

سنتز و بررسی ویژگی‌های الکتریکی گرافن سه بعدی

فاطمه دبیر^۱، رسول صراف ماموری*^۱، نسترن ریاحی نوری^۲، ادوین هنگ تانگ تنو^۳، مانوئلا لبلین^۳

^۱ دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مواد، گروه سرامیک، تهران، ایران.

^۲ پژوهشگاه نیرو، گروه مواد غیر فلزی، تهران، ایران.

^۳ دانشگاه صنعتی نایانگ، سنگاپور.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۴/۰۴/۰۱، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۴/۰۶/۰۸، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۴/۰۷/۰۵

چکیده در این پژوهش گرافن سه بعدی با روش CVD^۱ حرارتی و با استفاده از الگوی نیکل در یک کوره لوله‌ای سنتز شد. این روش شامل رشد گرافن بر روی الگوی نیکل با استفاده از گازهای Ar و H₂ و پیش ماده کربنی اتانول و سپس حذف الگوی نیکل با استفاده از اچ شیمیایی می‌باشد. در نهایت گرافن سنتز شده با استفاده از آنالیزهای XRD، SEM و Raman مورد مشخصه‌یابی قرار گرفت. هدایت الکتریکی و تابع کار آن نیز به ترتیب با روش‌های Van der Pauw و UPS^۲ تعیین گردیدند. نتایج نشان دهنده تشکیل گرافن سه بعدی با تخلخل بسیار بالا و کیفیت مطلوب بودند. هدایت الکتریکی و تابع کار آن نیز به ترتیب ۴^۱ و ۵ eV اندازه‌گیری شدند.

کلمات کلیدی: گرافن، سه بعدی، هدایت الکتریکی، تابع کار، CVD.

Synthesis and Electrical Properties Evaluation of Three-Dimensional Graphene

Fatemeh Dabir¹, Rasoul Sarraf-Mamoory*¹, Nastaran Riahi-Noori², Manuela Loeblein³, Edwin Hang Tong Teo³

¹Tarbiat Modares University, Faculty of Engineering and Technology, Tehran, Iran.

²Niroo Research Institute, Chemistry and Materials Research Center, Tehran, Iran.

³Nanyang Technological University, Singapore

Abstract In this research, three-dimensional graphene (3DG) was synthesized via thermal CVD method by using nickel foam in a tube furnace. This method consists of graphene growth on the nickel foam using Ar and H₂ gases and ethanol carbon precursor, followed by removal of nickel foam by chemical etching. Finally, the synthesized graphene was characterized by XRD, SEM and Raman analyses. The electrical conductivity and work function of 3DG were determined by Van der Pauw method and UPS technique, respectively. The results indicated that the high porosity and good quality three-dimensional graphene was formed. The electrical conductivity and work function of 3DG were measured 4 s.cm⁻¹ and 5 eV, respectively.

Keywords: Three-Dimensional Graphene, Electrical Conductivity, Work Function, CVD.

۱- مقدمه

بعدی به چشم می خورد.

گرافن با یک آرایش هگزاگونال دوبعدی از اتمهای کربن، بخش وسیعی از تحقیقات حوزه علم مواد را به علت ویژگیهای منحصر به فرد فیزیکی و شیمیایی به خود اختصاص داده است. از جمله ویژگیهای برجسته گرافن می توان به مدول یانگ بالا، مقاومت بالا در برابر شکست، رسانایی حرارتی و الکتریکی خوب و تحرک پذیری بالای حامل های بار اشاره کرد [۱].

