

خصوصیات ساختاری و اپتیکی فیلم نیتريد سيليكون توليد شده بر روی سيليكون توسط فرآيند کاشت يون با انرژی کم

داود درانیان*

مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پروانه آزادفر

گروه فیزیک، دانشکده علوم، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

امیرحسین ساری

مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۸۷/۵/۱۳

تاریخ پذیرش: ۸۸/۶/۲۱

چکیده

مقدمه: تکنولوژی وارد کردن ناخالصی، یکی از فرآیندهای بسیار مهم برای نیمه رساناها به شمار می آید که از آن در ساختن وسایل و تجهیزات الکترونیکی مدرن استفاده می شود. در بهبود عملکرد وسایل ساخته شده از سیلیکون در مدارهای مجتمع و همچنین نیاز به هر چه کوچک تر شدن سایز این وسایل، روش کاشت یون مورد توجه بوده است. زیرا در روش کاشت یون مقدار ناخالصی و مکان ناخالصی در سیلیکون دقیقاً مشخص می شود و امکان تکرار پذیری آن فراهم بوده و در مقایسه با روشهای دیگر روش قابل کنترلی است. در سال های اخیر توجه زیادی به ترکیبات نیتريدی می شود که از این بین می توان به برخی از ترکیبات نیتريدی از قبیل GaN و AlN و Si_3N_4 اشاره کرد که در صنعت کار برد وسیعی داشته و بررسی بر روی آنها از لحاظ تئوری و تجربی ادامه دارد.

هدف: در این تحقیق سطح ویفر سیلیکون در دزهای مختلف تحت بمباران یون های نیتروژن قرار گرفته و نتایج حاصل بررسی شده اند. هدف ما از انجام این تحقیق به دست آوردن مشخصه های ساختاری، الکتریکی و اپتیکی نیتريد سیلیکون توسط فرآیند کاشت یون بوده است. نکته برجسته این تحقیق انرژی بسیار پایین یون های نیتروژن بکار برده شده جهت تولید نیتريد سیلیکون بوده است.

*عهده دار مکاتبات: doran@srbiau.ac.ir

روش بررسی: نمونه های تک کریستالی سيليكون نوع p به عنوان نمونه خام مورد استفاده قرار گرفتند. این نمونه ها با یون نیتروژن با انرژی ۲۹ کیلو الکترون ولت و در چگالی جریان $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ در دزهای 10^{16} تا 10^{18} یون بر سانتی متر مربع بمباران شدند. برای شناسایی و مطالعه نمونه ها از سیستم طیف سنجی عبوری و بازتابشی، تصاویر میکروسکپ نیروی اتمی، سیستم پراش اشعه ایکس و سیستم چهار پروب برای اندازه گیری مقاومت سطحی استفاده شد.

نتایج: نتایج حاصله از الگوهای XRD تأیید می کند که در این مقدار انرژی پرتو یونی، فرآیند کاشت ثابت شبکه را تغییر نمی دهد و این که بر ساختار مکعبی سيليكون ساختار ارتورمبیک نیتريد سيليكون ساخته شد. افزایش دز پرتو یونی، میزان ناصافی سطح را افزایش داد و همچنین مقاومت ویژه سطوح نمونه های کاشته شده نیز به طور قابل توجهی تحت تأثیر فرآیند کاشت یون قرار گرفته و افزایشی در حدود ۵۰٪ در پی داشت. نیز کاشت یون نیتروژن باعث تولید ترازهای تخریب در سيليكون شده و گاف انرژی را افزایش داد.

نتیجه گیری: نتایج حاصله تایید می کنند که برای ساخت لایه نانومتری نیتريد سيليكون ضرورتاً نیازی به یونهای بسیار پرانرژی نیست. همانگونه که در این کار نیز نشان داده شده است با انرژی در حدود ۳۰ کیلو الکترون ولت نیز می توان به لایه ای از نیتريد سيليكون دست یافت. مطالعه این لایه نشان می دهد که نیتريد سيليكون تهیه شده به این روش تمام شرایط استفاده در صنایع نیمه هادی را دارا می باشد.

