

## بررسی یکنواختی لایه نازک $\text{SiO}_2$ ، تولید شده با روش تبخیر باریکه الکترون و تبخیر گرمایی

رضا شکوری<sup>۱</sup> و حسن حیدری<sup>۲</sup>

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

۲. مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران

پست الکترونیکی: rezashakouri@ymail.com

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۰۵؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۰۲/۱۷)

### چکیده

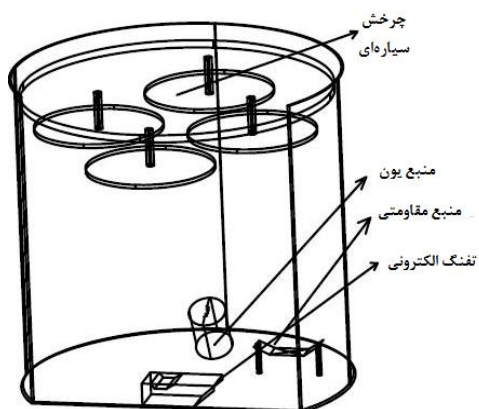
در این مقاله لایه نازک دی اکسید سیلیسیم،  $\text{SiO}_2$ ، با دو روش تولید شده است: در روش اول،  $\text{SiO}_2$  مستقیماً توسط تفنگ الکترونی تبخیر می شود و هم زمان برای جبران کمبود اکسیژن، گاز اکسیژن به محیط تزریق می شود. در روش دوم، منواکسید سیلیسیم،  $\text{SiO}$ ، توسط تبخیر گرمایی بخار می شود و در حین تبخیر آن، زیر لایه با یون های اکسیژن که توسط یک منبع یون تولید شده اند بمباران می شود. ضریب شکست، ضریب خاموشی و ضخامت لایه به کمک حل عددی روابط عبور و بازتاب محاسبه شده اند. از میزان جابه جایی منحنی عبور مقدار نایکنواختی لایه محاسبه شده است. نتایج نشان می دهد که اگر مقدار جریان و انرژی یون های اکسیژن به طور مناسب انتخاب شوند، لایه  $\text{SiO}_2$  تولید شده در روش دوم، جذب ندارد. به علاوه لایه  $\text{SiO}_2$  تولید شده توسط روش دوم به مراتب یکنواخت تر از لایه تولید شده با روش اول می باشد.

واژه های کلیدی: دی اکسید سیلیسیم، منواکسید سیلیسیم، یکنواختی، ضریب شکست

### ۱. مقدمه

عنوان مثال اگر تعداد سیزده لایه، متشکل از  $\text{TiO}_2$  و  $\text{SiO}_2$  که به طور یک در میان با ضخامت اپتیکی ربع طول موج در ناحیه مرئی بر روی یک زیر لایه ای از جنس شیشه لایه نشانی شده باشند می توانند بازتاب نور را در ناحیه مرئی تا ۹۹٪ افزایش دهند. در ناحیه طول موجی فرابنفش به دلیل جذب نسبتاً بالای  $\text{TiO}_2$ ، برای ساخت فیلترهای تداخلی از این ماده نمی توان استفاده کرد. اما در ناحیه فرابنفش می توان از  $\text{SiO}_2$  و اکسید hafnium  $\text{HfO}_2$  یا اکسید آلومینیم  $\text{Al}_2\text{O}_3$  برای ساخت فیلترهای

دی اکسید سیلیسیم،  $\text{SiO}_2$ ، 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 می تواند آستانه تخریب بالایی داشته باشد [1]. در ساخت فیلترهای تداخلی در ناحیه مرئی و مادون قرمز دی اکسید سیلیسیم همراه با دی اکسید تیتانیم  $\text{TiO}_2$ ، از پرکاربردترین مواد بین اکسیدهای فلزی محسوب می شوند. به

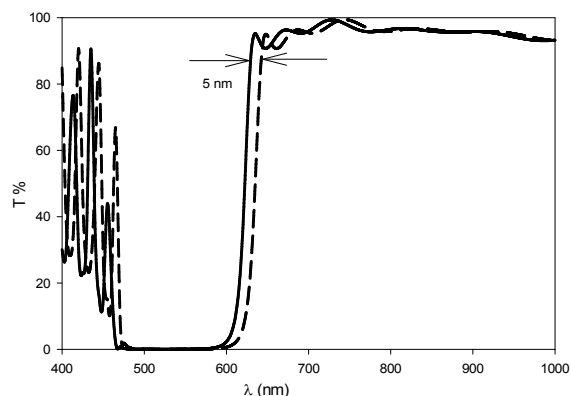


شکل ۲. موقعیت تفنگ الکترونی، منبع مقاومتی و منبع یون در درون مخزن.

