

تأثیر کنترل دما بر روی ضخامت و یکنواختی لایه های کربنی در روش CVD

احمد قضاتلو

پژوهشگاه صنعت نفت، تهران

چکیده

نتایج این تحقیق موفق به دستیابی فیلمی یکنواخت و بسیار نازک از گرافن رشد یافته بر روی بستر سیلیکا به روش رسوب دهی بخار شیمیائی شده است که با تنظیم شرایط دمائی کوره در سه منطقه با دماهای ۹۵۰ و ۸۰۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد منجر به کنترل فرایند رشد گرافن با پدیده چیدمان خود محدود کننده شده که حداکثر توان رشد صفحه ای دو لایه از گرافن را دارد. این فرایند در سه مرحله دو مکانسیم شکست خوراک و هسته زائی همراه با رشد گرافن را بیان می کند. آنالیزهای تصویر برداری AFM، طیف سنجی رامان و تصویر TEM به بررسی وضعیت ساختاری گرافن سنتز شده می پردازند و نتایج آنرا با گرافن رشد یافته بر بستر مسی مقایسه می کند نتایج بدست آمده حاکی از آن است که گرافن سنتز شده از نظر کیفی، نواقص ساختاری، ضخامت و یکنواختی وضعیت بسیار مطلوب تری داشته و در کاربردهای الکترونیک که بزرگترین حوزه کاربرد گرافن است بسیار مناسب و مفید خواهد بود.

واژه های کلیدی: گرافن، سیلیکا، رسوب دهی بخار شیمیائی، رامان، متان.

ایمیل نویسنده مسئول: ghozatlooa@ripi.ir

۱- مقدمه

گرافن یک لایه تک اتمی از پیوندهای دوگانه کربن است که در یک شبکه لانه زنبوری منظم شده است. شکل خاص پیوندهای کربنی رزونانسی و همچنین خصوصیات فیزیکی گرافن، آنرا ساختاری متمایز کرده و موجب شده بیش از یک دهه توجه محققین به جنبه های عملی آن معطوف گردد. گرافن در دمای معمولی دارای الکترون های آزادی است که به عنوان حامل های بار در ساختار آن می توانند هزاران فاصله بین اتمی را بدون پراکندگی در لحظه طی کنند این پدیده که موجب شده رفتار هدایتی گرافن از منظر الکتریکی و گرمائی بسیار برجسته و منحصر بفرد گردد [۱]. تک لایه گرافنی آنقدر شفاف می باشد که عبور اشعه مادون قرمز از بین دو لایه آن تنها ۲/۳٪ افت می یابد [۲]. برخورداری از خواص دیگری همچون انعطاف عالی، مقاومت شیمیائی بسیار بالا، هزینه سنتز نسبتاً کم آنرا برای الکتروادهای هادی شفاف بسیار مناسب کرده است. تاکنون روش های زیادی مانند رشد بر روی کاربید سیلیکون، اسمبلی کردن ساختار دو بعدی از اکسید گرافن، باز کردن لایه های سه بعدی گرافیت، روش هامرز و رسوب دهی بخار شیمیائی برای سنتز گرافن بررسی و پیشنهاد شده است [۳].

روش رسوب دهی بخار شیمیائی قادر است صفحات گرافنی با خلوص بالا و در مقیاس بزرگ را رشد دهد که عمده تاً مبتنی بر رشد بر روی یک لایه فلزی به عنوان کاتالیزور می باشد که در نتیجه نیاز مند حذف بستر کاتالیستی برای جداسازی و یا انتقال گرافن