واژه های کلیدی: نیمه هادی، کاشت یون، پراش اشعه ایکس، زبری سطح، مقاومت سطحی.

مقدمه

تکنولوژی وارد کردن ناخالصی، یکی از فرآیندهای بسیار مهم برای نیمه رساناها به شمار می آید که از آن در ساختن وسایل و تجهیزات الکترونیکی مدرن استفاده می شود. اهمیت وارد کردن ناخالصی در کنترل کردن خصوصیات الکتریکی و اپتیکی نیمه رساناها به نحوی است که در صنعت مورد استفاده قرار گیرند. سيليكون خالص یک نیمه رسانای ذاتی با گپ انرژی غیر مستقیم ۱/۱۲ eV در دمای اتاق بوده و حامل های ذاتی آن در این دما برابر با $10^{16} \times 1/45$ در سانتیمتر مکعب است. به طور معمول از روش کاشت یون جهت ایجاد کردن ناخالصی در سيليكون استفاده می شود. در بهبود عملکرد وسایل ساخته شده از سيليكون در مدارهای مجتمع و همچنین نیاز به هر چه کوچک تر شدن سایز این وسایل، روش کاشت یون مورد توجه بوده است. زیرا در روش کاشت یون مقدار ناخالصی و مکان ناخالصی در سيليكون دقیقاً مشخص می شود و امکان تکرار پذیری آن فراهم بوده و در مقایسه با روشهای دیگر روش قابل کنترلی است. در سال های اخیر توجه زیادی به ترکیبات نیتريدی می شود که از این بین می توان به برخی از ترکیبات نیتريدی از قبیل Si_3N_4 و GaN و AlN اشاره کرد که در صنعت کار برد وسیعی داشته و بررسی بر روی آنها از لحاظ تئوری و تجربی ادامه دارد.^(۳-۱)

نیتريد دار کردن به روش کاشت یون نسبت به روش نفوذ (دیفیوژن) مزایایی را در پی دارد که می توان به حضور نداشتن ناخالصی های نامطلوب، کنترل کردن ترکیب ایجاد شده و همچنین کنترل کردن میزان ضخامت آن در

جدول ۱- شرایط آزمایشی نمونه های مختلف.

Sample	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
Dose ($\times 10^{16}$ ion/cm ²)	Subs.	۱	۴	۸	۱۰	۳۰	۵۰	۸۰	۱۰۰
Time (s)	Subs.	۱۶	۶۴	۱۲۸	۱۶۰	۴۸۰	۸۰۰	۱۲۸۰	۱۶۰۰
Temp. (C ^o)	Subs.	۴۱	۱۰۴	۱۸۴	۲۳۳	۲۵۴	۴۱۰	۴۱۰	۴۱۰
Vacc.(10 ⁻³ pa)	Subs.	۴	۴	۴	۳	۱	۴	۴	۱

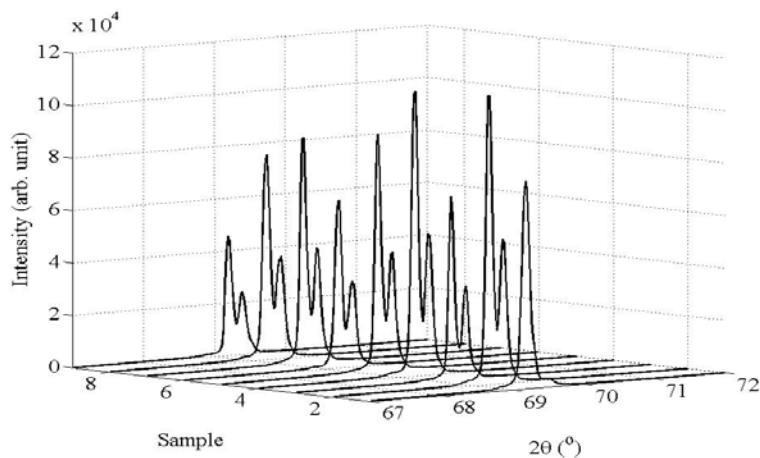
طول فرآیند کاشت اشاره نمود. از ترکیبات نیتريدی ذکر شده در بالا، Si₃N₄ برای استفاده ی متنوع در صنعت نیمه رسانا بیش تر مورد توجه قرار می گیرد. اهمیت این ترکیب نیتريدی بالا بودن ثابت دی الکتریک آن، سختی آن در برابر تابش دهی، توانایی بالای آن در دماهای بالا، مقاومت خوب در برابر شوک های حرارتی و همچنین مقاومت بسیار عالی آن در برابر خوردگی و فرسایش است. بنابراین جهت استفاده از این ماده در مقیاس صحیح در صنعت باید به شناسایی آن از لحاظ ساختاری و خصوصیات الکتریکی پرداخته شود. شماری از روش ها، سعی در تولید این ماده داشته و مشخصه های آن را مطالعه می نماید که می توان به روش انباشت شیمیایی بخار، روش لایه نشانی با پالس لیزر و کاشت یون اشاره کرد.

