

بررسی اثر کاشت هیدروژن در نمونه بلوری کاربید سیلیسیم  
(SiC) قبل و بعد از اکسیداسیون گرمایی در محیط اکسیژن

برهان ارغوانی نیا\*

گروه فیزیک، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

محمد رضا حنطه زاده

گروه فیزیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

داود آقاعلی گل، علی باقی زاده

گروه فیزیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۸۹/۳/۱۹

تاریخ دریافت: ۸۹/۲/۸

چکیده

مقدمه: امروزه SiC در صنعت نیمه هادی ها کاربرد و اهمیت فراوانی پیدا کرده است، به ویژه این ماده در نمودار تک بلوری آن می تواند در ساخت قطعات الکترونیکی دمای بالا، توان بالا و فرکانس بالا مورد استفاده قرار گیرد. همچنین این نیمه هادی کاربردهای گوناگونی در دیودهای لیزری، فوتودیودها و سنسورهای مختلف دارد. کاربید سیلیسیم (Silicon Carbide) یک نیمه هادی غیر مستقیم با گاف نواری پهن می باشد. این نیمه هادی از لحاظ فیزیکی بسیار سخت است و خواص الکتریکی و اپتیکی آن متناسب با نوع ساختاری که دارد با یکدیگر کاملاً متفاوت است. در تمام ساختارهای بلوری SiC، ۵۰ درصد اتم کربن با ۵۰ درصد اتم C با استفاده از پیوند کووالانسی با یکدیگر پیوند دارند. اما با توجه به اینکه نحوه آرایش اتم های Si و C در داخل شبکه SiC به چه نموداری باشد، ساختارهای متفاوتی (Politypes) از SiC ایجاد می شود که هر یک از آنها دارای خواص فیزیکی منحصر به خود است. اما چند ساختار مهم SiC که در صنعت نیمه هادی کاربرد فراوان دارد عبارتند از: 4H- SiC، 6H- SiC و 3C- SiC. ولی غالباً دو ساختار 4H- SiC و 6H- SiC از لحاظ تجاری به عنوان زیر لایه در صنعت نیمه هادی ها مورد استفاده قرار می گیرد.

\*عهده دار مکاتبات: ایمیل b.arghavani@gmail.com

**هدف:** در این مقاله اثر کاشت یون هیدروژن با دز  $1 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^2$  و انرژی  $10 \text{ keV}$  در ساختار سطحی

بلور  $6\text{H-SiC}$  قبل و بعد از اکسیداسیون گرمایی در محیط اکسیژن، مورد بررسی قرار گرفته است.

**روش بررسی:** سطح بلور  $\text{SiC}$  در دو ناحیه کاشت شده و بدون کاشت با کمک میکروسکوپ نیروی

اتمی (AFM) بررسی و مقایسه شده است. همچنین کیفیت ساختار بلوری و اثر کاشت هیدروژن در ساختار بلور با استفاده از آنالیز پس پداندگی رادرفورد (RBS-Channeling) و نحوه توزیع هیدروژن در عمق نمونه با تکنیک ERD مطالعه شده است. علاوه بر این پیوند بین اتم های کاربید سیلیسیم ( $\text{SiC}$ ) در دو ناحیه با استفاده از تکنیک تبدیل فوریه نور مادون قرمز (FTIR) بررسی شده است.

**نتایج:** نتایج حاصل از آنالیز AFM افزایش نایکنواختی سطح در ناحیه کاشت شده را نسبت به ناحیه بدون

کاشت نشان می دهند، اما نشانه ای از تاثیر کاشت بر روی ناوخرش های ایجاد شده بعد از فرآیند زدایش دیده نمی شود. همچنین، ایجاد آسیب شبکه ای اندکی بر اثر برخورد هیدروژن با اتم های سیلیسیم و کربن در نتایج آنالیز کانال زنی دیده می شود. علاوه بر این، نتایج FTIR بدست آمده از ناحیه کاشت شده با هیدروژن اختلاف قابل توجهی را نسبت به ناحیه کاشت نشده با هیدروژن بعد از اکسید در محیط اکسیژن نشان می دهد.

**نتیجه گیری:** با استفاده از ERD توزیع اتم های هیدروژن در  $\text{SiC}$  با دقت خوبی تعیین شد و مقایسه آن با

نتایج شبیه سازی نشان داد که ماکزیمم توزیع اتم های هیدروژن در عمق حدود  $200 \text{ nm}$  است. این مقایسه همخوانی خوب بین نتایج تجربی و شبیه سازی را نشان می دهد. نتایج آنالیز RBS-Channeling اختلاف بین لایه اکسید رشد داده شده در ناحیه کاشت شده و بدون کاشت را نشان داد. علاوه بر این نتایج حاصل از FTIR نشان داد اگر چه تفاوت چشمگیری بین طیف های بدست آمده از دو ناحیه کاشت شده و کاشت نشده قبل از اکسیداسیون وجود ندارد، اما شدت پیک عبوری مربوط به پیوند  $\text{Si}$  با  $\text{O}$  در دو ناحیه کاشت شده و کاشت نشده بعد از اکسیداسیون در این ناحیه تفاوت چشمگیری با هم دارند و پیک مربوط به کربن و هیدروژن در ناحیه کاشت شده به وضوح آشکار می شود.