رشد یافته به بسترهای مورد نظر می باشد. چه اینکه این بسترهای فلزی اغلب رفتار عایقی دارند که گرافن رشد یافته بر روی آنها اگر جداسازی نشود رفتار هدایتی آنرا دستخوش تغییرات و افت شدید می کند و به عنوان مثال کاربرد آنرا در حوزه الکترونیک محدود می نماید. بعلاوه در فرایند جدا سازی گرافن از بستر کاتالیستی که اغلب با روش های اسیدی همراه است برخی مشکلات ساختاری مانند ایجاد چین و چروک در سطح گرافن رشد یافته، ایجاد حفره های ناشی از گسستگی پیوندهای رزونانسی، خارج شدن فلز از بدو ساختار رشد یافته، وجود ناخالصی های موجود در محیط هنگام رشد گرافن در هنگام جداسازی گرافن از بستر نیز بوجود می آید که در کل باعث افت رفتار هدایتی گرافن می شود [۴]. چنین مشکلاتی تحقیقات را به سمت رشد گرافن بر روی بستر های غیر کاتالیستی مانند سیلیکا، آلومینا، اکسید منگنز هدایت کرده است که این نوع رشد گرافن منجر به تولید ساختارهای نانو کریستالی از گرافن می شود که دچار نقایص ساختاری زیادی با خواص نوری به مراتب ضعیف تر می شود [۵]. بنابراین تحقیقات با اصلاح روش های موجود به دنبال کاهش معایب یاد شده در گرافن سنتز شده دنبال شدند. در بین این روش ها روش اصلاح یافته رشد گرافن بر روی بستر سیلیکا به روش رسوب دهی بخار شیمیائی به نتایج خوبی دست یافته است. بطوریکه این روش قادر است بطور پیوسته صفحه گرافنی را در مقیاس بزرگ بصورت فیلم یکنواخت در دمای پایین با شفافیت بالا و رفتار هدایتی معادل گرافن رشد یافته بر

روی بستر کاتالیستی تولید نماید. لذا این تحقیق به بررسی روشی اصلاح یافته برای رشد گرافن بر روی بستر سیلیکا می پردازد.

اگرچه مکانیسم رشد گرافن در این روشی کمی متفاوت تر از روش رشد گرافن بر روی بستر مسی در روش رسوب دهی بخار شیمیایی می باشد ولی فرایند رشد گرافن بر اساس پدیده خدچیدمانی نیمه محدود در آن دنبال می شود. رشد گرافن بر روی یک بستر عایق امکان استفاده از آنرا در صنایع نیمه هادی الکترونیک بدون نیاز به فرایند های تکمیلی و جداسازی از بستر فلزی فراهم می کند. این موضوع دستاوری مهم در صنایع الکترونیک محسوب می شود.

۲- روش ها

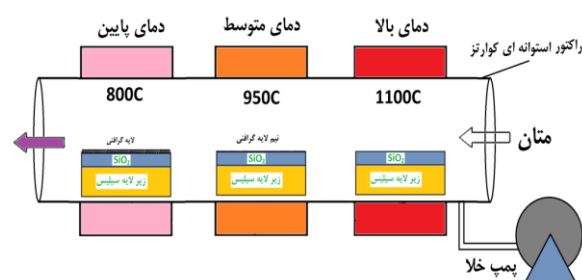
در این تحقیق گرافن به روش رسوب دهی بخار شیمیایی بر بستر سیلیکا سنتز شد و تاثیر تغییر بستر بر نحوه رشد گرافن سنتز شده نیز به روش رسوب دهی بخار شیمیایی ارزیابی شد. برای مقایسه عملکرد گرافن حاصله نتایج آنرا با گرافن رشد یافته بر بستر مسی مقایسه می شود.