در این تحقیق سطح ویفر سیلیکون در دزهای مختلف تحت بمباران یون های نیتروژن قرار گرفته و نتایج حاصل بررسی شده اند. هدف ما از انجام این تحقیق به دست آوردن مشخصه های ساختاری، الکتریکی و اپتیکی نیتريد سیلیکون توسط فرآیند کاشت یون بوده است. نکته برجسته این تحقیق انرژی بسیار پایین یون های نیتروژن بکار برده شده جهت تولید نیتريد سیلیکون بوده است.

مواد و روشها

نمونه های تک کریستالی سیلیکون نوع p با جهت گیری $\langle 100 \rangle$ و در ابعاد ۱×۱ سانتیمتر مربع و ضخامت ۰/۵۰۹ میلیمتر و مقاومت ویژه ی ۶/۸۷ Ω.cm و مقاومت سطح \square ۱۳۵/۷ Ω به عنوان نمونه خام مورد استفاده قرار گرفتند. نمونه ها به وسیله ی استن و الکل در دستگاه آلتراسونیک (حمام فرا صوت) قبل از فرآیند کاشت یون تمیز شدند. بعد از تمیز کردن، نمونه ها تحت تابش پرتو یون نیتروژن با انرژی ۲۹ کیلو الکترون ولت و در چگالی جریان ۱۰۰ μA/cm² در دزهای ۱۰^{۱۶} تا ۱۰^{۱۸} یون بر سانتی مترمربع قرار گرفتند. این کار توسط دستگاه کاشت یون واقع در مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما انجام گرفت. فشار محفظه کاشت در حدود Pa ۴×۱۰^{-۳} ثابت ولی دمای نمونه ها از ۴۱ C تا ۴۱۰ C در طول فرآیند کاشت (بسته به دز پرتو یونی) تغییر یافت. پرتو یونی با سطح مقطع بیضوی در اندازه ی ۱۱×۲۵ سانتیمتر می باشد که انتظار می رود طور یکنواخت سطح نمونه ها را تحت پوشش قرار دهد. پارامترهای کاشت در جدول (۱) خلاصه شده اند.

از آنالیزهای تشخیصی متفاوتی برای تعیین خصوصیات نمونه ها بعد از کاشت استفاده شد. تغییر در طیف عبوری و انعکاسی امواج الکترومغناطیسی در بازه ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ نانومتر به وسیله ی طیف سنج Varian Cary-500 اندازه گیری شد. توپوگرافی سطح و میزان ناصافی آنها بوسیله میکروسکپ نیروی اتمی Auto Probe cp اندازه گیری شد و به منظور تعیین ترکیبات فاز، ساختمان بلوری و صفحات بلوری از دستگاه طیف سنج اشعه ایکس



شکل ۱- تغییرات پیک های XRD نمونه ها بصورت تابعی از زاویه پراکندگی اشعه X.