**واژه های کلیدی:** کاشت یونی،  $\text{SiC}$ ، اکسیداسیون گرمایی، آسیب بلوری

#### مقدمه

کاربید سیلیسیم (Silicon Carbide) یک نیمه هادی غیر مستقیم با گاف نواری پهن می باشد. این نیمه هادی از لحاظ فیزیکی بسیار سخت است و خواص الکتریکی و اپتیکی آن متناسب با نوع ساختاری که دارد با یکدیگر کاملاً متفاوت است. در تمام ساختارهای بلوری  $\text{SiC}$ ،  $50\%$  درصد اتم کربن با  $50\%$  درصد اتم  $\text{C}$  با استفاده از پیوند کووالانسی با یکدیگر پیوند دارند. اما با توجه به اینکه نحوه آرایش اتم های  $\text{Si}$  و  $\text{C}$  در داخل شبکه  $\text{SiC}$  به چه نموداری باشد، ساختارهای متفاوتی (Politypes) از  $\text{SiC}$  ایجاد می شود که هر یک از آنها دارای خواص فیزیکی منحصر به خود است. اما چند ساختار مهم  $\text{SiC}$  که در صنعت نیمه هادی کاربرد فراوان دارد عبارتند از:  $4\text{H-SiC}$ ،  $6\text{H-SiC}$  و  $3\text{C-SiC}$ <sup>(1)</sup> ولی غالباً دو ساختار  $4\text{H-SiC}$  و  $6\text{H-SiC}$  از لحاظ تجاری به عنوان زیر

لایه در صنعت نیمه هادی ها مورد استفاده قرار می گیرد. در این پژوهش از تک کریستال SiC با ساختار 6H-SiC استفاده شده است.

امروزه SiC در صنعت نیمه هادی ها کاربرد و اهمیت فراوانی پیدا کرده است، به ویژه این ماده در نمودار تک بلوری آن می تواند در ساخت قطعات الکترونیکی دمای بالا، توان بالا و فرکانس بالا مورد استفاده قرار گیرد.<sup>(۲)</sup> همچنین این نیمه هادی کاربردهای گوناگونی در دیودهای لیزری، فوتودیودها و سنسورهای مختلف دارد.<sup>(۳-۴)</sup> یکی از روش های متداول برای تغییر خواص تک بلورهایی مانند SiC جهت استفاده در تکنولوژی نیمه هادی ها، کاشت یون های مختلف مانند سیلیسیم، آلومینیوم، هیدروژن، فسفر و ... در این بلور است.<sup>(۵-۶)</sup> همچنین کاشت هیدروژن جهت برداشتن لایه نازکی از سطح بلور کاربرد سیلیسیم به عنوان راهکاری جهت ایجاد فیلم های کاربیدسیلیسیم روی عایق (SiCOI) که در ساخت قطعات الکترونیکی با گاف نواری پهن کاربرد دارند موارد استفاده فراوانی دارد.<sup>(۵)</sup> علاوه بر توجه به ایجاد لایه های نازک از کاربیدسیلیسیم، تاثیر کاشت یون بر اکسید این نیمه هادی نیز مورد توجه فراوان قرار گرفته است.<sup>(۷-۹، ۲)</sup>

هدف کلی در این مقاله بررسی کاشت هیدروژن در ساختار بلوری کاربیدسیلیسیم و تاثیر آن بر اکسیداسیون گرمایی آن است. در ابتدا تاثیر کاشت هیدروژن در ساختار بلوری این نیمه هادی با استفاده از تکنیک های RBS-Channeling و ERD مورد مطالعه قرار می گیرد. بعد از اکسیداسیون، تاثیر ناخالصی هیدروژن بر افزایش سرعت رشد اکسید نیز با روش RBS-Channeling مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثر کاشت هیدروژن بر مورفولوژی سطح نیمه هادی قبل از اکسیداسیون گرمایی در دو ناحیه کاشت شده و بدون کاشت با یون های هیدروژن با استفاده از تکنیک AFM مورد بررسی قرار گرفته است. برای بدست آوردن اطلاعاتی در مورد نحوه پیوندهای ایجاد شده بین اتم های کربن، سیلیسیم و هیدروژن بعد از کاشت یونی در SiC قبل و بعد از اکسیداسیون، از تکنیک FTIR استفاده شده است.

## مواد و روشها

### روش انجام آزمایش

در این پژوهش از تک بلور 6H-SiC با کیفیت بلوری خوب و صیقل شده در جهت بلوری (۰۰۰۱) استفاده شده است. کاشت هیدروژن با انرژی ۱۵ کیلو الکترون ولت و دز  $1 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^2$  در آزمایشگاه Oak Ridge کشور آمریکا انجام شده است. قبل از آنالیز نمونه را تحت هیچگونه فرآیند حرارتی قرار نمی دهیم تا بتوان تاثیر احتمالی کاشت هیدروژن را در سطح و شبکه بلوری مشاهده کرد.

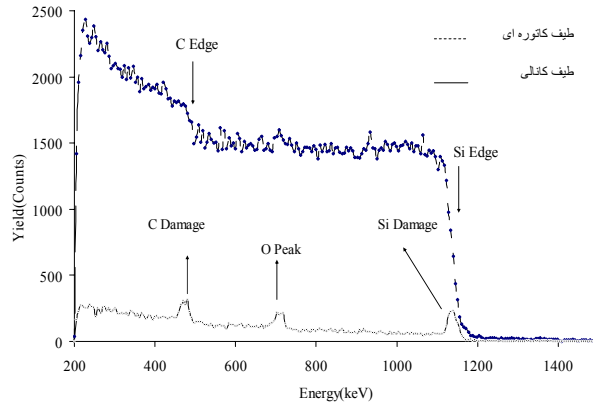
بررسی سطح با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی در آزمایشگاه بخش لیزر نیمه هادی پژوهشگاه علوم و تکنولوژی هسته ای صورت پذیرفته است. جهت انجام اندازه گیری های میکروسکوپ نیروی اتمی از دستگاه مدل Dual Scope 95-50 در پژوهشگاه لیزر پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای استفاده شده است. برای انتخاب بهترین ناحیه جهت آنالیز AFM، ابتدا ناحیه ای به ابعاد  $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$  آنالیز شد و سپس ناحیه آنالیز به  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$  کاهش داده شد. آنالیز RBS/C با یون های فرودی هلیوم با انرژی ۲ MeV در زاویه فرود عمود بر سطح نمونه و

زاویه برگشتی ۱۶۵ درجه در آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و تکنولوژی هسته ای انجام گرفته است. نمونه بر روی گونیومتری با سه درجه آزادی زاویه ای قرار داده شد. ذرات برگشتی از نمونه نیز توسط یک آشکارساز سد سطحی آشکار شده است. به منظور بررسی دقیق تر نمونه در دو ناحیه کاشت شده و بدون کاشت، از تکنیک تبدیل فوریه نور مادون قرمز ( FTIR ) استفاده شد. آنالیز نمونه ها در ناحیه طول موج ۹۰۰ تا 1500nm و در دانشکده شیمی دانشگاه تهران انجام شده است.