کلیه مواد شیمیایی مورد استفاده با خلوص آزمایشگاهی بوده و از آب مقطر در طول انجام آزمایشات استفاده شد. بستر SiO_2/Si با سطح ویژه بالا از شرکت AIXTRON خریداری و در قطعات مورد نیاز در راکتور جایگذاری شد. ورقه های مسی با قطر ۲۵ میکرون با خلوص ۹۹/۹۹۹٪ از شرکت Alfa Aesar خریداری شد. گاز متان با خلوص ۹۹/۹۹۹٪ در کپسول تحت فشار استفاده شد. در آنالیز گرافن سنتز شده نحوه رشد فیلم گرافنی و ضخامت به کمک تصویر برداری AFM بررسی و ارزیابی شد. میکروسکوپ AFM مدل Philips سری JEOL-4210 که تحت اتمسفر هوا و در مد Tapping می باشد پروب روبشی مدل برای تصویر برداری AFM با نانوساختارهای کربنی پوشش داده شده اند. همچنین در تصاویر AFM از زیر لایه ویفر سیلیکونی با دسته صفحات (۱۰۰) استفاده شد. سپس به روش طیف سنجی رامان تعداد لایه های گرافن سنتز شده بدست آمد. همچنین یکنواختی فیلم و نواقص ساختاری گرافنی تشکیل شده از طریق تصویر برداری TEM مشاهده شد. میکروسکوپ الکترونی TEM مورد استفاده مدل فیلیپس EM208 از گروه KNL با قدرت ۵۰ KV است. به منظور عکس برداری TEM، پودر گرافن در اتانول خالص بواسطه امواج مافوق صوت به مدت ۱۵ دقیقه پخش و سپس در پایه های مخصوص قرار گرفته و تصویر برداری انجام شد. در ادامه مقاومت الکتریکی صفحه گرافنی به کمک روش چهار اتصال اندازه گیری شد. بدین ترتیب که چهار پروب با فاصله ۲ میلی متر از یکدیگر بر روی نمونه قرار گرفته و سپس دستگاه از ۱ میلی ولت تا ۱۰ ولت اعمال ولتاژ می کند و جریان عبوری از نمونه در بازه ۰ تا ۲۰۰

میلی آمپر خوانده می شود که می توان با قرار دادن این دو در فرمول، به راحتی مقاومت الکتریکی لایه را محاسبه نمود.

۳- سنتز گرافن

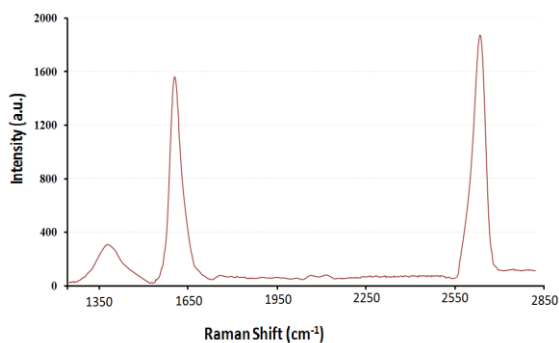
کوره مورد استفاده دارای سه زوم حرارتی قابل کنترل می باشد که هر یک قادر است دمایی مخصوص را به کوره اعمال نماید. در ابتدا راکتور توسط استن شسته شده و بستر سیلیکاتی در سه زوم حرارتی آن قرار می گیرد. سپس پمپ خلا روشن شده و یک خلا نسبی تا فشار ۱۰ mmHg ایجاد می کند. در ادامه دمایی کوره در زوم اول به ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد و در زوم دوم به ۹۵۰ و در زوم سوم به ۸۰۰ درجه سانتیگراد افزایش می یابد. سپس مخلوط گازهای متان و هیدروژن با دبی ۲۵ sccm (سانتیمتر مکعب در دقیقه) و ۱۰۰ به مدت ۶۰ دقیقه وارد راکتور می شود. شکل (۱) شماتیکی از سنتز گرافن به روش رسوب دهی بخار شیمیایی را نشان می دهد.



شکل ۱. شماتیکی از سنتز گرافن به روش رسوب دهی بخار شیمیایی.

با گذشت زمان کافی گاز متان قطع شده و کوره خاموش می شود و راکتور تا رسیدن به دمایی محیط تحت اتمسفر هیدروژن قرار می گیرد. برای رشد گرافن بر بستر مسی توسط روش CVD از شرایط خلأ نسبی و از مخلوط گاز هیدروژن و متان با دبی مشابه روش قبل استفاده شد. ابتدا فویل های مسی در اسید استیک ۲۵٪ به مدت ۱۵ دقیقه و در دمایی محیط قرار گرفت سپس فویل ها با آب مقطر و اتانول شستشو داده و در آن خلأ در دمایی ۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۰ دقیقه خشک شد. فویل های مسی در همان راکتور شیشه ای کوارتز بارگذاری شده و راکتور درون کوره قرار گرفت و دمایی کل راکتور تا ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد گرم شد. پس از رسیدن به این دما به مدت ۱۰ دقیقه باقی ماند. در این مدت جریان گاز هیدروژن درون راکتور جریان دارد تا سطح اکسید مس حذف و مس بصورت خالص آماده رشد گرافن شود. سپس جریان های گاز متان و هیدروژن همزمان به درون راکتور ارسال و به مدت ۶۰ دقیقه جریان می یابد تا فرصت رشد صفحات گرافنی بر روی سطح فویل مسی مهیا شود. پس از آن به منظور جلوگیری از رول شدن صفحات گرافنی و تبدیل به نانولوله کربنی راکتور تحت یک شوک حرارتی با شیب ۲۵۰ درجه سانتیگراد در دقیقه تا