یکی از مهم ترین چالش ها در زمینه گرافن دو بعدی، استفاده از آن در شبکه های بالک سه بعدی ضمن حفظ خواص و ویژگی های منحصر به فرد آن می باشد. زیرا لایه های گرافن دوبعدی به علت نیروی واندروالسی زیاد ناشی از سطح ویژه بالا، تمایل به اتصال به هم و اگرگیت شدن دارند [۲]. در نتیجه، اخیراً گرافن سه بعدی ($3DG^1$) به عنوان یک ماده بسیار سبک و متخلخل با سطح ویژه زیاد معرفی شده و به خاطر دارا بودن ویژگی هایی مثل رسانایی الکتریکی بالا، پایداری شیمیایی و خواص مکانیکی برجسته کاربردهای فراوانی در زمینه های مختلف تحقیقاتی و صنعتی پیدا کرده است [۳]. از جمله این کاربردها می توان حسگرها [۴]، سلول های سوختی [۵]، باتری ها [۶] و سلول های الکتروشیمیایی [۷] را عنوان کرد.

یکی از روش ها برای سنتز گرافن سه بعدی، CVD حرارتی می باشد. این روش شامل رشد گرافن بر روی یک الگوی فلز انتقالی مثل نیکل یا مس و سپس حذف الگوی فلزی با اچ کردن شیمیایی می باشد. در این فرآیند الگوی فلزی متخلخل در دمای بالا در معرض گازهای هیدروکربنی مثل CH_4 قرار می گیرد.

در این پژوهش گرافن سه بعدی با استفاده از روش CVD حرارتی بر روی الگوی نیکل رشد داده شد، اما به جای استفاده از گازهای هیدروکربنی، از بخارهای اتانول به عنوان منبع کربن استفاده گردید که گزارش های اندکی در مورد آن وجود دارد. سپس به مشخصه یابی گرافن سه بعدی سنتز شده و اندازه گیری ویژگی های الکتریکی آن پرداخته شد. زیرا علی رغم وجود تحقیقات زیاد راجع به ویژگی های الکتریکی گرافن دوبعدی، کمبود این گونه مطالعات در مورد گرافن سه

۲- روش تحقیق

الگوی نیکل به ضخامت ۵ mm به عنوان زیرلایه انتخاب و در کوره لوله ای تحت جریان گازهای Ar و H_2 تا دمای $1000^\circ C$ گرم شد. بعد از رسیدن به این دما، گازهای حامل Ar و H_2 وارد مخزن اتانول شده و با ایجاد حباب هایی در مخزن اتانول، بخارهای آن را با خود وارد محفظه واکنش (کوره لوله ای) کردند. این فرآیند ۱۰ دقیقه به طول انجامید. سپس الگوی نیکل دارای پوشش گرافن، داخل محلول $PMMA^2$ غوطه ور شد. این کار به منظور حفاظت ساختار گرافن در طی مراحل بعدی می باشد. برای حذف نیکل، الگوی دارای پوشش گرافن و $PMMA$ ، در محلول HCl داغ ($80^\circ C$) به مدت ۳ ساعت قرار گرفت. پس از حذف نیکل و آب شویی، در نهایت فوم گرافن سه بعدی با انحلال پوشش $PMMA$ با استون گرم ($60^\circ C$) به دست آمد.

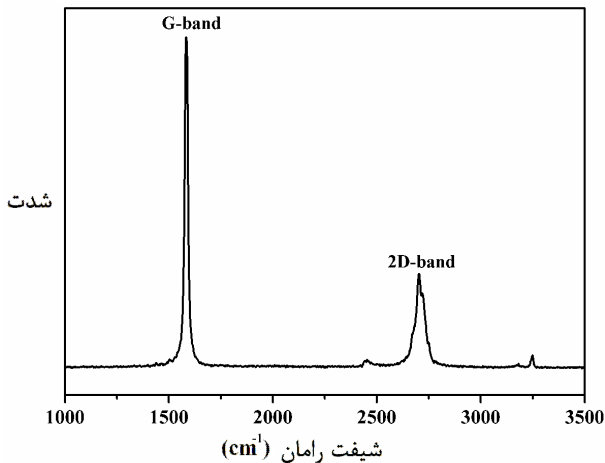
به منظور انجام مشخصه یابی، گرافن سه بعدی سنتز شده تحت آنالیزهای SEM و Raman قرار گرفت. برای به دست آوردن طیف Raman از لیزر یون آرگون با طول موج 532 nm استفاده شد. هدایت الکتریکی و تابع کار گرافن سه بعدی نیز به ترتیب با روش های Van der Pauw و UPS اندازه گیری گردید. برای انجام آزمون Van der Pauw، چهار ردیاب در ۴ نقطه مختلف از لبه نمونه قرار گرفتند و جریان $5-1 \times 10$ آمپر بین دو تا از ردیاب ها اعمال شد و ولتاژ بین دو ردیاب دیگر اندازه گیری گردید. برای دقت بیشتر، این تست ۸ بار مختلف تکرار و در هر تست، دو ردیابی که جریان بین آنها اعمال می شد، متفاوت بودند. برای اندازه گیری تابع کار، طیف UPS با استفاده از تابش لامپ هلیوم با انرژی $21/2\text{ eV}$ به دست آمد و طوری تنظیم شد که انرژی تراز فرمی در صفر الکترون ولت قرار گیرد.

