی از فصل مشترک هوا- لایه و لایه- زیر لایه آنتی فاز^{۱۲} باشند. در این حالت ضخامت لایه از رابطه زیر پیروی می‌کند [۱۳]

$$2nd = m \frac{\lambda}{2} \quad m=1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

که n ضریب شکست لایه و d ضخامت لایه است. با ضخامت سنج اپتیکی، مضراب صحیحی از نصف طول موج را بر روی هر زیر لایه، لایه نشانی می‌کنیم، در نتیجه از رابطه (۳) ضخامت فیزیکی d را با جایگزینی یک مقدار تقریبی برای n بدست می‌آوریم. این مقدار تخمینی را می‌توان به عنوان جواب اولیه، در دو معادله (۱) و (۲) بکار برد. بنابراین ابتدا با جایگزینی مقدار ضخامت تخمینی d در معادلات مزبور، مقادیر n و k را بدست می‌آوریم. سپس با داشتن مقدار n و k ، ضخامت d را محاسبه می‌کنیم. مجدداً با d معلوم، مقادیر n و k را محاسبه می‌کنیم و این فرایند محاسبه را آنقدر ادامه می‌دهیم تا جوابها با دقت زیادی تکرار شوند یا به عبارت دیگر جوابها همگرا شوند.

معادلات (۱) و (۲) هم غیر خطی و هم غیر جبری‌اند، از اینرو حل آنها به طور تحلیلی ممکن نیست. برای حل آنها ما از یک کد که به روش تند ترین شیب^{۱۳} معادلات غیر خطی را حل می‌کند کمک گرفته‌ایم. اگر چه سرعت همگرای این روش کم است اما مزیت عمده آن این است که با هر مقدار حدسی اولیه جواب، به جوابهای دقیق همگرا می‌شود [۱۴، ۱۵].

۳- نتایج و بحث

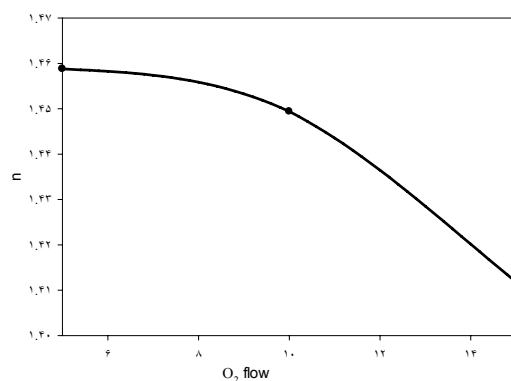
اینک نتایج بدست آمده با هر یک از روشهایی بیان شده در بخش اول را ارائه می‌دهیم :

نتایج روش اول : در جدول ۱- مقادیر شار اکسیژن، نرخ انباشت لایه برای هر نمونه دی اکسید سیلیسم داده شده است. ضرایب شکست محاسبه شده نیز در ستون سوم داده شده‌اند. دمای زیر لایه در تمام نمونه‌ها ۲۵۰ درجه سلسیوس می‌باشد و نرخ انباشت نیز برای همه نمونه‌ها با ثابت نگه داشتن توان تفنگ الکترونی، ثابت در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- ، مقادیر شار اکسیژن و ضریب شکست

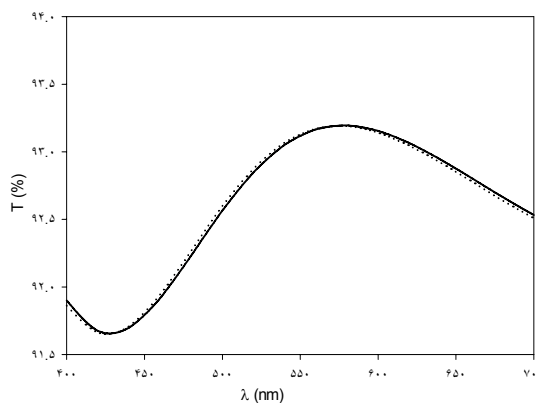
No.	O_2 (SCCM)	n در ۵۷۵nm
۱	۵	۱.۴۵۱۱
۳	۱۰	۱.۴۴۹۴
۳	۱۵	۱.۴۱۱۱

از جدول ۱- ملاحظه می‌شود که با افزایش شار اکسیژن ضریب شکست کاهش یافته است. ضریب خاموشی k محاسبه شده برای هر سه نمونه خیلی کوچک است و تقریباً می‌توان آنها را صفر انگاشت. میزان تغییرات ضریب شکست بر حسب شار اکسیژن در شکل- ۳ رسم شده است.