به منظور انجام اکسیداسیون گرمایی، از کوره حرارتی آزمایشگاهی استفاده شد که حداکثر دمای آن  $1200^{\circ}\text{C}$  و با دقت  $\pm 1$  درجه قابل کنترل است. اکسیداسیون در محیط اکسیژن با خلوص ۹۹/۹۹ درصد انجام پذیرفت. اکسیداسیون گرمایی SiC نمونه در محیط اکسیژن خالص در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  و به مدت ۹۰ دقیقه انجام شده است. محیط اکسیداسیون که در داخل محفظه استوانه ای از جنس کوارتز قرار داشت به مدت چند دقیقه قبل از قرار دادن نمونه تحت عبور گاز اکسیژن قرار گرفت تا محیط از اکسیژن خالص پر گردد در حالیکه دو سر لوله کوارتز تا حد زیادی مسدود شده بود.

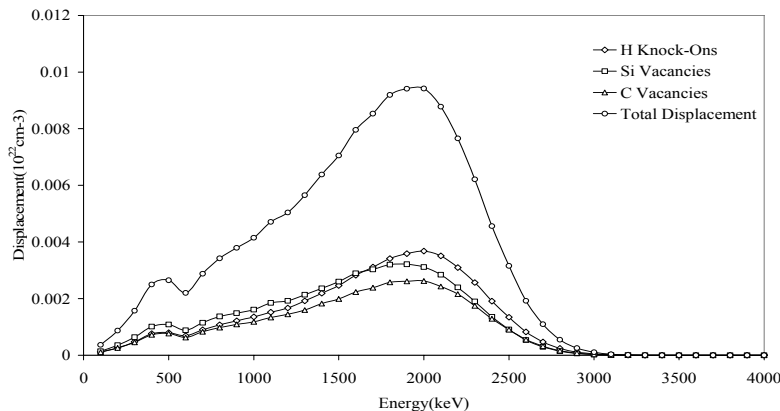
## نتایج و بحث

نمودار ۱ طیف RBS بدست آمده از نمونه را در دو حالت کاتوره ای و کانالی نشان می دهد. آنالیز RBS/C راهی مناسب جهت بررسی کیفیت بلور مورد مطالعه است. <sup>(۶-۱۰-۹)</sup> در این روش آنالیز سعی می شود تا با هدایت باریکه ای از ذرات فرودی در راستای بلوری شبکه مورد مطالعه و مقایسه تعداد ذرات برگشتی در دو حالت کانالی و کاتوره ای، کیفیت بلور مورد مطالعه و آسیب های احتمالی موجود در شبکه را مورد بررسی قرار دهیم. در نمودار ۱ مقایسه تعداد ذرات آلفای برگشتی دو طیف کانالی و کاتوره ای نشان دهنده افت بسیار زیاد ذرات شمارش شده در حالت کانالی نسبت به حالت کاتوره ای است. بنابراین این آنالیز نشان می دهد که بلور مورد مطالعه از کیفیت خوبی برخوردار است. <sup>(۶،۱۰)</sup> محاسبات نشان می دهد، نسبت تعداد ذرات برگشتی در دو طیف کانالی و کاتوره ای در ناحیه ای درست پایین ناحیه آسیب سطحی برابر ۰/۰۴۲ است. ( در صورتی که شبکه بلوری آمورف باشد این نسبت برابر یک می شود). به دلیل کاهش قابل ملاحظه ذرات آلفای برگشتی در راستای بلوری، هر گونه جابجایی یا استرسی در این راستای بلوری وجود داشته باشد با این تکنیک قابل بررسی است.



نمودار ۱ - طیف های کانالی و کاتوره ای از بلور SiC. پیک های ناشی از آسیب ایجاد شده بر اثر کاشت هیدروژن در طیف کانالی مشخص است.

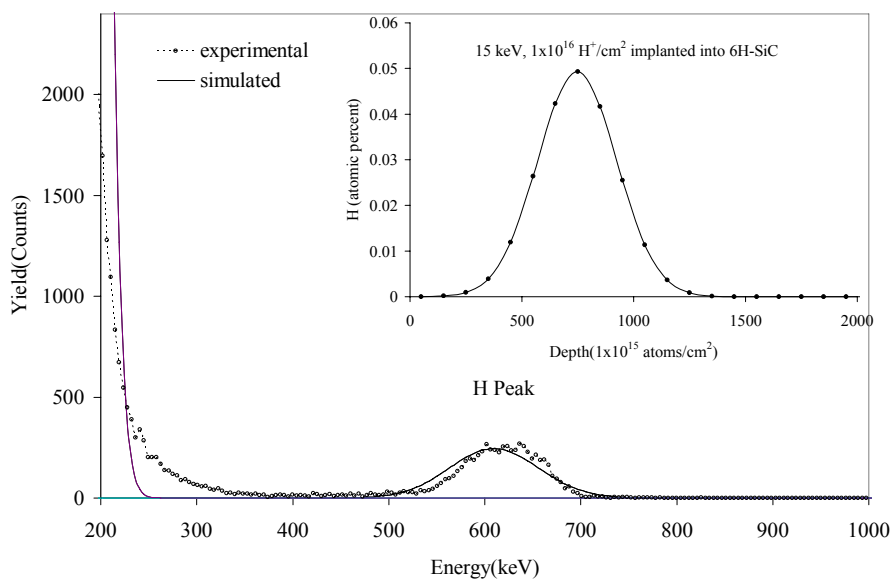
شبیه سازی با نرم افزار TRIM<sup>(۱۱)</sup>، ماکزیمم غلظت یون های کاشت شده با انرژی ۱۵ کیلو الکترون ولت هیدروژن را در عمق حدود ۱۳۰۰ آنگستروم به دست می دهد. نمودار ۲ نتایج این شبیه سازی را در تخمین آسیب بلوری ایجاد شده در این شبکه نشان می دهد. البته باید توجه کرد که این نرم افزار هدف را به صورت تک بلور در نظر نمی گیرد. در نمودار ۲، تعداد جاخالی های ایجاد شده بر اثر جابجایی اتم های سیلیسیم و کربن با تعداد جابجایی های اتم های این عناصر از مکان شبکه ای آنها برابر است. مقایسه تعداد کل جابجایی ها با چگالی میانگین در نظر گرفته شده توسط نرم افزار برای بلور SiC که  $6.87 \times 10^{22} \text{ atoms/cm}^3$  است، نشان می دهد که آسیب ایجاد شده به گونه ای نیست تا شبکه بلوری را به حالت آمورف تبدیل کند. به دلیل اختلاف جرم اتم های کربن و سیلیسیم، آسیب ایجاد شده بخاطر جابجایی اتم های سیلیسیم و کربن به صورت دو پیک مجزا در طیف کانالی نمودار ۱ دیده می شود. همانطور که از محاسبات با نرم افزار TRIM انتظار داشتیم میزان آسیب ایجاد شده در شبکه بلوری زیاد نیست. پیک وسط در نمودار ۱ مربوط به اکسیژن در سطح نمونه است (انرژی  $731/6 \text{ keV}$  در طیف) که به دلیل کاهش قابل ملاحظه زمینه SiC، می توان آن را در طیف کانالی مشاهده نمود بنابراین سطح نمونه برای فرآیندهای بعدی با محلول رقیق HF تمیز می گردد.