ملاحظه می شود که زبری نسبی بستر سیلیکائی افزایش ۵۰٪ نشان می دهد و سپس تا دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد این مقدار تا ۵/۳ برابر افزایش یافته است بدان معنا که صفحات گرافنی شروع به رشد نموده اند. با توجه به ضخامت تک لایه گرافنی که ۰/۳۳ nm می باشد مقدار ضخامت بدست آمده از قسمت (د) حدود ۲ لایه می باشد که در مقایسه با رشد گرافن بر بستر مسی فیلمی بسیار نازک از گرافن را بدست می آورد. بنابراین ملاحظه می شود که دمای مناسب رشد گرافن بر روی بستر سیلیکا ۸۰۰ درجه سانتیگراد می باشد. طیف سنجی رامان یک روش قوی در تعیین ساختار فضای SP2 و SP3 و تغییرات آنها می باشد. همچنین برای بررسی اولیه تعداد لایه های گرافن نیز مورد استفاده قرار می گیرد. برای بررسی کیفیت و یکنواختی گرافن سنتز شده بر بستر سیلیکا از طیف سنجی رامان در شکل (۳) استفاده شد.



شکل ۳. طیف رامان گرافن سنتز شده در دمای ۸۰۰°C بر روی سیلیکا.

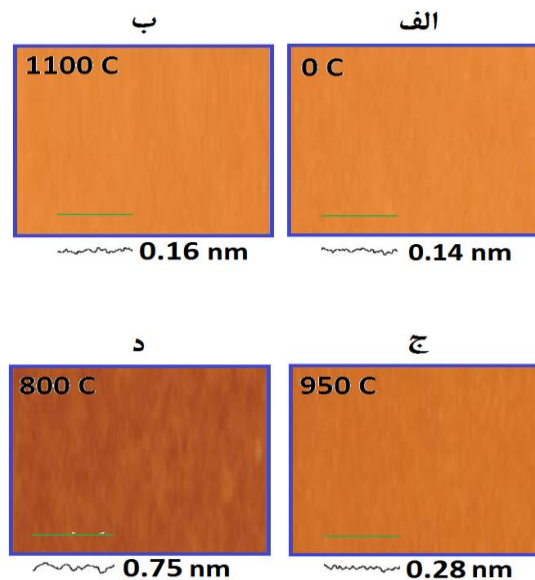
در طیف رامان بدست آمده شکل (۳) سه پیک در نواحی ۱۳۷۴ و ۱۶۰۵ و ۲۶۸۸ ظاهر شده است که به ترتیب پیک های D و G و 2D بوده که شدت آنها مطابق با ساختار هیبریدی SP2 دو لایه ای گرافن می باشد [۷]. همچنین نسبت شدت پیک D به G برابر ۰/۲۳ می باشد که نشان دهند دانسیته نسبی با نواقص کمتری است [۸]. این ساختار با مقایسه با رشد گرافن بر بستر مسی از تعداد لایه های بسیار کمتری برخوردار است [۹]. طیف رامان برای بسترهای سیلیکا در دماهای بیش از ۸۰۰ درجه سانتیگراد پیک مشخصی را ظاهر نکرد. لازم به ذکر است که با افزایش زمان تا ۸ ساعت ملاحظه شد که تعداد لایه های گرافن سنتز شده بر بستر سیلیکا افزایش نیافته و زمان مناسب ۶۰ دقیقه می باشد در نتیجه مشاهده می شود که فرایند رشد گرافن بر بستر سیلیکا یک فرایند خودچیدمان محدوده شونده است که مانع از رشد لایه ای گرافن از یک حد مشخصی می شود. درحالیکه در روش رشد گرافن بر بستر مسی با افزایش زمان شاهد افزایش تعداد لایه های گرافن هستیم [۱۰].