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 به فیلتر بالا گذر<sup>۶</sup> نشان داده شده است که هر نمونه از بیست و یک لایه  $\text{TiO}_2$  و  $\text{SiO}_2$  بر روی یک زیر لایه شیشه‌ای تشکیل شده است. تنها، تفاوت ضخامت ۲ درصد در هر لایه باعث جابه‌جایی لبه منحنی عبور به اندازه ۵ نانومتر شده است. برای بهبود یکنواختی لایه در برخی دستگاه‌های لایه نشانی، زیر لایه بر روی یک نگهدارنده قرار می‌گیرد که این نگهدارنده درون مخزن خالصاً حرکت سیاره‌ای<sup>۷</sup> دارد. در لایه نشانی‌هایی که ما انجام داده‌ایم از سیستم سیاره‌ای استفاده شده است (شکل ۲). با وجود این، حتی در این سیستم‌ها نیز لایه نازک به طور صد در صد یکنواخت نیست [۸].

همچنان که 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 دی‌الکتریک خالص است. در مواردی که  $k$  صفر نباشد، لایه جذب دارد و ضریب جذب  $\alpha$  با رابطه



شکل ۱. جابه‌جایی منحنی عبور در یک فیلتر بالا گذر به ازای افزایش ضخامت لایه‌ها به اندازه ۲ درصد.

تداخلی استفاده کرد [۲-۴]. لایه دی‌اکسیدسیلیسیم تنش<sup>۱</sup> نسبتاً زیادی دارد و این، بعضاً منجر به خمیدگی و در نتیجه ترک خوردن لایه می‌شود. در مرجع [۵] تنش  $300 \text{ MPa}$  برای آن گزارش شده است. برای سیستم‌هایی با اپتیک دقیق، تنش زیاد لایه منجر به تغییر توزیع انرژی بر روی نمونه لایه نشانی شده می‌شود [۶]. به روش فیزیکی PVD<sup>۲</sup> لایه نازک دی‌اکسید سیلیسیم را هم می‌توان با روش تفنگ الکترونی<sup>۳</sup> و هم با روش کند و پاش<sup>۴</sup> 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<sup>۵</sup> 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 سریع‌تر لایه در مواجهه با نور لیزر پرتوان 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

۱. Stress

۲. Physical Vapor Deposition

۳. Electron Gun Technique

۴. Sputtering

۵. Ion Assistant Deposition

۶. Longwave Pass Filter

۷. Planetary

بین زیر لایه تا بوته تبخیر  $60\text{ cm}$  است. زیر لایه، می‌تواند توسط گرمکن تابشی تا دمای  $300^\circ\text{C}$  سلسیوس گرم شود و در بازه زمانی که لایه نشانی انجام می‌شود دمای زیر لایه توسط یک سیستم کنترل توان که می‌تواند توان گرمکن را تغییر دهد ثابت نگه داشته می‌شود. تفنگ الکترونی با زاویه انحراف باریکه، به اندازه  $270^\circ$  درجه و حداکثر توان  $5$  کیلو وات می‌باشد ( $V = 10\text{ kV}$  و  $I = 0.75\text{ A}$ ). باریکه الکترون به شکل یک دایره، سطح بوته را جاروب می‌کند تا سطح بوته به طور یکنواخت گرم شود. در شکل ۲ طرح‌واره‌ای از موقعیت تفنگ الکترونی، منبع یون و منبع مقاومتی نشان داده شده است.

ضخامت لایه‌ها با یک ضخامت سنج اپتیکی<sup>۴</sup> اندازه‌گیری می‌شود. زیر لایه‌ها از جنس شیشه با نام تجاری BKV می‌باشند. برای جبران کردن تجزیه شدن دی اکسید سیلیسیم 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  $300$  ولت به سمت زیر لایه شتاب دهد و جریان یون‌ها به میزان گاز اکسیژن ورودی به منبع یون بستگی دارد. اگر انرژی یون‌های اکسیژن ورودی 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 مولکول‌های اکسیژن در محیط باید آنقدر زیاد باشد تا برای تشکیل  $\text{SiO}_2$ ، ذرات  $\text{SiO}$  بخار شده توسط بوته مقاومتی کمبود اکسیژن نداشته باشند. در آزمایش‌های ما نرخ تبخیر  $\text{SiO}$  و جریان یون اکسیژن ثابت اختیار شده‌اند. به این ترتیب نسبت  $\text{O}_2$  به  $\text{SiO}$  در محیط ثابت است و تأثیر انرژی یون‌های اکسیژن مشخص می‌شود.