نمودار ۲ - نتایج شبیه سازی انجام شده با نرم افزار TRIM در بررسی آسیب بلوری ایجاد شده در SiC بعد از کاشت یون های هیدروژن با انرژی ۱۵keV.

به منظور بررسی وجود هیدروژن و تعیین نحوه توزیع هیدروژن کاشت شده در بلور SiC، در این پژوهش از تکنیک ویژه ای استفاده شده است که به آنالیز پس زنی الاستیک (Elastic Recoil Detection) معروف است.<sup>(۱۲)</sup> در این روش آنالیز از یونی سنگین تر از اتم های هیدروژن برای آنالیز نمونه حاوی هیدروژن استفاده می شود. به دلیل جرم سنگین تر یون های فرودی، که در این آزمایش یون های هلیوم می باشند، اتم های هیدروژن موجود در نمونه از عمق های مختلف نمونه کنده می شوند و توسط آشکار ساز سد سطحی ثبت می گردند. ذرات آلفای برگشتی بر اثر برخورد با اتم های سیلیسیم و کربن توسط ورقه نازکی از کیتون ( $C_{22}H_{10}N_2O_5$ ) به ضخامت ۷,۵ میکرومتر که در جلوی آشکار ساز قرار گرفته است متوقف می گردند.

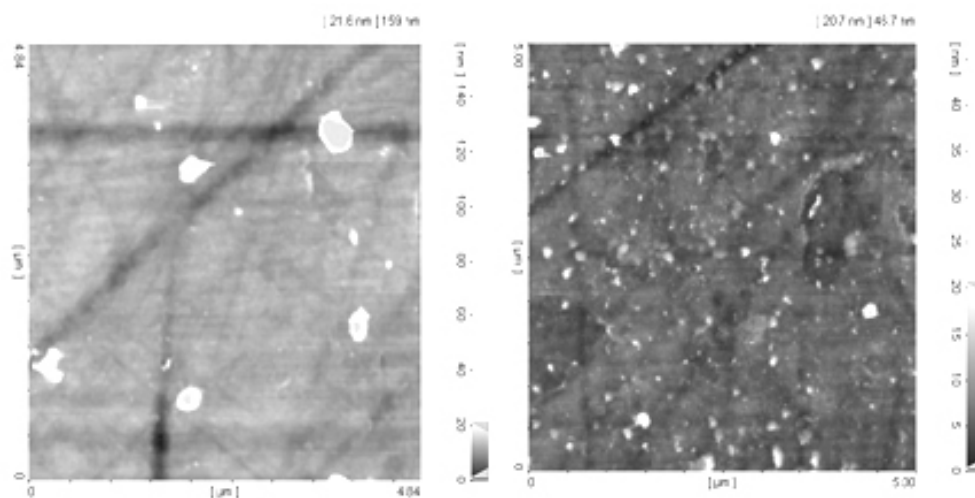
نمودار ۳ نتیجه حاصل از آزمایش ERD و شبیه سازی طیف به دست آمده با دو نرم افزار<sup>(۱۳)</sup> SIMNRA6.05 و SIMTarget 1.3 را نشان می دهد. با توجه به نتایج شبیه سازی، پارامترهای متناسب با توزیع اتم های هیدروژن در نمونه، عمق  $750 \times 10^{15} \text{ atoms/cm}^2$  برای ماکزیمم غلظت و مساحت زیر پیک که با دز اتم هیدروژن در نمونه برابر است،  $2 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^2$  به دست می آید. با تبدیل واحد عمق به نانومتر (ضریب ۰,۲۶۶)، اختلاف ۴۵nm بین نتایج تجربی و نتایج شبیه سازی TRIM98 دیده می شود که این اختلاف از خطاهای آزمایش تجربی و عدم توانایی برنامه TRIM در شبیه سازی نمونه های تک بلور ناشی می شود.



نمودار ۳- طیف ERD از نمونه SiC کاشت شده با هیدروژن با انرژی 15keV که با یون های آلفای 2.3MeV و در زاویه فرودی ۶۰ درجه بدست آمده است.