دمای محیط سرد می شود. در اینصورت باید جریان گاز متان به عنوان منبع کربنی قطع شود و جریان گاز هیدروژن برقرار باشد. باید توجه شود این شوک حرارتی خطر انفجار دارد که باید با دقت و تجربه کافی انجام شود. پس از سرد شدن راکتور صفحات گرافنی را می توان از راکتور بیرون آورد [۶]. برای حذف بستر مسی از گرافن رشد یافته از روش اسید شوئی با اسید کلریدریک رقیق استفاده شد.

۴- بحث و نتیجه گیری

۴-۱- ارزیابی گرافن سنتز شده

تصاویر AFM به عنوان یک ابزار قدرتمند در مقیاس نانو به طور گسترده در زمینه های مختلف برای پژوهش در علم مواد استفاده می شود. میکروسکوپ AFM به دلیل استفاده از نیروهای اتمی مانند نیروی واندروالس برای آنالیز سطح می تواند توپوگرافی سطح (تصویر سه بعدی)، تصویر فاز، خواص مغناطیسی، دانه بندی و ضخامت تک لایه را مورد بررسی قرار دهند. میانگین زبری سطح نانوذرات توسط این روش قابل اندازه گیری است که از مقدار متوسط داده های اندازه گیری شده توسط روش گوسین بدست می آید. در این تحقیق برای بررسی اثر دمای راکتور تصویر AFM از سه بستر سیلیکائی پس از رشد گرافن گرفته می شود که در شکل (۲) آمده است.



شکل ۲. تصویر AFM بستر سیلیکائی پس از رشد گرافن در دماهای مختلف.

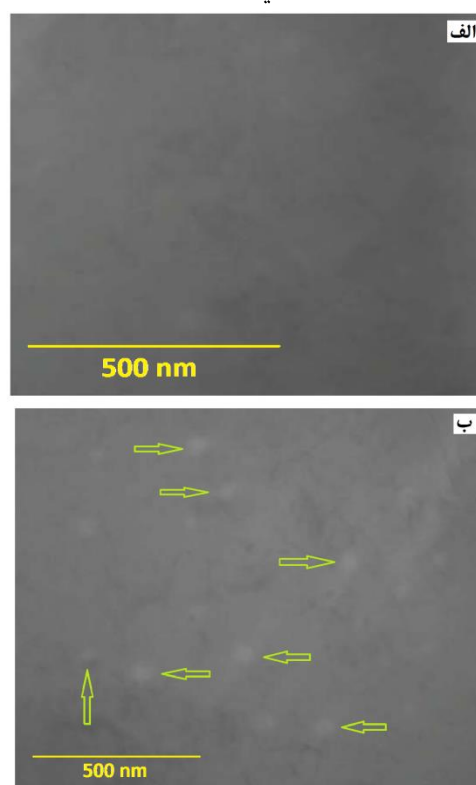
با توجه به شکل (۲) ملاحظه می شود که تصویر قسمت (ب) با تصویر قسمت (الف) یکسان می باشد و از نظر زبری نسبی نیز مقادیر آن یکسان و حدود ۰/۱۴ نانومتر می باشد بدین معنا که در دمای بالا گرافن بر روی بستر سیلیکائی نتوانسته است رشد نماید ولی با کاهش دما در قسمت (ج) تا ۹۵۰ درجه سانتیگراد

است که این گرافن را برای ساخت الکترودهای شفاف مناسب کرده است. قبل از این فرایند انتقال درون الکترودهای شفاف مرسوم بسیار پیچیده بوده و حضور آلودگی های مختلف و خطر ناشی از شکست صفحات استفاده شده از مشکلات اساسی آنها مطرح بود که کاربرد گرافن مزبور توانسته به کلی این مشکلات را حذف کرده و انتقال را با کیفیت بهتر انجام دهد.