۳- نتایج و بحث

شکل (۱) تصویر SEM سطح گرافن سه بعدی سنتز شده با روش CVD را نشان می دهد. با توجه به این شکل،

² Poly methyl meta acrylate

¹Three-Dimensional Graphene

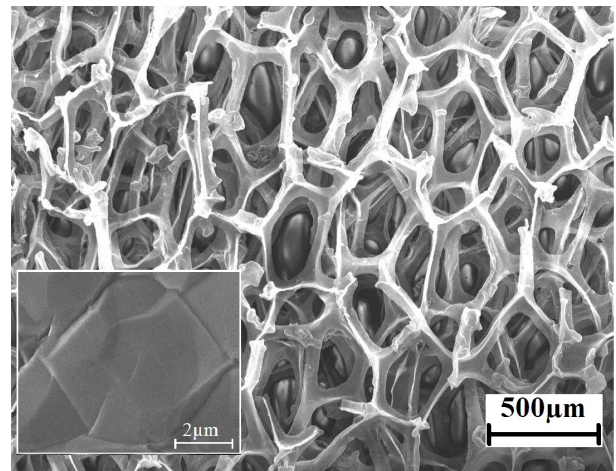


شکل ۲. طیف رامان گرافن سه بعدی سنتز شده.

پیک‌های قرار گرفته در 1590 cm^{-1} و 2700 cm^{-1} به ترتیب مربوط به باندهای G و 2D گرافن می‌باشد. باند G ناشی از ارتعاش‌های اتم‌های کربن با هیبریداسیون sp^2 بر روی صفحه دوبعدی گرافن است. دلیل بروز باند 2D، فرآیند ارتعاش دو فونون با مومنتوم^۳ مخالف در شبکه گرافن می‌باشد [۱۰]. عدم حضور پیک D در حدود 1350 cm^{-1} نشان دهنده کیفیت بالای گرافن سنتز شده بوده، زیرا پیک D بیانگر حضور عیوب در ساختار گرافن است. مطابق با طیف رامان، شدت پیک G بالاتر از شدت پیک 2D بوده که این امر نشان دهنده ساختار چند لایه‌ای گرافن سنتز شده می‌باشد. در گرافن تک لایه، شدت پیک 2D بالاتر خواهد بود. موقعیت باند G با تغییر تعداد لایه‌های گرافن تغییر می‌یابد به طوری که با کاهش تعداد لایه‌ها باند G به سمت انرژی‌های بالاتر صعود پیدا می‌کند [۱۱]. با توجه به گزارش‌های موجود، موقعیت باند G در نمونه گرافیت خالص 1580 cm^{-1} و در نمونه گرافن تک لایه 1587 cm^{-1} می‌باشد [۱۰]. در حالی که برای گرافن سنتز شده در این پژوهش این عدد برابر با $1582/63\text{ cm}^{-1}$ می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که گرافن سه بعدی سنتز شده در این پژوهش، ساختار چندلایه^۴ با کیفیت بالا و بدون عیوب دارد. شکل و موقعیت باند 2D نیز به تعداد لایه‌های گرافن حساس است و با افزایش تعداد لایه‌ها باند 2D به سمت انرژی‌های بالاتر صعود پیدا کرده و شکل آن حالت نامتقارن پیدا می‌کند، زیرا با افزایش تعداد لایه‌ها تقارن ساختار کاهش پیدا می‌کند