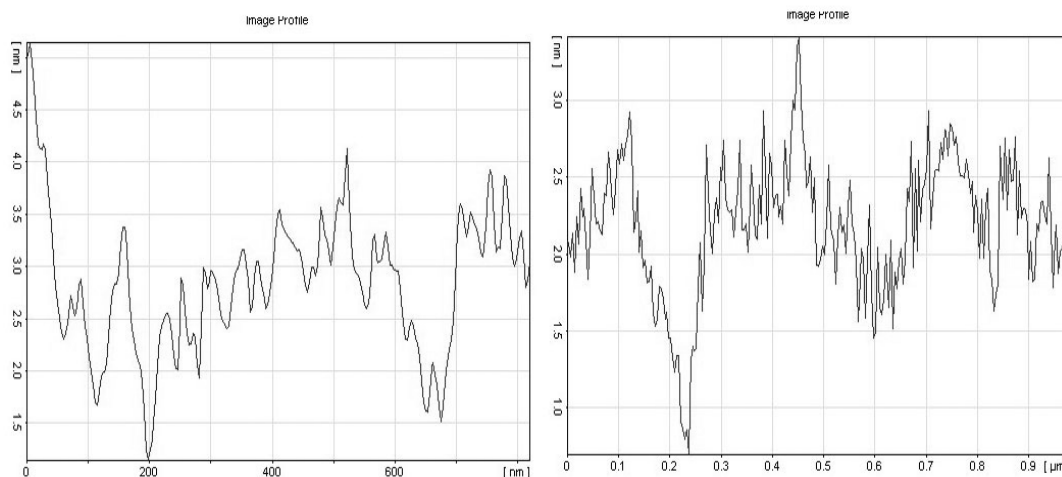
برای بررسی سطح بلور SiC در دو ناحیه کاشت شده و بدون کاشت از تکنیک AFM استفاده می شود. نمودار ۴ تصویر AFM از دو ناحیه کاشت شده با هیدروژن و بدون کاشت را نشان می دهد. در این تصاویر به وضوح می توان شیارهایی مشاهده نمود که در تصویر دو بعدی از سطح به صورت خطوط متقاطع دیده می شوند. این شیارها بر اثر فرآیند صیقل (polish) بلور SiC ایجاد می شوند. این شیارها بر خواص ساختار به دست آمده بعد از فراهم نمودن لایه دیگری بر روی زیرماده می توانند تاثیرگذار باشند و مورفولوژی فصل مشترک زیرلایه SiC و

لایه رویی آن را دچار تغییر نمایند. آزمایش ها نشان داده است که بازپخت گرمایی در دماهای مختلف یا زدایش در محیط های بخصوص می تواند در رفع این خراش ها موثر باشد. (۱۴)



نمودار ۴ - تصویر AFM از ناحیه کاشت نشده (a) و کاشت شده با هیدروژن (b).

نمودار ۵ نحوه تغییرات ارتفاع یک مقطع از نمودار های ۴ را نشان می دهد. دره های واضح در این نمودار مربوط به خراش های موجود در سطح بلور است. پهنای این خراش ها در حدود ۱۰۰ نانومتر و عمق آنها بین ۳ تا ۴ نانومتر به دست می آید.

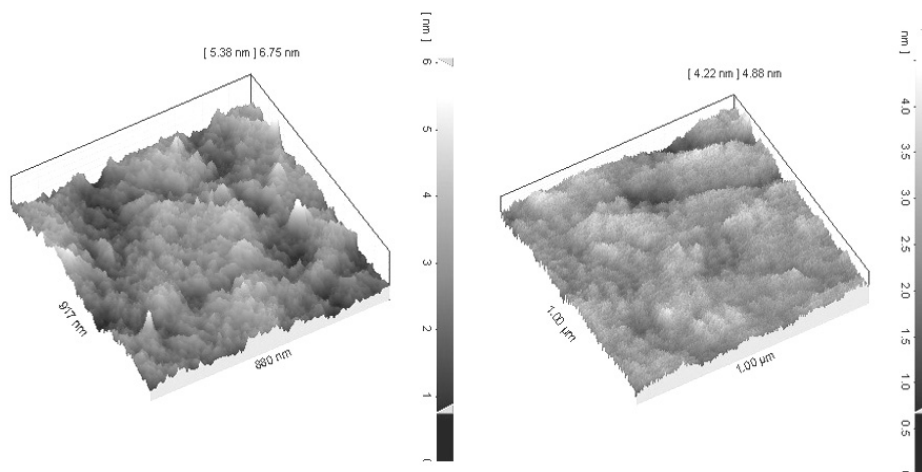


نمودار ۵ - پروفایل تغییر ارتفاع سطح بلور از a. ناحیه بدون کاشت و b. ناحیه کاشت شده با هیدروژن.

با مقایسه نتایج دیگر بدست آمده از قسمت های مختلف دو ناحیه بدون کاشت و کاشت شده، مشخص می شود کاشت هیدروژن تاثیری در برطرف کردن یا افزایش این خراش ندارد. این نتیجه را می توان به جرم کم هیدروژن و دز پایین کاشت در این آزمایش مربوط دانست. همچنین نواحی سفید رنگ مشاهده شده در نمودار 4 به تشکیل

حباب های سطحی مربوط می شود که در اثر کاشت هیدروژن در زیر لایه ایجاد می شود و به وضوح اندازه آنها در ناحیه کاشت شده با هیدروژن بزرگتر است.

نمودار ۶ تصویر سه بعدی از سطح دو ناحیه کاشت شده و بدون کاشت را نشان می دهد که در ابعاد  $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$  اسکن شده است. در تصاویر می توان خراش ها را به صورت دره هایی مشاهده نمود.