۵- بحث و نتیجه گیری

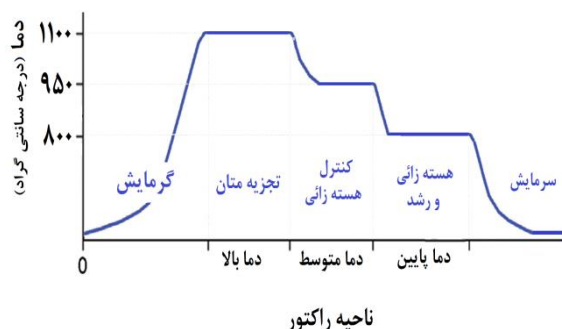
نکته قابل توجه نقش زوم های حرارتی بالا در ابتدای کوره است بدین ترتیب که اگرچه در بستر سیلیکائی موجود در دماهای بالا گرافن عملاً قادر به تشکیل نمی باشد. متان موجود با ورود به منطقه ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد تجزیه شده و کربن آزاد می شود ولی به دلیل انرژی لرزشی زیاد محیط که ناشی از دمای بالا است پیوند کربن های آزاد شده با بستر سیلیکائی بسیار کم شانس بوده و عملاً فرصتی برای پیوند های کربنی با یکدیگر بر سطح سیلیکا مهیا نمی شود. در نتیجه فرصت از دست رفته و کربن توسط گاز همراه هیدروژن به قسمت های کم دمای راکتور وارد می شود. از آنجائیکه انرژی لرزشی این منطقه با کاهش دما کمتر می شود کربن های فعال آمادگی پیوند با اکسیژن و هیدروژن موجود در بستر را پیدا کرده و با برقراری پیوند هسته مرکزی ساخت گرافن تشکیل می گردد که بر روی این هسته ها پیوندهای دوگانه کربن رشد می یابند و بدین ترتیب لایه های گرافنی از طرف لبه ها شروع به رشد کرده و فیلم گرافن را تشکیل می دهند. این فیلم تا سطح کامل بستر سیلیکائی رشد می کند. ملاحظه می شود که انرژی بسیار زیاد سطح سیلیکا موجب تشکیل فیلم گرافنی می شود که با پوشش دهی کامل آن توسط گرافن رشد یافته این انرژی سطحی کاهش می یابد و در مطابق آن شانس برقراری پیوندهای کربنی کم می شود [۱۴] از طرفی انرژی چسبندگی بین سیلیکا و گرافن بسیار بیشتر از انرژی چسبندگی بین گرافن با گرافن می باشد [۱۵] در نتیجه رشد لایه ای گرافنی به سرعت کاهش یافته و متوقف می شود. این پدیده موجب می شود فرایند رشد گرافن یک فرایند خود محدود کننده شود و منجر به رشد گرافن کم لایه می شود. برای اثبات این موضوع آزمایشات معکوس انجام شد بدین ترتیب که منطقه اولیه دمائی کوره را دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد تنظیم شد و سپس دما تا ۱۱۰۰C افزایش داشت ولی نتایج نشان می داد که هیچ لایه گرافنی بر روی سیلیکا تشکیل نشده است. بنابراین دمای راکتور باید طوری طراحی شود که ابتدا متان ورودی تجزیه شده و سپس با کاهش دما شرایط نشت کربن های آزاد سازی شده بر بستر سیلیکا فراهم گردد.

نتایج تحقیقات نشان می دهد که با انتقال گرافن رشد یافته بر روی بستر مسی در برخی سطوح گرافنی حفراتی ایجاد می شود که ناشی از پیوند ناهمگون مس با صفحه گرافنی بوده که با حذف مس توسط فرایند اسید شوئی حفره مربوطه ایجاد می شود [۱۱] ولی در بستر سیلیکا امکان برقراری پیوند ناهمگون سیلیکا با گرافن وجود ندارد چه اینکه دمای فرایند در این روش بسیار کمتر شده و این امر شانس ایجاد پیوند ناهمگون را نیز کاهش می دهد. شکل (۴) تصویر TEM گرافن رشد یافته بر روی بستر مسی را پس از فرایند حذف لایه مس نشان می دهد.