بعد از انجام لایه نشانی و تولید لایه  $\text{SiO}_2$ ، منحنی عبور و بازتاب هر نمونه توسط طیف‌سنج نور 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

$\alpha = 2\pi k / \lambda$  تعریف می‌شود که  $\lambda$  طول موج است و نسبت شدت نور عبور کرده به شدت نور فرودی از رابطه  $I/I_0 = e^{-\alpha t}$  به دست می‌آید که در آن  $t$  ضخامت لایه می‌باشد. لایه‌های 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 دی‌اکسیدسیلیسیم به دو روش تولید شده است:

**روش اول:** دی‌اکسیدسیلیسیم،  $\text{SiO}_2$  در بوته مسی تفنگ الکترونی قرار داده می‌شود و هم‌زمان با تبخیر آن گاز اکسیژن به محیط تزریق می‌شود.

**روش دوم:** اکسید سیلیسیم،  $\text{SiO}$ ، در بوته مقاومتی قرار داده می‌شود و در حین تبخیر آن، زیر لایه توسط منبع یون<sup>۱</sup> بمباران می‌شود. گازی که منبع یون برای تولید یون به کار می‌گیرد گاز اکسیژن است و به این ترتیب در روش دوم هم اکسیژن در محیط وجود دارد و هم  $\text{SiO}$ ، که توسط تبخیر مقاومتی ایجاد شده است. ترکیب اکسیژن و  $\text{SiO}$  می‌تواند بر روی زیر لایه، لایه  $\text{SiO}_2$  را تشکیل دهند. ضریب شکست و ضخامت لایه‌های تولید شده با حل معادله عبور و بازتاب به روش عددی محاسبه شده‌اند. با اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی طیف عبور، میزان یکنواختی لایه و چگالی تراکم<sup>۲</sup> 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 خلاً از یک پمپ توربومولکولار و یک پمپ روتاری تشکیل شده است. مخزن با این پمپ‌ها، حداکثر تا فشار  $1 \times 10^{-6}$  Torr تخلیه می‌شود. ماده دی‌اکسیدسیلیسیم که به شکل دانه‌ای<sup>۳</sup> است، روی بوته مسی قرار داده می‌شود. فاصله

۱. Ion source

۲. Packing density

۳. Granule

۴. Optical monitoring

در حدی که آب به وضوح بر روی نمونه دیده نشود، دو باره منحنی عبور و بازتاب نمونه توسط طیف‌سنج 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 مولکول‌های آب به درون آنها جابه‌جا می‌شوند. میزان جابه‌جایی 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 به دست می‌دهند کمک می‌گیریم [۱۱، ۱۲]

$$T = \frac{16n_0 n_s (n^2 + k^2)}{E \exp \beta + F \exp(-\beta) + 2G \cos \gamma + 4H \sin \gamma} \quad (1)$$

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

که  $A, B, C, D, E, F, G, H$  و  $\beta, \gamma$  به ترتیب عبارتند از:

$$A = [(n - n_0)^2 + k^2][(n + n_0)^2 + k^2]$$

$$B = [(n + n_0)^2 + k^2][(n - n_0)^2 + k^2]$$

$$C = (n^2 + k^2)(n_0^2 + n_s^2) - (n^2 + k^2)^2 - n_0^2 n_s^2 - 4n_0 n_s k^2$$

$$D = k(n_0 - n_s)(n^2 + k^2 + n_0 n_s)$$

$$E = [(n + n_0)^2 + k^2][(n + n_s)^2 + k^2]$$

$$F = [(n - n_0)^2 + k^2][(n - n_s)^2 + k^2]$$

$$H = k(n_0 - n_s)(n^2 + k^2 - n_0 n_s)$$

$$G = [(n^2 + k^2)(n_0^2 + n_s^2) - (n^2 + k^2)^2 - n_0^2 n_s^2 + 4n_0 n_s k^2]$$

$$\beta = 4\pi k d / \lambda$$

$$\gamma = 4\pi n d / \lambda$$

در دو رابطه آخر  $d$ ، و  $\lambda$  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 طیف‌سنج