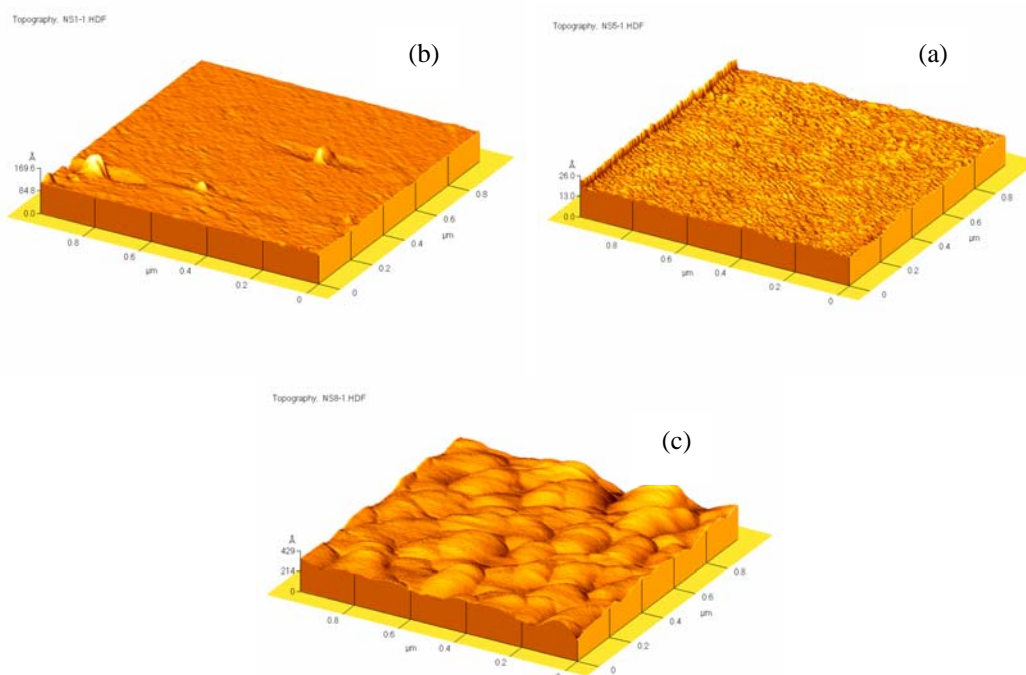
XRD-PERT و پرتو تابشی $CuK\alpha$ استفاده شد. همچنین چهار پروب FPP5000 Mille مورد استفاده قرار گرفت تا مقاومت ویژه ی سطح نمونه ها اندازه گیری شود. تجهیزات ذکر شده فوق همگی در آزمایشگاه های اندازه گیری مختلف مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما می باشند.

نتایج و بحث

آنالیز XRD و AFM

الگوهای XRD نمونه ی خام و نمونه های کاشته شده در شکل (۱) نشان داده شده است. قله منحنی مربوط به سیلیکون تک کریستالی در مکان $2\theta = 69/19^\circ$ و صفحه ی شرکت کننده در پراش طبق کارت استاندارد شماره ۰۵-۰۵۶۵ مربوط به صفحات سیلیکون $\langle 400 \rangle$ بوده است. همان طور که می توان دید در نمونه های کاشته شده قله دیگری در مکان $2\theta = 69/39^\circ$ وجود دارد که نمایانگر صفحه ی بازتابنده ی $\langle 832 \rangle$ است. مقادیر زوایای براگ بازتابشی برای هر دو قله در تمامی نمونه ها مشابه هستند که بیانگر تغییر نکردن پارامترهای شبکه با میزان دز کاشته شده است. لذا می توان نتیجه گرفت که یون های نیتروژن با این مقدار انرژی در فضاهای خالی شبکه قرار می گیرند. بدون در نظر گرفتن نمونه ی سوم، شدت قله منحنی بازتابش پرتو ایکس از سطح نیتريد سيليكون و همچنین پهنای آن در نصف مقدار ماکزیمم (FWHM) با افزایش دز کاهش می یابند. این موضوع تایید می کند که ساختار فیلم های شکل گیری شده در دز های بالاتر به دلیل جابه جایی اتم ها (تغییر همسایه های اول) و یا شکسته شدن پیوندها در اثر یون های بیشتر نیتروژن دارای نظم کمتری است.