نمودار ۶ - تصویر سه بعدی از دو ناحیه کاشت شده و بدون کاشت

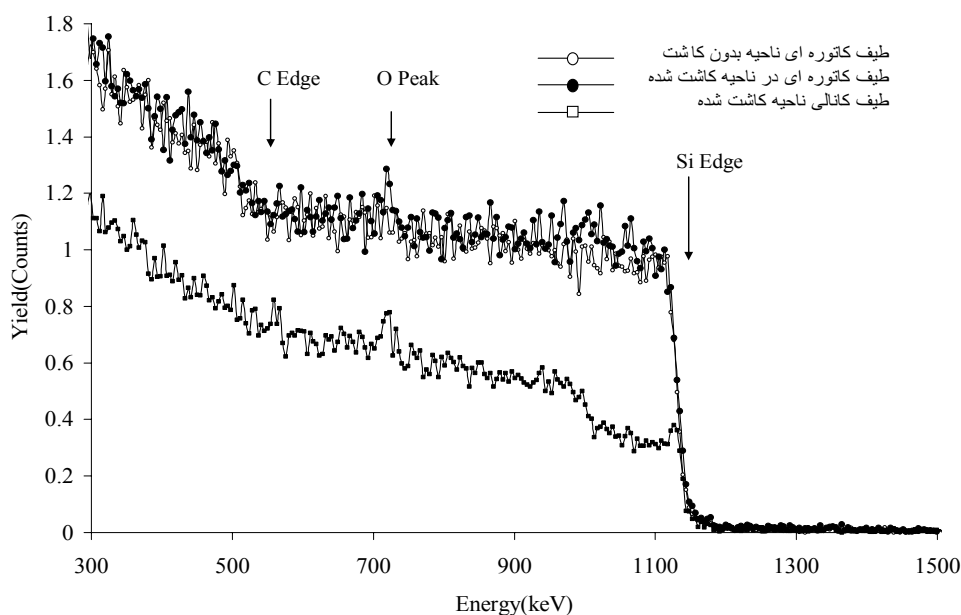
جدول ۱ نتایج بدست آمده از آنالیز آماری روی تصاویر AFM را برای دو ناحیه نشان می دهد. در این آنالیز علاوه بر بررسی کل هر تصویر، دو ناحیه با ابعاد  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$  که شامل خراش ها و بدون خراش ها است در هر تصویر بررسی شده است. پارامتر Sq که اندازه ای از پراکندگی داده ها از مقدار میانگین ارتفاع در ناحیه مورد بررسی است برای ناحیه کاشت شده بیشتر از ناحیه بدون کاشت است، به طوری که نسبت این پارامتر در ناحیه کاشت شده ۲ تا ۳ برابر مقدار آن در ناحیه بدون کاشت است. علت این را می توان در برخورد یون های هیدروژن فرودی با اتم های سطح بلور و تاثیر آنها بر سطح بلور جستجو کرد. همچنین پارامتر Sy ارتفاع میانگین در ناحیه مورد بررسی را نشان می دهد. مقایسه نتایج دو ناحیه کاشت شده و کاشت نشده نتیجه گیری به دست آمده از مقادیر Sq را تایید می کند.

جدول ۱- نتایج بدست آمده از آنالیز آماری تصاویر AFM.

	ناحیه بدون کاشت		ناحیه کاشت شده	
	بخش با خراش	بخش بدون خراش	بخش با خراش	بخش بدون خراش
Sy	9.2nm	5.75nm	13.2nm	15.1nm
Sq	1.67nm	829pm	1.77nm	1.94nm



نتایج بدست آمده از آنالیز RBS نمونه بعد از اکسیداسیون گرمایی SiC در محیط اکسیژن خالص در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  و به مدت ۹۰ دقیقه، در نمودار ۷ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، ضخامت اکسید رشد داده شده کم می باشد درحالیکه اکسیداسیون گرمایی SiC در محیط بخار آب سرعت بیشتری دارد. (۸-۱۵) چنین تفاوتی نیز در مورد اکسیداسیون گرمایی سیلیسیم مشاهده می شود اما در مورد سیلیسیم، سرعت رشد اکسید گرمایی بسیار بیشتر از مورد مشابه برای SiC است. (۱۷-۱۸)



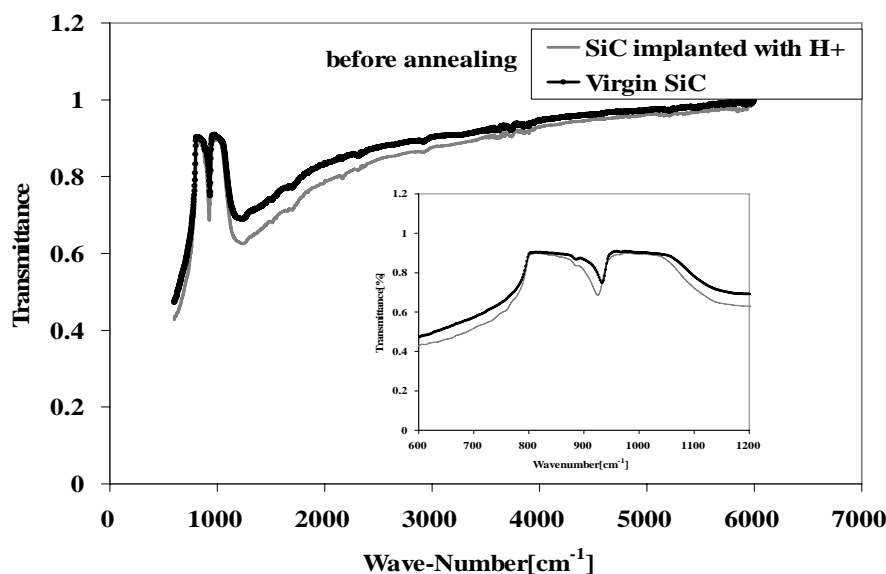
نمودار ۷ - طیف های RBS از نمونه بعد از اکسیداسیون گرمایی در

دمای  $1050^{\circ}\text{C}$  و زمان ۹۰ دقیقه به دست آمده با یون های آلفا و در دم راستای کانالی و کاتوره ای.