گرافن سه بعدی سنتز شده ماهیت بسیار متخلخل دارد. در واقع گرافن سه بعدی ساختار متخلخل الگوی نیکل را به خود گرفته است. درصد بالای تخلخل منجر به سطح ویژه بسیار بالا و ساختار بسیار سبک گرافن سه بعدی می‌شود.

با توجه به تصویر SEM با بزرگنمایی بالاتر داخل شکل (۱)، سطح گرافن ناهموار بوده و دارای چین‌ها و موج‌هایی می‌باشد که به علت اختلاف ضریب‌های انبساط حرارتی بین الگوی نیکل و گرافن طی مرحله سرد کردن نمونه در کوره ایجاد شده‌اند. در طول فرآیند سرد کردن، به علت وجود اختلاف در ضریب‌های انبساط حرارتی بین پوشش گرافن و زیرلایه نیکل، گرافن دچار تنش حرارتی می‌شود. تشکیل چین و موج‌ها بر روی سطح گرافن موجب رها شدن تنش‌های حرارتی می‌گردد. ایجاد ناهمواری‌های سطحی در طول فرآیند CVD، سطح ویژه فوم گرافن را افزایش داده و به بهبود خواص مکانیکی آن منجر خواهد شد [۸ و ۹].



شکل ۱. تصویر SEM سطح گرافن سه بعدی سنتز شده با روش CVD.

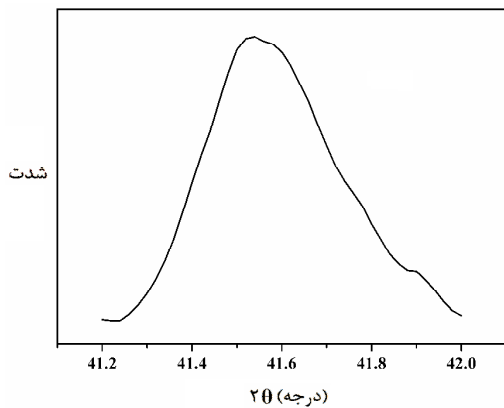
شکل (۲) طیف رامان گرافن سه بعدی سنتز شده را نشان می‌دهد. طیف سنجی رامان یکی از ابزار قدرتمند و دقیق برای شناخت ساختارهای پایه کربنی است که اطلاعات زیادی را در مورد ساختار آنها به دست می‌دهد.

³ Momentum
⁴ Multi Layer

¹ Wrinkle
² Ripple

شکل (۴)، پیک (۱۰۰) در زاویه 2θ برابر با $41/57^\circ$ ظاهر شده و دارای پهنای $0/35^\circ$ می‌باشد. بنابراین، اندازه بلورکها داخل صفحه دو بعدی گرافن با استفاده از رابطه (۲)، حدود $49/65 \pm 2/85$ تخمین زده شد. این عدد در مقایسه با L_a به دست آمده از ساختارهای گرافنی دارای عیوب [۱۳]، بزرگتر است که در توافق با برقراری رابطه عکس بین نسبت I_D/I_G و L_a (رابطه ۱) می‌باشد.