کاهش یافتن FWHM طبق رابطه ی شرر نشان دهنده افزایش اندازه ی دانه ها است. چرا که در اثر دمایی بیشتر (به خصوص برای سه نمونه آخر) نقاط تماس بین ذرات بیشتر می شود.

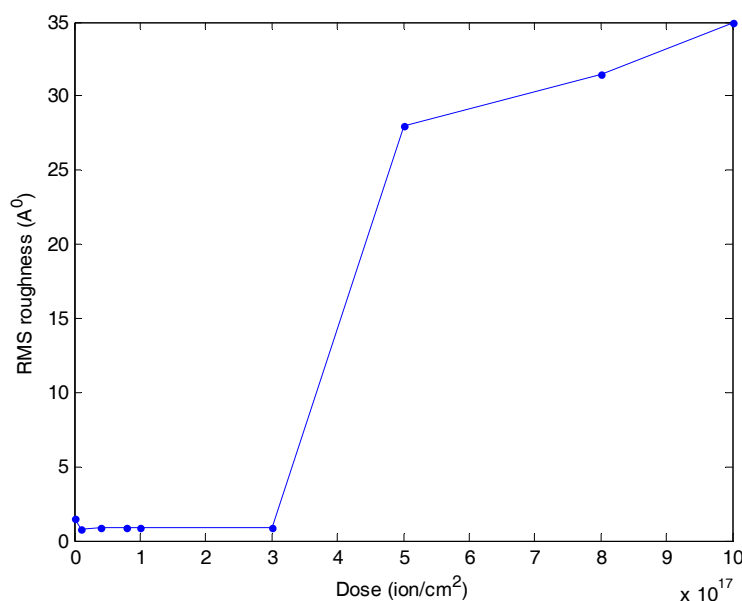


شکل ۲- عکسهای AFM از نمونه خام (a)، نمونه ۵ (b) و نمونه ۹ (c).

در تمامی نمونه ها دو قله ناشی از ساختار SiO_2 با ساختار ارتورمبیک در زوایای $2\theta = 29/62^\circ$ و $2\theta = 33/06^\circ$ را می توان دید که در شکل (۱) نشان داده نشده اند.

نتایج XRD بر این موضوع دلالت دارد که در این محدوده انرژی ساختار نیتريد سيليكون به دز يون نيتروژن کاشته شده وابسته نیست و همچنین جهت ساختاری Si_3N_4 برای تمامی نمونه ها مشابه است. همچنین فاز و جهت گیری ساختار SiO_2 که بر روی نمونه ی خام وجود داشت با شکل گیری Si_3N_4 تغییر نمی کند.

تصاویر حاصله از AFM برای نمونه ی خام در کنار نمونه های ۵ و ۹ در شکل (۲) و همچنین تغییرات زبری RMS بر اساس دز يون در شکل (۳) نشان داده شده اند. دو نوع ساختار توپوگرافی کلی به واسطه ی کاشت شکل گرفته اند. در شش نمونه ی اول تا دز $3 \times 10^{17} \text{ ion/cm}^2$ میزان ناصافی به طور قابل چشمگیری تغییر نمی کند. در این نمونه ها ستون های کوچکی از نیتريد سيليكون شکل گرفته اند. در صورتی که با افزایش دز پرتو يونی به بیش از 3×10^{17} ناگهان میزان ناصافی سطح در حدود ده مرتبه افزایش می یابد. در این نمونه ها ساختاری کلوخه ای، (همان طور که در شکل برای نمونه ی ۹ دیده می شود) به روی زیر لایه تشکیل شده است. مکانیسم پراکندگی سطح به دلیل شمار بسیار زیاد يون ها و در پی آن دمای بالای نمونه ها در فرآیند کاشت می تواند باعث این تغییرات باشد.



شکل ۳- تغییرات زبری سطح نمونه های کاشت شده سيليكون بصورت تابعی از دز کاشت.