آنالیز RBS تفاوت اندکی را برای ضخامت لایه اکسید در ناحیه کاشت شده و کاشت نشده نشان می دهد به طوریکه پیک اکسیژن در طیف های RBS در حالت کاتوره ای برای ناحیه کاشت شده (دایره های تو پر) مقدار بیشتری را نسبت به مقدار اکسیژن در طیف ناحیه کاشت نشده (دایره های خالی) نشان می دهد. به دلیل حساسیت پایین آشکارساز، ضخامت لایه اکسید در لبه سیلیسیم به صورت پله ای واضح دیده نمی شود. در حالیکه گزارش های قبلی (۸-۱۰) نشان می دهد استفاده از یون های سنگین ترمانند آرگون با آسیب بلوری زیاد در شبکه باعث افزایش سرعت رشد اکسید در SiC می شود. در حقیقت، برخورد یون های فرودی با اتم های شبکه SiC باعث جابجایی اتم های شبکه به مکان های غیر شبکه ای و یا حضور اتم های کاشت شده در مکان های بین اتمی می شود که موجب اختلال در پتانسیل منظم شبکه ای بلور در این نواحی می شود. اما با توجه به محاسبات انجام شده در نمودار ۲ و نتایج تجربی به دست آمده از آنالیز RBS، مشاهده می شود جابجایی اتم های شبکه SiC در اثر برخورد یون های هیدروژن با آن و در نتیجه آسیب بلوری ایجاد شده در شبکه کم است. بنابراین اثر کاشت یون های هیدروژن بر شبکه بلوری SiC و تاثیر آن بر سرعت رشد اکسید نمی تواند با تاثیر کاشت یون های سنگین تر مقایسه گردد.

همچنین برای بررسی پیوند بین اتم های SiC و هیدروژن در دو ناحیه کاشت شده و کاشت نشده از تکنیک FTIR استفاده شده است. FTIR که مخفف "تبدیل فوریه نور مادون قرمز" است، روشی برتر در اسپکتروسکوپی مادون قرمز است. در این روش، تابش IR از یک نمونه عبور می کند. مقداری از این تابش مادون قرمز توسط نمونه جذب می شود و مقداری نیز از آن عبور می کند. طیف به دست آمده از این تکنیک جذب یا گذار را نشان می دهد و یک اثر انگشت مولکولی از نمونه فراهم می کند.

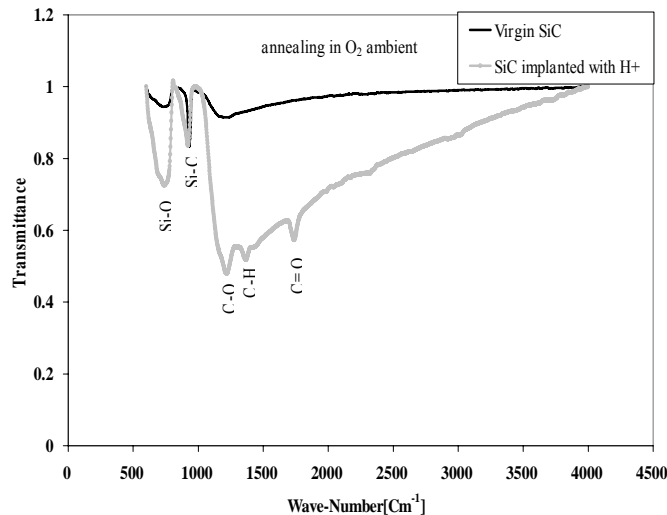
در نمودار ۸ طیف حاصل از آنالیز FTIR بدست آمده از نمونه SiC قبل از اکسیداسیون گرمایی در محیط اکسیژن، در دو ناحیه کاشت شده با هیدروژن و بدون کاشت هیدروژن نشان داده شده است. پیکی که در عدد موج حدود  $1000 \text{ cm}^{-1}$  دیده می شود، مربوط به پیوند Si با C است. برای اینکه تغییرات ایجاد شده در دو ناحیه مشاهده شود در این نمودار بازه بین عدد موج  $800 \text{ cm}^{-1}$  تا  $1200 \text{ cm}^{-1}$  با بزرگنمایی بیشتری در نزدیک پیک عبوری به صورت ضمیمه نشان داده شده است. همان طور که در نمودار دیده می شود طیف مربوط به ناحیه دارای هیدروژن، اندکی به سمت چپ جابجا شده است که این تغییر می تواند به خاطر وجود اتم های هیدروژن باشد. ولی چون این تغییرات کم است پیک مربوط به پیوند کربن با هیدروژن در نمودار ۸ مشاهده نمی شود.



نمودار ۸- تصاویر FTIR از نمونه SiC قبل از بازپخت در محیط اکسیژن در دو ناحیه کاشت شده و بدون کاشت با هیدروژن

در نمودار ۹ طیف حاصل از آنالیز FTIR بدست آمده از نمونه SiC بعد از اکسیداسیون گرمایی در محیط اکسیژن، در دو ناحیه کاشت شده با هیدروژن و بدون کاشت هیدروژن نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود طیف FTIR بدست آمده بعد از اکسیداسیون در دو ناحیه کاشت شده و کاشت نشده با هیدروژن اختلاف زیادی با یکدیگر دارند. در طیف بدست آمده از ناحیه کاشت نشده (SiC خالص) تنها دو پیک عبوری مربوط به پیوند Si با C در عدد موج حدود  $1000 \text{ cm}^{-1}$  و پیک عبوری مربوط به پیوند Si با O در

عدد موج حدود  $800 \text{ cm}^{-1}$  دیده می شود. اما در طیف بدست آمده از ناحیه کاشت شده با هیدروژن پیک عبوری متفاوتی دیده می شود.<sup>(۱۹)</sup> در این ناحیه دو پیک عبوری مربوط به پیوند Si با C در عدد موج حدود  $1000 \text{ cm}^{-1}$  و پیک عبوری مربوط به پیوند Si با O در عدد موج حدود  $800 \text{ cm}^{-1}$ ، همان طور که انتظار می رود، دیده می شود با این تفاوت که شدت پیک عبوری مربوط به پیوند Si با O در این ناحیه تفاوت چشمگیری با ناحیه بدون هیدروژن دارد.