$$L_a = \frac{1.84\lambda}{\beta_{100} \cos \theta} \quad \text{معادله (۲)}$$



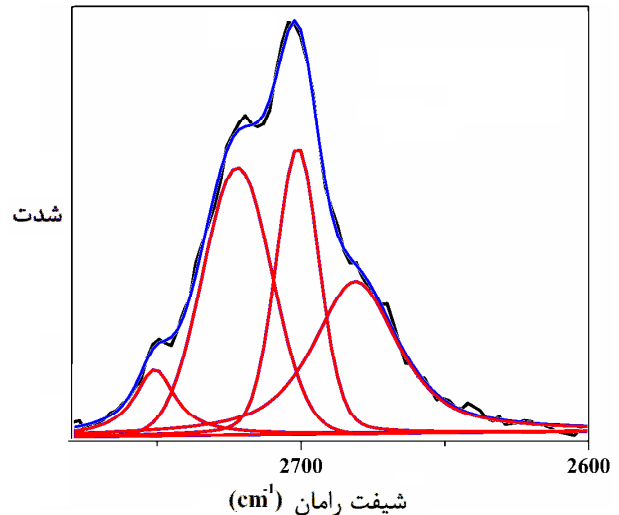
شکل ۴. الگوی XRD نمونه 3DG در محدوده $(41-42)^\circ$.

یکی دیگر از ویژگی‌های برجسته گرافن، رسانایی الکتریکی بالای آن می‌باشد که ناشی از حضور یک الکترون آزاد به ازای هر اتم کربن در شبکه آن می‌باشد. مقاومت الکتریکی ویژه (ρ) گرافن سه بعدی سنتز شده در این پژوهش با استفاده از روش Van der Pauw، $0/25 \Omega.cm$ ، اندازه‌گیری شد که طبق رابطه (۱)، برابر با هدایت الکتریکی $4 s.cm^{-1}$ (σ) می‌باشد. این عدد نشان دهنده رسانایی الکتریکی بالای گرافن سنتز شده می‌باشد. در رابطه (۳)، L طول، A سطح (ضخامت \times عرض) و R مقاومت الکتریکی فوم گرافن سه بعدی می‌باشند.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{RA} \quad \text{معادله (۳)}$$

در کار ارائه شده توسط Chen و همکاران [۷]، مقدار هدایت الکتریکی برای فوم گرافن سه بعدی ۹ لایه، $7 s.cm^{-1}$

[۱۲]. شکل (۳) طیف رامان متمرکز شده بر روی باند 2D را برای نمونه 3DG سنتز شده در این پژوهش نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، باند 2D حالت نامتقارن دارد و به چند پیک جداگانه تفکیک شده که بیانگر چند لایه‌ای بودن فوم گرافن سنتز شده می‌باشد.



شکل ۳. طیف رامان متمرکز شده بر روی باند 2D نمونه 3DG.

در ساختارهای گرافنی دارای عیوب، که در طیف رامان آن‌ها پیک D ظاهر می‌شود، می‌توان از روی نسبت شدت پیک D به پیک G (I_D/I_G)، اندازه بلورک گرافن در داخل صفحه (L_a) را تخمین زد. از آنجایی که وجود عیوب باعث جلوگیری از رشد بلورک‌های گرافن می‌شود، بین اندازه بلورک در داخل صفحه و نسبت I_D/I_G رابطه عکس وجود دارد (رابطه ۱) [۱۳]. در این رابطه، λ طول موج لیزر مورد استفاده در رامان است.

$$L_a (nm) = (2.4 \times 10^{-10}) \lambda_{laser}^4 \left(\frac{I_D}{I_G} \right)^{-1} \quad \text{معادله (۱)}$$

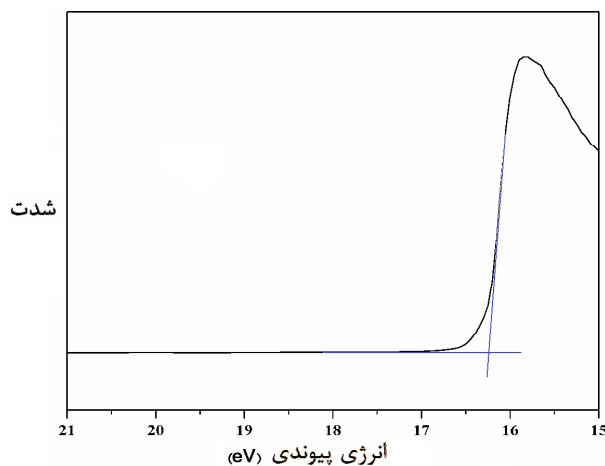
با توجه به این که نمونه 3DG سنتز شده در این پژوهش، فاقد پیک D در طیف رامان خود بود (شکل ۲)، اندازه بلورک آن (L_a) توسط رابطه شرر (رابطه ۲) و با استفاده از پیک (۱۰۰) تخمین زده شد [۱۴]. در رابطه (۲)، λ طول موج پرتو ایکس، β پهنای پیک و θ موقعیت پراش است. در شکل (۴) پیک ظاهر شده در محدوده 2θ برابر با $(41-42)^\circ$ که شامل پیک (۱۰۰) است، مشاهده می‌شود. با توجه به