اندازه‌گیری می‌شوند. در دو معادله فوق ضریب شکست زیر لایه (شیشه)  $n_s = 1/52$  و هوا،  $n_0 = 1$  مقادیر معلوم می‌باشند. به این ترتیب سه مجهول در معادلات (۱) و (۲) وجود دارند که به ترتیب عبارتند از:  $n$  ضریب شکست لایه،  $k$  ضریب خاموشی لایه و  $d$  ضخامت لایه. اگر چه مطابق با آنچه در بخش قبلی بیان شد، ضخامت اپتیکی لایه (حاصل ضرب 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 به دست 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 پاد فاز<sup>۱</sup> باشند. در این حالت ضخامت لایه از رابطه زیر پیروی می‌کند [۱۳]

$$2nd = m \frac{\lambda}{4} \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

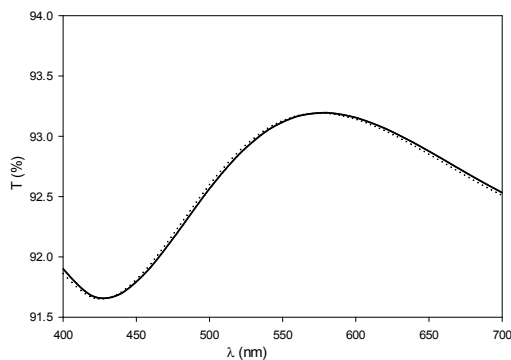
که  $n$  ضریب شکست لایه و  $d$  ضخامت لایه است. با ضخامت سنج اپتیکی، مضراب صحیحی از نصف طول موج را بر روی هر زیر لایه، لایه نشانی می‌کنیم، در نتیجه از رابطه (۳) ضخامت فیزیکی  $d$  را با جایگزینی یک مقدار تقریبی برای  $n$  به دست می‌آوریم. این مقدار تخمینی را می‌توان به عنوان جواب اولیه، در دو معادله (۱) و (۲) به کار برد. بنابراین ابتدا با جایگزینی مقدار ضخامت تخمینی  $d$  در معادلات مزبور، مقادیر  $n$  و  $k$  را به دست 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

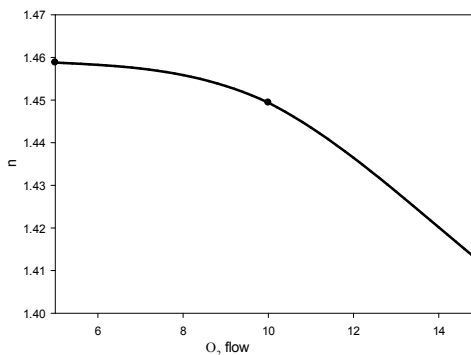
۱. Antiphase

جدول ۱. مقادیر شار اکسیژن و ضریب شکست.

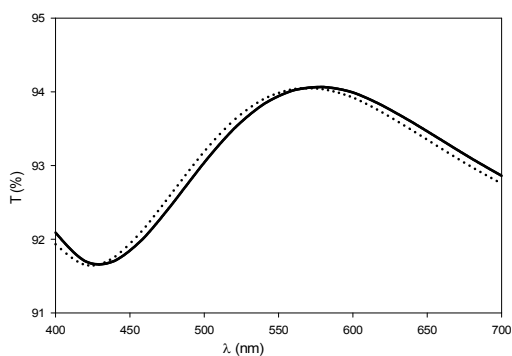
No.	$\text{O}_2$ (SCCM)	n در ۵۷۵ nm
۱	۵	۱٫۴۵۸۸
۲	۱۰	۱٫۴۴۹۴
۳	۱۵	۱٫۴۱۱۸



شکل ۴. جابه‌جایی منحنی عبور نمونه اول جدول ۱.



شکل ۳. تغییرات ضریب شکست  $\text{SiO}_2$  بر حسب شار اکسیژن.



شکل ۵. جابه‌جایی منحنی عبور نمونه سوم جدول ۱.

اینرو حل آنها به طور تحلیلی ممکن نیست. برای حل آنها ما از یک کد که به روش تند ترین شیب<sup>۱</sup> 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 به دست 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 سیلیسیم 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.

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

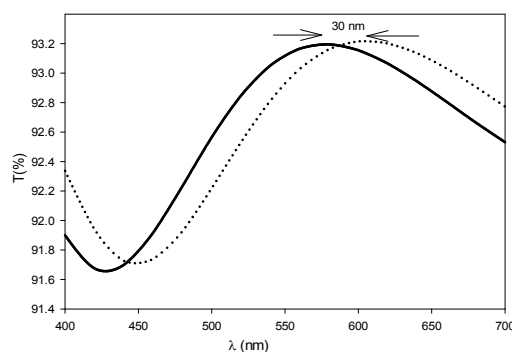
آنها را صفر انگاشت. میزان تغییرات ضریب شکست بر حسب شار اکسیژن در شکل ۳ رسم شده است.