نمودار ۹- تصاویر FTIR از نمونه SiC بعد از بازپخت در محیط اکسیژن در دو ناحیه کاشت شده و بدون کاشت با هیدروژن

همچنین چند پیک عبوری دیگر نیز در این ناحیه دیده می شود. دو پیک عبوری مربوط به پیوند یگانه C با O در عدد موج حدود  $1220 \text{ cm}^{-1}$  و پیک عبوری مربوط به پیوند دوگانه C با O در عدد موج حدود  $1740 \text{ cm}^{-1}$  کاملاً مشخص است. همچنین پیک عبوری مربوط به پیوند C با H در عدد موج حدود  $1360 \text{ cm}^{-1}$  قابل تشخیص است.

### نتیجه گیری

در این مقاله اثر کاشت یون هیدروژن در کیفیت ساختار بلوری SiC، نحوه توزیع هیدروژن و نحوه پیوند بین اتم های SiC و هیدروژن در دو ناحیه کاشت شده و کاشت نشده با استفاده از تکنیک های RBS، ERD، AFM Channeling و FTIR بررسی شد. همچنین تاثیر اکسیداسیون گرمایی بلور SiC در محیط اکسیژن در برخی از پارامترهای ذکر شده، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج AFM نشان داد که کاشت هیدروژن باعث افزایش نایکنواختی سطح بلور و تشکیل حباب های سطحی در سطح بلور می شود که این آسیبها جهت برداشتن لایه های نازکی از SiC از روی سطح می تواند مفید باشد اما ممکن است در خواص الکتریکی بلور تاثیر منفی داشته باشد. همچنین نتایج حاصل از RBS-Channeling نشان می دهد که آسیب ایجاد شده در بلور SiC به گونه ای نیست تا شبکه بلوری را به حالت آمورف تبدیل کند که این نتیجه با نتایج حاصل از شبیه سازی TRIM

همخوانی دارد. با استفاده از ERD توزیع اتم های هیدروژن در SiC با دقت خوبی تعیین شد و مقایسه آن با نتایج شبیه سازی نشان داد که ماکزیمم توزیع اتم های هیدروژن در عمق حدود ۲۰۰ نانومتر هست. این مقایسه همخوانی خوب بین نتایج تجربی و شبیه سازی را نشان می دهد. نتایج آنالیز RBS-Channeling اختلاف بین لایه اکسید رشد داده شده در ناحیه کاشت شده و بدون کاشت را نشان داد. علاوه بر این نتایج حاصل از FTIR نشان داد اگر چه تفاوت چشمگیری بین طیف های بدست آمده از دو ناحیه کاشت شده و کاشت نشده قبل از اکسیداسیون وجود ندارد، اما شدت پیک عبوری مربوط به پیوند Si با O دو ناحیه کاشت شده و کاشت نشده بعد از اکسیداسیون در این ناحیه تفاوت چشمگیری با هم دارند و پیک مربوط به کربن و هیدروژن در ناحیه کاشت شده به وضوح آشکار می شود.

### References:

1. Fisher, G.R., and Barnes, P., *Phil. Mag.*, **61**, (2), 217 (1990).
2. Hayton, D.J., Jenkins, T.E., Bailey, P., and Noakes, T.C.Q., *Semiconductor Sci. Tech.*, **17**, 29 (2002).
3. Burke, T., Xie, K., Flemish, J.R., Singh, R., Podlesak, T., and Zhao, J. H., in *Proceedings, the Twenty-Second International Power Modulator Symposium.*, **18** (1996).
4. Clarck, R.C., and Palmour, J.W., *Proc. IEEE.*, **90**, (6), 987 (2002).
5. Heliou, R., Brebner, J.L., and Roorda, S., *Semiconductor Sci. Tech.*, **16**, 836 (2002).
6. Gregory, R., Wetteroth, T.A., Wilson, R.S., Holland, O.W. and Thomas, D.K., *J. Appl Phys. Lett.*, **75**, 2623 (1999).
7. Radtke, C., Baumvol, I.J.R., and Stedile, F.C., *Phys. Rev. B*, **66**, 155437 (2000).
8. Makhtari, A., Raineri, V., LaVia, F., Franz, G., Frisina, F., and Calcagno, L., *Materials Science in Semiconductor Processing.*, **4**, 345 (2001).
9. Palmieri, R., Boudinov, H., Radtke, C., and da Silva Jr, E.F., *Appl. Surface Sci.*, **255**, 706 (2008).
10. Nipoti, R., Madrigali, M., and Sambo, A., *Mat. Sci. Engin. B*, **61-62**, 475 (1999).
11. Biersack, P., and Ziegler, J.F., *The stopping and range of ions in solids*, Pergamon Press, New York (1985).
12. Baghizadeh, A., Agha-Aligol, D., Talebi-Taher, A., and Lamahi-Rachti, M., *Iranian Phys. J.*, **1**, 38 (2007).
13. Mayer, M., *SIMNRA User's Guide, Report IPP 9/113, Max-Planck-Institut für plasmaphysik*, Garching, Germany (1997).
14. Dogan, S., Johnstone, D., Yun, F., Sabuktagin, S., and Leach, J., *J. Appl Phys. Lett.*, **85**, 154 (2004).
15. Vickridge, I., Ganem, J., Hoshino, Y., and Trimaille, I., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40**, 6254 (2007).
16. Hashimoto, H., Hijikata, Y., Yaguchi, H., and Yoshida, S., *Appl. Sur. Sci.*, **255**, 8648 (2009).
17. Hossain, K., Holland, O.W., Naab, F.U., Mitchell, L.J., Poudel, P.R., Duggan, J.L., and McDaniel, F.D., *J. Phys. Res. B*, **261**, 620 (2007).
18. Afanas, V.V., Ciobanu, F., Dimitrijevic, S., Pensl, G, and Stesmans, A., *J. Phys. Condens. Matter.*, **16**, 1839 (2004).
19. Huisken, F., Kohn, B., Alexandrescu, R., Cojocaru, S., Crunteanu, A., Ledoux, G., and Reynaud, C., *J. Nanoparticles Res.*, **1** (2), 293 (1999).