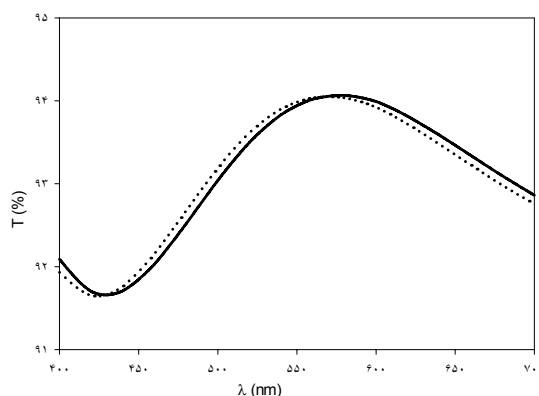
شکل- ۳: تغییرات ضریب شکست SiO₂ بر حسب شار اکسیژن

اثر نفوذ رطوبت بر روی نمونه‌های اول و سوم جدول- ۱، به ترتیب در شکل- ۴ و ۵ نشان داده شده است.



شکل- ۴: جا به جایی منحنی عبور نمونه اول جدول- ۱

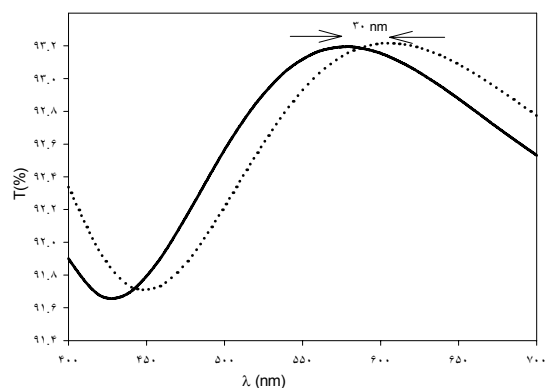
منحنی نقطه چین طیف عبور نمونه‌ای است که ابتدا به مدت چند دقیقه در آب مقطر غوطه ور شده است و سپس مطابق با آنچه در بخش دوم بیان شد، خشک شده است. میزان جا به جایی بیانگر میزان نفوذ ملکول‌های آب در لایه می‌باشد.



شکل-۵ : جا به جایی منحنی عبور نمونه سوم جدول-۱

اگر چگالی تراکم لایه صد در صد نباشد، خلل و فرج‌های میکروسکوپی در لایه وجود دارد و آب می‌تواند در این خلل و فرج‌ها نفوذ کند و در نتیجه باعث جا به جایی طیف لایه شود. میزان جا به جایی منحنی عبور در شکل-۵، قابل توجه است در حالی که جابه جایی منحنی عبور در شکل-۴، ناچیز است. این کاملاً منطقی به نظر می‌رسد زیرا چگالی لایه با ضریب شکست آن متناسب است و ضریب شکست نمونه اول (جدول-۱) بیشتر است. با توجه به اینکه آب به درون نمونه اول نفوذ نکرده است، می‌توان نتیجه گرفت چگالی تراکم نمونه اول صد در صد است اما چگالی تراکم نمونه سوم صد در صد نیست [۱۶].