مقاومت ویژه

Si_3N_4 یک دی الکتریک خوب به شمار می آید و ثابت دی الکتریک آن از ثابت دی الکتریک SiO_2 بیشتر است. اگر چه هنوز SiO_2 بعنوان لایه عایق در وسایل الکتریکی بکار می رود. تغییر در اندازه ی مقاومت ویژه نمونه ها بر حسب دز اندازه گیری شده توسط دستگاه چهار پروب در شکل (۴) ترسیم شده است. مقاومت ویژه سطح سيليكون خالص $135/7 \Omega/\square$ است و تا $180/4 \Omega/\square$ برای نمونه ی ۹ افزایش می یابد. تغییر قابل توجهی در مقاومت ویژه در دز بیشتر از 10^{17} ion/cm^2 وجود دارد.

اگر چه عموماً افزایش ناخالصی به نیمه رساناها مقاومت ویژه الکتریکی آنها را نسبت به نیمه رسانای خالص کاهش می دهد، اما در این محدوده انرژی کم یونها چنین اتفاقی نادر است.

افزایش بسیار سریع مقاومت ویژه با تغییر دز یون نیتروژن را می توان به شکل گیری ساختار Si_3N_4 و نیز افزایش نقوص کریستالی بر اثر بمباران یونی نسبت داد. همان طور که قبلاً اشاره شد یون های نیتروژن فضاهای بین شبکه ای را در شبکه ی سيليكون اشغال کرده و تشکیل فاز Si_3N_4 را می دهند. این موضوع پراکندگی حامل های بار و در نتیجه افزایش مقاومت ویژه را در پی خواهد داشت.

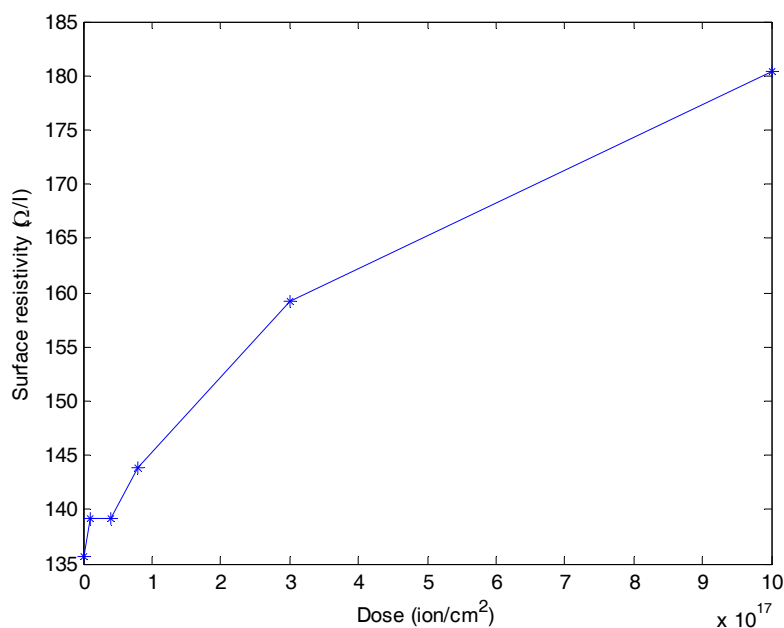
خصوصیات اپتیکی

طیف های عبور و بازتابش نمونه ها در گستره ی طول موجی فرا بنفش تا مادون قرمز اندازه گیری شدند. برای طول موجهای تابشی کوچکتر از 1000 نانومتر عبور نمونه ها صفر است در صورتی که در گستره ی 1000 تا 1500 نانو متر با افزایش دز، عبور هفت نمونه ی اول افزایش می یابد. البته عبور سه نمونه ی اول دارای عبوری کمتر نسبت به نمونه ی خام می باشد. ماکزیمم مقدار عبور در این گستره ی طول موجی برای نمونه ی ۷ بوده و با افزایش دز عبور دو نمونه ی آخر کاهش می یابد. کاهش عبور دو نمونه ی آخر به دلیل افزایش نقایص بلوری