آوردن E_{th} ، از برون‌یابی خطی منحنی در آستانه منطقه الکترون‌های ثانویه و تقاطع آن با زمینه طیف استفاده شد. انرژی E_{th} ، $16/2$ eV به دست آمد که مطابق با تابع کار برابر با 5 eV می‌باشد.

$$\phi = hv - (E_{th} - E_F) \quad \text{معادله (۴)}$$

در مراجع تابع کار برای گرافن تک لایه بر روی زیرلایه SiO_2 در حدود $4/57$ eV و برای گرافن دولایه‌ای $4/69$ eV گزارش شده است [۱۸]. با توجه به چندلایه‌ای بودن گرافن سه بعدی سنتز شده و به دست آوردن عدد بزرگتر برای تابع کار آن نسبت به گرافن تک لایه، می‌توان نتیجه گرفت که تابع کار گرافن به تعداد لایه‌های آن وابسته است و با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش نشان می‌دهد.

از آنجایی که گرافن سه بعدی را می‌توان در کاربردهای الکترونیکی در تماس با مواد دیگر به کار برد، باید توجه داشت که برای انتقال الکترونی هموار از گرافن سه بعدی سنتز شده در این پژوهش، به ماده‌ای دیگر در تماس با آن، تابع کار ماده دوم باید بالاتر از 5 eV باشد.



شکل ۵. منحنی UPS گرافن سه بعدی سنتز شده در منطقه الکترون‌های ثانویه.

شکل (۵) طیف UPS گرافن سه بعدی سنتز شده را در نزدیکی لبه فرمی و در منطقه $(0-15)$ الکترون-ولت نشان می‌دهد. با توجه به طیف UPS در این منطقه، می‌توان اطلاعاتی راجع به نوار ظرفیت فوم گرافن به دست آورد. در این شکل یک پیک اصلی در نزدیکی منطقه الکترون‌های ثانویه و در 5 eV

گزارش شده است. به نظر می‌رسد که علت تفاوت مشاهده شده در نتایج هدایت الکتریکی به اختلاف در تعداد لایه‌های فوم گرافن سنتز شده و ضخامت آن برمی‌گردد. فوم گرافن سه بعدی سنتز شده در پژوهش حاضر شامل 29 لایه گرافن می‌باشد. با افزایش تعداد لایه‌های گرافن، ضخامت فوم گرافن افزایش و مقاومت الکتریکی آن کاهش می‌یابد. اما با توجه به رابطه (۳) و به علت اثر متضاد افزایش تعداد لایه‌ها بر دو عامل مقاومت الکتریکی (R) و ضخامت فوم گرافن، ضریب هدایت الکتریکی (σ) تغییر یکنواخت با افزایش تعداد لایه‌ها نشان نمی‌دهد.

در مراجع گزارش شده که گرافن تک لایه یک ماده با گاف انرژی^۱ صفر است، اما با افزایش تعداد لایه‌های گرافن، گاف انرژی در ساختار آن ایجاد می‌شود به طوری که تفاوت مقدار گاف انرژی گرافن دارای بیشتر از 11 لایه با گاف انرژی گرافیت (40 meV)، کمتر از 10% می‌باشد [۱۵ و ۱۶]. بنابراین، با توجه به تعداد 29 لایه گرافن برای 3DG سنتز شده در این پژوهش، گاف انرژی آن باید نزدیک به گاف انرژی گرافیت (40 meV) باشد که این مقدار کم گاف انرژی نشان دهنده رفتار شبه فلزی 3DG و توجیه کننده رسانایی الکتریکی بالای آن نیز می‌باشد.