برای ارزیابی میزان یکنواختی لایه از نظر ضخامت، دو نقطه متفاوت را بر روی نمونه انتخاب می‌کنیم و نمونه را هر بار طوری بر روی نگهدارنده^{۱۴} آن در اسپکتروفوتومتر قرار می‌دهیم که طیف عبور از دو نقطه مزبور اندازه گیری شود. اگر طیف عبور هر دو نقطه کاملاً بر هم منطبق باشند، یکنواختی لایه صد در صد می‌باشد. در غیر این صورت لایه کاملاً یکنواخت نیست و هر چه فاصله دو طیف بیشتر باشد بیانگر این است که یکنواختی کمتر است. در شکل-۶، طیف عبور از دو نقطه بر روی نمونه که فاصله این دو نقطه ۴ سانتی متر است رسم شده است.



شکل- ۶ : طیف عبور، از دو نقطه بر روی نمونه با فاصله ۴ cm

با توجه به رابطه (۳) می‌توان مقدار اختلاف ضخامت را در دو نقطه مزبور محاسبه کرد

$$2nd = m \frac{\lambda}{\nu} \Rightarrow 2n\delta d = m \frac{\delta\lambda}{\nu} \quad (4)$$

با توجه به شکل- ۶ ، $\delta\lambda = 30 \text{ nm}$ است و در نتیجه به ازای $n=1.4588$ ، و $m=2$ مقدار $\delta d \approx 10 \text{ nm}$ بدست می‌آید. این اختلاف ضخامت ده نانومتری معادل تغییر نسبی ۳.۵ درصدی ضخامت می‌باشد. در شکل- ۱ ، دیدم که تغییر ضخامت به اندازه دو درصد باعث جا به جایی لبه طیف به اندازه پنج نانومتر شد. بنابراین تغییر نسبی ۳.۵ درصد در ضخامت هر لایه در ساخت یک فیلتر بالاگذر، نظیر شکل ۱- ، باعث جا به جایی بیشتر طیف می‌شود. نایکنواخت بودن لایه را می‌توان به شکل توزیع بخار SiO_2 نسبت داد.

نتایج روش دوم : در این روش SiO در بوته مقاومتی قرار داده شده است و در حین تبخیر آن، نمونه توسط منبع یون، با یون‌های اکسیژن بمباران می‌شود. در منبع یون آزمایشگاه ما، انرژی یون‌ها را می‌توان تا $V=300 \text{ eV}$ انتخاب کرد و شدت جریان یون به میزان شار اکسیژن ورودی به منبع یون بستگی دارد. اگر ولتاژ بیش از حد زیاد باشد، یون‌ها باعث کند و پاش لایه می‌شوند [۱۶]. از طرف دیگر، تعداد یون‌های اکسیژن نباید آنقدر کم باشد که برای تشکیل SiO_2 ، کمبود اکسیژن وجود داشته باشد. در دستگاه لایه نشانی ما، وقتی انرژی یون‌های اکسیژن بیش از 80 eV باشند، نرخ انباشت لایه کاهش می‌یابد که دال بر کند و پاش جزئی است. افزون بر این، وقتی تعداد یون‌ها (جریان منبع یون) خیلی زیاد باشد، فشار در محیط بالاتر می‌رود و احتمال برخورد بالا می‌رود. در نتیجه انرژی موثر یون‌ها هنگام برخورد به سطح زیر لایه کاهش می‌یابد : مسافتی که یک ملکول به طور متوسط قبل از هر برخورد طی می‌کند از رابطه زیر بدست می‌آید (مسافت آزاد میانگین)

$$d_{mfp} = \frac{0.005}{P} \quad (6)$$

در رابطه فوق P بر حسب $Torr$ و d_{mfp} بر حسب سانتی متر می‌باشد. از طرفی، بنا بر معادله بقا^{۱۰} در ترمودینامیک تعداد ملکول‌های N که مسافت x را بدون برخورد طی می‌کنند برابر است با $N/N_0 = \exp(-x/d_{mfp})$ ، که N_0 تعداد کل ملکول‌ها می‌باشد. بنابراین انرژی یون‌های اکسیژن در اثر برخورد کاهش می‌یابد و به عنوان مثال وقتی ولتاژ منبع یون روی عدد 80 eV قرار داده شده است، انرژی موثر در هنگام برخورد با سطح زیر لایه کمتر از 80 eV خواهد بود.