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

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

اگر چگالی تراکم لایه صد در صد نباشد، خلل و فرج‌های میکروسکوپی در لایه وجود دارد و آب می‌تواند در این خلل و

۱. Steepest descent



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

اختلاف ضخامت ده نانومتری معادل تغییر نسبی ۳/۵ درصدی ضخامت می‌باشد. در شکل ۱، دیدیم که تغییر ضخامت به اندازه دو درصد باعث جابه‌جایی لبه طیف به اندازه پنج نانو متر شد. بنابراین تغییر نسبی ۳/۵ درصد در ضخامت هر لایه در ساخت یک فیلتر بالاگذر، نظیر شکل ۱، باعث جابه‌جایی بیشتر طیف می‌شود. ناپیکنواخت بودن لایه را می‌توان به شکل توزیع بخار  $\text{SiO}_2$  نسبت داد.

**نتایج روش دوم:** در این روش  $\text{SiO}_2$  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  $300 \text{ eV}$  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  $\text{SiO}_2$ ، کمبود اکسیژن وجود داشته باشد. در دستگاه لایه نشانی ما، وقتی انرژی یون‌های اکسیژن بیش از  $80 \text{ eV}$  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 مؤثر یون‌ها هنگام برخورد به سطح زیر لایه کاهش می‌یابد. مسافتی که یک مولکول به طور متوسط قبل از هر برخورد طی می‌کند از رابطه زیر به دست می‌آید (مسافت آزاد میانگین):

فرج نفوذ کند و در نتیجه باعث جابه‌جایی طیف لایه شود. میزان جابه‌جایی منحنی عبور در شکل ۵، قابل توجه است در حالی که جابه‌جایی 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].

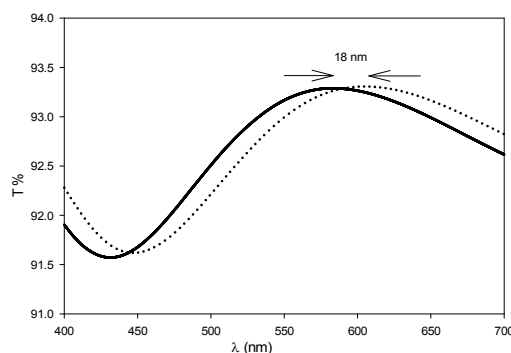
برای ارزیابی میزان یکنواختی لایه از نظر ضخامت، دو نقطه متفاوت را بر روی نمونه انتخاب می‌کنیم و نمونه را هر بار طوری بر روی نگهدارنده<sup>۱</sup> آن در طیف‌سنج نور قرار می‌دهیم که طیف عبور از دو نقطه مزبور اندازه‌گیری شود. اگر طیف عبور هر دو نقطه کاملاً بر هم منطبق باشند، یکنواختی لایه صد در صد می‌باشد. 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. با توجه به رابطه (۳) می‌توان مقدار اختلاف ضخامت را در دو نقطه مزبور محاسبه کرد

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

با توجه به شکل ۶،  $\delta\lambda = 30 \text{ nm}$  است و در نتیجه به ازای  $n = 1/4588$  و  $m = 2$  مقدار  $\delta d \approx 10 \text{ nm}$  به دست می‌آید. این

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

No.	E(eV)	I(A)	n در ۵۷۵ nm	k در ۵۷۵ nm
۱	۴۰	۴	۱٫۴۵۳۴	۰٫۰۰۰۰۴
۲	۶۰	۴	۱٫۴۵۶۷	۰٫۰۰۰۰۳۲
۳	۸۰	۴	۱٫۴۶۹۹	۰٫۰۰۰۰۳۸