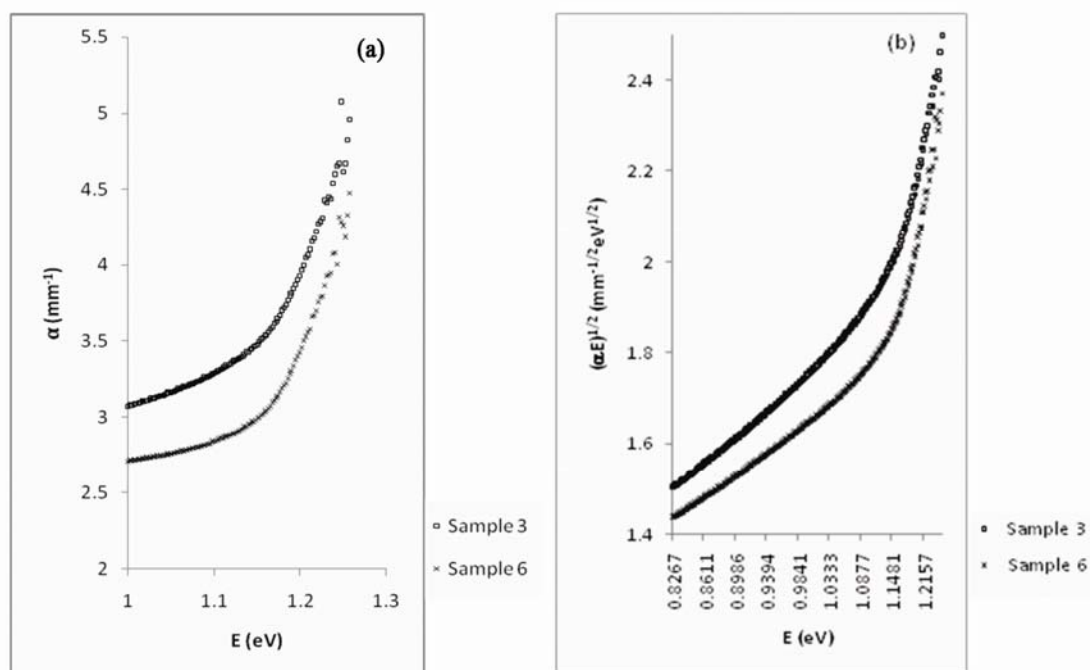
است. همچنین طیف بازتابش سطوح نمونه ها ۶۰٪ کاهش را در گستره ی ۲۰۰ تا ۱۵۰۰ نانومتر از طول موج نشان می دهد. این را می توان با در نظر گرفتن تأثیر ناصافی سطح توضیح داد. چرا که تغییرات ناصافی عکس تغییرات بازتابش سطوح است. با استفاده از نتایج عبور و بازتابش، ضریب جذب α در شکل (۵a) فقط برای نمونه های ۳ و ۶ نشان داده شده است. این پارامتر مهم اپتیکی با استفاده از رابطه ی ^(۴)

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{(1-R)^2}{T} \right] \quad (1)$$

محاسبه شد که در آن T ضریب عبوری، R ضریب بازتابش و d ضخامت نمونه هستند.



شکل ۴- مقاومت سطح نمونه ها اندازه گرفته شده با دستگاه چهار پروب.



شکل ۵- ضریب جذب نمونه‌ها (a)، و وابستگی $E - (\alpha E)^{1/2}$ نمونه ۳ و ۶ جهت محاسبه انرژی گاف (b).

از شکل (۵a) آشکار است که ضریب جذب نمونه‌ها با افزایش انرژی فوتون در گستره ی ۱/۱۵-۱/۲۵ الکترون ولت شدیداً افزایش می‌یابد. همچنین همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، ضریب جذب برای فوتون‌هایی با انرژی پایین صفر نیست که می‌تواند به دلیل وجود آکسیتون‌ها باشد. به منظور به دست آوردن گاف انرژی نمونه‌های کاشته شده، نمودار α بر حسب E ترسیم شده در شکل (۵a) مورد بررسی قرار گرفت. رابطه ی ضریب جذب و انرژی گاف به صورت زیر است:

$$\alpha E = B(E - E_g)^p \quad (2)$$

در این رابطه ثابتی است که بر احتمال گذار وابسته است و P عددی است که نوع فرآیند اپتیکی را مشخص می‌کند. قرار دادن $P=2$ با گذار غیر مستقیم در نیمه رساناها مطابقت دارد. رسم $(\alpha E)^{1/2}$ بر حسب E در شکل (۵b) نشان داده شده است. در این نمودار با برون‌یابی (نشان داده شده با خط چین در شکل) تا مقدار $(\alpha E)^{1/2} = 0$ می‌توان میزان گاف انرژی را به دست آورد.