در جدول-۲ برای سه نمونه مقدار انرژی و جریان یون، ضریب شکست n و ضریب خاموشی ثبت شده‌اند. جریان یون برای هر سه نمونه ثابت فرض شده است. اگر جریان‌های متفاوت را آزمایش می‌کردیم نسبت تعداد SiO_2 و تعداد O_2 در محیط تغییر می‌کرد و بنابراین تغییر n و k با استوکیومتری ارتباط پیدا می‌کرد. اما در جدول-۲، مقدار جریان برای نمونه‌ها ثابت است و بنابراین تغییرات انرژی یون‌های اکسیژن منجر به تغییرات n و k شده است. همچنانکه مشاهده می‌شود در تمام نمونه‌ها جذب وجود دارد (مقدار k صفر نیست). اما در نمونه ۱، مقدار جذب یک مرتبه کوچکتر از دو نمونه‌های دیگر است. در نتیجه با روش دوم می‌توان لایه SiO_2 با جذب ناچیز تولید کرد.

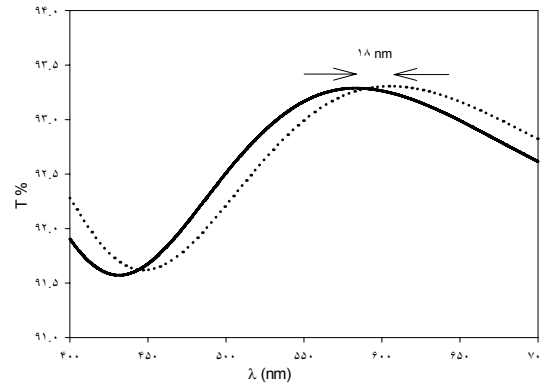
جدول-۲: مقادیر انرژی و جریان یون‌ها همراه با ضریب شکست و ضریب خاموشی نمونه‌ها

No	$E(\text{eV})$	$I(\text{A})$	n در 575 nm	K در 575 nm
۱	۴۰	۴	۱.۴۵۳۴	۰.۰۰۰۰۴
۲	۶۰	۴	۱.۴۵۶۷	۰.۰۰۰۰۳۳
۳	۸۰	۴	۱.۴۶۹۹	۰.۰۰۰۰۳۸

وجود جذب در یک لایه امری مضر محسوب می‌شود و باعث تخریب سریع تر لایه می‌شود. بخصوص وقتی قرار است لایه تحت تابش یک لیزر پر توان بکار گرفته شود. همانطوری که در شکل-۶ ملاحظه شد وقتی لایه SiO_2 با روش باریکه الکترونی تبخیر می‌شود، لایه از نظر ضخامت یکنواخت نیست و نقاط متفاوت بر روی زیر لایه ضخامت‌های متفاوت دارند. نتایج نشان می‌دهد که وقتی لایه SiO_2 به کمک منبع یون و تبخیر SiO_2 توسط منبع مقاومتی تولید می‌شود، لایه به مراتب از نظر ضخامت یکنواخت تر است: در شکل-۷، طیف عبوری از دو نقطه مشابه با اندازه‌گیری که به شکل-۶ منجر شد را رسم

^{۱۰} Survival Equation

کرده ایم. براحتی می‌توان دید که جا به جایی منحنی‌ها در مقایسه با شکل-۶ کمتر است. به کمک رابطه (۴) می‌توان اختلاف ضخامت را محاسبه کرد که $\delta d \approx 6 \text{ nm}$ بدست می‌آید.