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

تغییرات  $n$  و  $k$  شده است. همچنان که مشاهده می‌شود در تمام نمونه‌ها جذب وجود دارد (مقدار  $k$  صفر نیست). اما در نمونه ۱، مقدار جذب یک مرتبه کوچک‌تر از دو نمونه دیگر است. در نتیجه با روش دوم می‌توان لایه  $\text{SiO}_2$  با جذب ناچیز تولید کرد. وجود جذب در یک لایه امری مضر محسوب می‌شود و باعث تخریب سریع‌تر لایه می‌شود. بخصوص وقتی قرار است لایه تحت تابش یک لیزر پر توان به کار گرفته شود. همان طوری که در شکل ۶ ملاحظه شد وقتی لایه  $\text{SiO}_2$  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  $\text{SiO}_2$  به کمک منبع یون و تبخیر  $\text{SiO}$  توسط منبع مقاومتی تولید می‌شود، لایه به مراتب از نظر ضخامت یکنواخت‌تر است: در شکل ۷، طیف عبوری از دو نقطه مشابه با اندازه‌گیری که به شکل ۶ منجر شد را رسم کرده‌ایم. به راحتی می‌توان دید که جابه‌جایی منحنی‌ها در مقایسه با شکل ۶ کمتر است. به کمک رابطه (۴) می‌توان اختلاف ضخامت را محاسبه کرد که  $\delta d \approx 6 \text{ nm}$  به دست می‌آید.

$$d_{mfp} = \frac{0.05}{P} \quad (5)$$

در رابطه فوق  $P$  بر حسب Torr و  $d_{mfp}$  بر حسب سانتی متر می‌باشد. از طرفی، بنا بر معادله بقا<sup>۱</sup> در ترمودینامیک تعداد مولکول‌های  $N$  که مسافت  $x$  را بدون برخورد طی می‌کنند برابر است با  $N/N_0 = \exp(-x/d_{mfp})$ ، که  $N_0$  تعداد کل مولکول‌ها می‌باشد. بنابراین انرژی یون‌های اکسیژن در اثر برخورد کاهش می‌یابد و به عنوان مثال وقتی ولتاژ منبع یون روی عدد  $80 \text{ eV}$  قرار داده شده است، انرژی مؤثر در هنگام برخورد با سطح زیر لایه کمتر از  $80 \text{ eV}$  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  $\text{SiO}$  و تعداد  $\text{O}_2$  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

۱. Survival equation

## ۴. نتیجه گیری

در این مقاله لایه نازک دی‌اکسید سیلیسیم،  $\text{SiO}_2$ ، بر روی زیر لایه از جنس شیشه به دو روش تولید شد. در روش اول،  $\text{SiO}_2$  مستقیماً توسط باریکه الکترون در خلأ تبخیر شد. در روش دوم منواکسید سیلیسیم،  $\text{SiO}$  توسط یک منبع مقاومتی تبخیر شد و به طور هم‌زمان زیرلایه با یون‌های اکسیژن توسط منبع یون بمباران شد. ضخامت لایه‌ها مضرب‌های 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.

## مراجع

1. R Chow and N Tsujimoto, *Appl. Opt.* **35**, (1996) 5095 Society of America, (2004), paper WD1.
2. F Rainer, H W Lowdermilk, D Milam, C K Carniglia, T Tuttle Hart, and T L Lichtenstein, *Appl. Opt.* **24** (1985) 496.
3. P Baumeister and O Arnon, *Appl. Opt.* **16** (1977) 439.
4. F Rainer, D Milam, and W H Lowdermilk, *NBS Spec. Publ.* **638** (1981) 339.
5. E Kobeda and E Irene, *J. Vac. Sci. Technol. B* **4** (1986) 720.
6. K Chen, X Zhang and S Lin, *Thin Solid Films* **434** (2003) 190.
7. M Alvisia, G Nunziob, M Perroneb, A Rizzoc, S Scaglione, and L Vasanelli, *Thin Solid Films* **338** (1999) 269.
8. www.eddyco.com
9. P J Martin and R P Netterfield, *Appl. Opt.* **24**, (1985) 1732.
10. L Dumas, E Quesnel, F Pierre, and F Bertin, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **20**, (2002) 102.
11. M H Fran Combe and R W Hoffman, *Phys. Thin Films*, **6**, (1971) 157.
12. S M El-Sayed, *Mater. Chem. Phys.* **78** (2002) 262.
13. J M Ortega and W C Rheinboldt, "Iterative solution of nonlinear equations in several variables", Academic Press, New York, **572** (1970).
- A. Macleod, "Thin Film Optical Filtes", Fourth Edition, CRC Press (2004).
14. E Allgower and K Georg, *Numerical continuation methods: an introduction*, Springer- Verlag, New York, (1990) 388.
15. D Faires and D Burden, "Numerical Methods" 3 Edition Brooks Cole (2002).
16. K Kinoshita and M Nishibori, *Journal of Vacuum Science and Technology* **6** (1969) 730.