مقادیر به دست آمده نشان می‌دهد که یون‌های نیتروژن با انرژی ۲۹ keV و دز بین 10^{16} تا 10^{18} یون بر سانتیمتر مربع می‌تواند ترازهای اختلالی انرژی در گاف سیلیکون ایجاد کرده و باعث تغییر در گاف انرژی سیلیکون شوند. همان‌طور که در جدول (۲) آورده شده گاف انرژی از ۱/۰۸ الکترون ولت برای نمونه ی کاشته نشده تا ۱/۰۵۲ الکترون ولت برای نمونه ی ۲ کاهش یافته است. با افزایش دز از نمونه ی ۲ تا ۵ گاف انرژی تا ۱/۱۵ الکترون ولت (بیشترین مقدار) افزایش می‌یابد که ناشی از ایجاد ترازهای اختلالی انرژی در ساختار سیلیکون است.

جدول ۲- انرژی گاف نمونه ها

Sample	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
Band gap energy (eV)	۱/۰۸۰	۱/۰۵۲	۱/۰۷۰	۱/۰۸۲	۱/۱۵۰	۱/۰۹۷	۱/۰۹۹	۱/۰۹۵	۱/۰۹۹

نتیجه گیری

در این تحقیق فیلم Si_3N_4 با بمباران کردن سطح سیلیکون توسط یون های نیتروژن با انرژی ۲۹ keV در دزهای 10^{16} تا 10^{18} ion/cm² تولید شد. نتایج حاصله از الگوهای XRD تأیید می کند که در این مقدار انرژی پرتو یونی، فرآیند کاشت ثابت شبکه را تغییر نمی دهد و این که بر ساختار مکعبی سیلیکون ساختار ارتورمبیک نیتريد سیلیکون ساخته شده است. افزایش دز پرتو یونی، میزان ناصافی سطح را افزایش داد و همچنین مقاومت ویژه سطوح نمونه های کاشته شده نیز به طور قابل توجهی تحت تأثیر فرآیند کاشت یون قرار گرفته و افزایشی در حدود ۵۰٪ در پی دارند. کاشت یون نیتروژن باعث تولید ترازهای تخریب در سیلیکون شده و گاف انرژی را افزایش میدهد.

نتایج حاصله تایید می کنند که برای ساخت لایه نانومتری نیتريد سیلیکون ضرورتاً نیازی به یونهای بسیار پرانرژی نیست. همانگونه که در این کار نیز نشان داده شده است با انرژی در حدود ۳۰ کیلو الکترون ولت نیز می توان به لایه ای از نیتريد سیلیکون دست یافت. مطالعه این لایه نشان می دهد که نیتريد سیلیکون تهیه شده به این روش تمام شرایط استفاده در صنایع نیمه هادی به عنوان عایقی با ثابت دی الکتریک بالا را دارا می باشد.

References:

1. Fang, C.M., Hintzen, H.T., With, G., and Groot, R.A., *J. Phys: Condens. Matter*, **13**, 67 (2001).
2. Kim, K.J., Kang, T.H., Ihm, K., Jeon, C., Hwang, C.C. and Kim, B., *Surf. Sci.*, **600**, 3496 (2006).
3. Shokouhy, A., Larijani, M.M., Ghoranneviss, M., Haji Hosseini, S.H., Yari, M., Sari, A.H., and Gholipur Shahraki, M., *Thin Solid Films*, **550**, 571 (2006).
4. Streetman, B.G., *Solid State Electronic Devices*, Third Edition, Prentice Hall Inc., New Jersey (1990).