شکل ۷- : طیف عبور، از دو نقطه بر روی نمونه که به کمک منبع یون تولید شده است

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله لایه نازک دی‌اکسید سیلیسیم، SiO_2 ، بر روی زیر لایه از جنس شیشه به دو روش تولید شد. در روش اول، SiO_2 مستقیماً توسط باریکه الکترون در خلاء تبخیر شد. در روش دوم منواکسید سیلیسیم، SiO توسط یک منبع مقاومتی تبخیر شد و به طور همزمان زیرلایه با یون‌های اکسیژن توسط منبع یون بمباران شد. ضخامت لایه‌ها مضرب صحیحی از نصف طول موج انتخاب شدند تا بتوانیم توسط رابطه (۴)، میزان نایکنواختی لایه را در هر روش محاسبه کنیم. میزان نایکنواختی لایه در روش دوم تا حد قابل توجهی کمتر از نایکنواختی لایه در روش اول است. ضرایب شکست و خاموشی در هر دو نوع روش محاسبه شدند. میزان جذب لایه در روش دوم به انرژی یون‌ها بستگی دارد و با انتخاب مناسب انرژی یون می‌توان جذب لایه را تا نزدیک صفر کاهش داد.

- [١] R. Chow and N. Tsujimoto "Silicon dioxide and hafnium dioxide evaporation characteristics from a high-frequency sweep E-beam system," *Appl. Opt.* ٣٥, ٥٠٩٥ (١٩٩٦). Society of America, ٢٠٠٤), paper WD١.
- [٢] F. Rainer, H.W. Lowdermilk, D. Milam, C.K. Carniglia, T. Tuttle Hart, T.L. Lichtenstein, *Appl. Opt.* ٢٤ ٤٩٦ (١٩٨٥).
- [٣] P. Baumeister, O. Arnon, *Appl. Opt.* ١٦ ٤٣٩ (١٩٧٧).
- [٤] F. Rainer, D. Milam, W.H. Lowdermilk, *NBS Spec. Publ.* ٦٣٨ ٣٣٩ (١٩٨١).
- [٥] E. Kobeda and E. Irene "A measurement of intrinsic SiO₂ film stress resulting from low temperature thermal oxidation of Si" *J. Vac. Sci. Technol. B* ٤ ٧٢٠ (١٩٨٦).
- [٦] K. Chen, X. Zhang and S. Lin "Intrinsic stress generation and relaxation of plasma-enhanced chemical vapor deposited oxide during deposition and subsequent thermal cycling" *Thin Solid Films* ٤٣٤ ١٩٠ (٢٠٠٣).
- [٧] M. Alvisia, G. Nunziob, M. Perroneb, A. Rizzoc, S. Scaglione, and L. Vasanelli "Influence of the assisting-ion-beam parameters on the laser-damage threshold of SiO₂ films" *Thin Solid Films* ٣٣٨ ٢٦٩ (١٩٩٩).
- [٨] www.eddyco.com
- [٩] P.J. Martin and R.P. Netterfield: "Ion-assisted deposition of magnesium fluoride films on substrates at ambient temperatures" *Appl. Opt.* ٢٤, ١٧٣٢ (١٩٨٥).
- [١٠] L. Dumas, E. Quesnel, F. Pierre, and F. Bertin, "Optical properties of magnesium fluoride thin films produced by argon ion-beam assisted deposition," *J. Vac. Sci. Technol. A.* ٢٠, ١٠٢ (٢٠٠٢).
- [١١] M.H.Fran Combe, R.W.Hoffman, *Phys.ThinFilms*, ٩, ١٥٧ (١٩٧١).
- [١٢] S.M. El-Sayed, *Mater. Chem. Phys.* ٧٨ ٢٦٢ (٢٠٠٢).
- [١٣] Ortega, J. M. and W. C. Rheinboldt, "*Iterative solution of nonlinear equations in several variables*" Academic Press, New York, ٥٧٢ (١٩٧٠).
- [١٤] A. Macleod, *Thin Film Optical Filtes*, Fourth Edition, CRC Press (٢٠٠٤).
- [١٥] Allgower, E. and K. Georg, *Numerical continuation methods: an introduction*, Springer- Verlag, New York, ١٩٩٠, ٣٨٨ pp.
- [١٦] D. Faires and D. Burden "*Numerical Methods*" ٣ Edition Brooks Cole (٢٠٠٢).
- [١٧] Kinosita K and Nishibori M ١٩٦٩ Porosity of MgF₂ films—evaluation based on changes in refractive index due to adsorption of vapors *Journal of Vacuum Science and Technology* ٩ ٧٣٠-٧٣٣.