شکل ۴. تصویر TEM گرافن رشد یافته بر روی بستر (الف) سیلیکا، (ب) مس پس از فرایند خالص سازی.

با توجه به قسمت الف شکل (۴) مشاهده می شود که گرافن رشد یافته بر بستر سیلیکا بدون عیب ساختاری بوده و حفره ای در سطح آن وجود ندارد در حالیکه مطابق قسمت (ب) حفرات زیادی بر سطح گرافن بوجود آمده است که برخی از آنها ناشی از فرایند حذف مس توسط مرحله اسید شوئی می باشد. مقاومت الکتریکی صفحه گرافنی سنتز شده در دمای محیط به روش چهار اتصالی اندازه گیری شد [۱۲]. که مقدار عددی آن $690 \Omega/\text{sq}$ بوده که از مقاومت الکتریکی گرافن سنتز شده به روش هامرز کمتر می باشد [۱۳] که بر اساس این خاصیت کاربرد آن در صنایع الکترونیک بسیار ایده ال می شود. همچنین با توجه به تعداد لایه های اندک گرافن سنتز شده خواص نوری خوبی با شفافیت بالا ایجاد شده



شکل ۵. مراحل چهارگانه رشد گرافن بر بستر سیلیکا.

با توجه به شکل (۵) پیشنهاد می شود که بستر سیلیکاتی فقط در ناحیه کم دمایی راکتور با طول بیشتر جایگذاری شده و دمایی آن در ۸۰۰ درجه سانتیگراد تثبیت شود در حالیکه زوم های حرارتی دما بالا و دما متوسط باید اعمال شده و در این بین طول هر یک از این نواحی باید با شدت جریان مخلوط گاز ورودی به راکتور تنظیم شود. از آنجائیکه متان در دماهای مختلف به گروه های مختلف شکسته می شود دمایی ناحیه دما بالا راکتور باید در محدوده ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد باشد تا بتوان پیوندهای متان را به بیشترین مقدار کربن فعال شکست داد. در این بین خلا موجود در راکتور بر کیفیت کار می افزاید. همچنین برای دستیابی به ساختارهای کریستالی تر گرافن وجود ناحیه دما متوسط برای ثبات دمایی کربن های شکسته شده ضروری است اگرچه می توان بر اساس کاربرد گرافن سنتز شده در حوزه های مختلف دما و طول این مرحله را تنظیم نمود.

منابع:

1. K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, M.I. Katsnelson, I.V. Grigorieva, S.V. Dubonos, Nature, 438, 197-200(2005).
2. R.R. Nair, P. Blake, Grigorenko A.N., Novoselov K.S., Booth T.J., Stauber T., Peres N.M., Geim A.K., Science, 320, 1308-1319, (2008).
3. C. Xu, J.H. Lee, J.C. Lee, B.S. Kim, D. Whang, Cryst Eng Comm., 13, No. 20, 6036-6039, (2011).
4. G. Eda, G. Fanchini, M. Chhowalla, Nat. Nanotechnol., 3, 270-274, (2008).
5. A. Reina, X.T. Jia, D. Nezich, H. Son, Nano Lett., 9, 30-35, (2009).
6. A.M. VanderZande, R.A. Barton, J.S. Alden, C.S. Ruiz-Vargas, W.S. Whitney, Nano Lett., 10, 4869-4873, (2010).
7. A.C. Ferrari, J.C. Meyer, V. Scardaci, C. Casiraghi, Phys. Rev. Lett., 97, 187401-187411, (2006).

همچنین از نقطه نظر سینتیکی، ورقه های مسی ضریب انتقال جرم بسیار بیشتری نسبت به ثابت واکنش سطحی دارند که موجب رشد لایه ای گرافن می شود [۱۶] درحالیکه در سیلیکا ثابت واکنش سطحی به مراتب کمتر از مس بوده و در نتیجه نفوذ در عمق لایه کمتر می شود از این رو گرافن رشد یافته از نظر رشد لایه ای بسیار ضعیف شده و در نهایت گرافنی کم لایه را بوجود می آورد.

۶- نتیجه گیری

با توجه به نتایج رشد گرافن در بستر سیلیکا می توان اذغان نمود که فرایند رشد گرافن بر بستر سیلیکاتی شامل چهار مرحله گرمایش، هسته زائی، رشد و سرمایش می باشد. در مرحله گرمایش متان به قطعات کوچکتر کربنی شامل گروه های CH_x شکسته می شود که مقدار عددی X کمتر از ۴ می باشد در نتیجه مقداری از متان به کربن آزاد تبدیل می شود. این کربن دارای الکترون فعال برای پیوند دهی با اکسیژن، هیدروژن و مولکول کربن فعال دیگر است. لازمه این مرحله دمایی بالا است که خود موجب افزایش ارتعاشات نقطه ای در راکتور شده و در نتیجه مانع از انجام هرگونه پیوندی می شود سپس مولکول های شکسته شده متان به کمک گاز حامل هیدروژن به سمت زوم های دما متوسط و دما پایین حرکت می کنند و با کاهش دما ارتعاشات نقطه ای راکتور کمتر شده و فرصت تشکیل پیوند برقرار می شود در این بین نقش منطقه دما متوسط راکتور بسیار اهمیت دارد چراکه با کاهش سرعت پیوند دهی فضای تشکیل پیوندها را کنترل کرده و در نتیجه ساختارهای کریستالی منظم تر را بوجود می آورد. با رصد لایه های تشکیل شده گرافنی در این منطقه می توان دمایی بهینه را پیشنهاد کرد بطوریکه شرایط ایده ال تشکیل نیم لایه پراکنده گرافنی است که نشان دهنده آستانه تشکیل لایه های گرافنی است این مرحله را فرایند هسته زائی می نامیم. سپس وارد مرحله دما پایین راکتور می شویم که شرایط رشد صفحه گرافنی مهیا می شود. دمایی این ناحیه نقش کلیدی دارد چراکه اگر از حد مجاز کمتر باشد فرایند پیوند زنی مولکول های کربن فراهم نمی شود و در دماهای بالا نیز ارتعاشات ناشی از حرارت مانع از برقراری پیوند می شود در نتیجه محدوده دمایی ۸۰۰ درجه سانتیگراد برای این مرحله پیشنهاد می شود. در مرحله سرمایش با کاهش دمایی راکتور ضمن تثبیت پیوندهای برقرار شده بر سطح سیلیکا فراهم خروج لایه گرافنی نیز فراهم می شود دیگرام موجود در شکل (۵) مراحل رشد گرافن را توصیف می کند.



8. R. Jaaniso, T. Kahro, J. Kozlova, J. Aarik, Sensors and Actuators B, 190, 1006–1013, (2014).
9. Z. Ni, Y. Wang, T. Yu, Z. Shen, Nano Res., 1, 273–291, (2010).
10. N. Tajima, T. Kaneko, J. Nara, T. Ohno, Surface Science, 653, 123–129, (2016).
11. Y. Chen, X. Zhang, E. Liu, C. He, Journal of Alloys and Compounds, 688, 69–76, (2016).
12. J. Zhao, S. Pei, W. Ren, L. Gao, ACS Nano, 4, No. 9, 5245–5252, (2010).
13. T. Ohta, A. Bostwick, T. Seyller, K. Horn, Rotenberg E., Science, 313, (2006), 951–954.
14. B. Liu, D.M. Tang, C. Sun, C. Liu, J. Am. Chem. Soc., 133, 197–199, (2011).
15. S.P. Koenig, N.G. Boddeti, M.L. Dunn, J.S. Bunch, Nat. Nanotechnol., 6, 543–546, (2011).
16. S. Bhaviripudi, M.S. Dresselhaus, J. Kong, M Nano Lett., 10, 4128–4133, (2010).