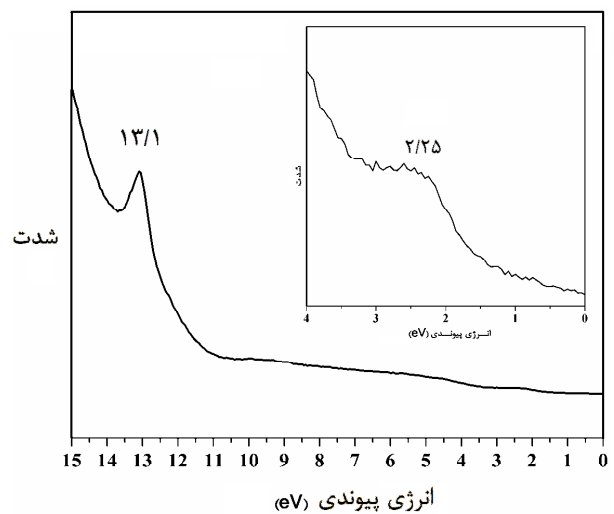
تابع کار یکی از پارامترهای مهم برای مواد رسانا مثل فلزات می‌باشد که به صورت کمترین انرژی مورد نیاز برای کندن الکترون از تراز فرمی و آزاد کردن آن تعریف می‌شود. موقعی که یک ماده رسانا در تماس با مواد دیگر باشد، پارامتر تابع کار برای فرآیندهای انتقال الکترونی از ماده‌ای به ماده دیگر اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری تابع کار مواد وجود دارد. با توجه به این که، استفاده از طیف سنجی UPS یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری تابع کار می‌باشد [۱۷]، شکل (۴) طیف UPS گرافن سه بعدی سنتز شده را در منطقه الکترون‌های ثانویه و در منطقه $(21-15)$ الکترون-ولت نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری تابع کار از روی طیف UPS از رابطه (۴) استفاده شد. در این رابطه، Φ تابع کار، hv انرژی فوتون تابیده برای تهییج الکترون ($21/2$ eV)، E_{th} انرژی آستانه الکترون‌های ثانویه و E_F انرژی تراز فرمی می‌باشد [۱۲]. برای به دست

¹ Band Gap

مراجع

1. Katsnelson, M. I., "Graphene: carbon in two dimensions", *Materials today*, 2007, 10 (1-2).
2. Chen G., Liu Y., Liu F., Zhang X., "Fabrication of three-dimensional graphene foam with high electrical conductivity and large adsorption capability", *Applied Surface Science*, 2014, 311, 808-815.
3. Yavari, F., Chen, Z., Thomas, A. V., Ren, W., Cheng, H. M., Koratkar, N., "High Sensitivity Gas Detection Using a Macroscopic Three - Dimensional Graphene Foam Network", *Scientific Reports*, 2011, Article number:166.
4. Maiyalagan, T., Dong, X., Chen, P., Wang, X., "Electrodeposited Pt on three-dimensional interconnected graphene as a free-standing electrode for fuel cell application", *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22, 5286-5290.
5. Ji, H. X., Zhang, L. L., Pettes, M. T., Li, H. F., Chen, S. S., Shi, L., Piner, R., Ruoff, R. S., "Ultra-Thin Graphite Foam: A Three-Dimensional Conductive Network for Battery Electrodes", *Nano Letters*, 2012, 12, 2446-2451.
6. Wu, Z. S., Sun, Y., Tan, Y. Z., Yang, S., Feng, X., Müllen, K., "Three-Dimensional Graphene-Based Macro and Mesoporous Frameworks for High-Performance Electrochemical Capacitive Energy Storage", *Journal of American Chemistry Society*, 2012, 134 (48), 19532-19535.
7. Chen, Z., Ren, W., Gao, L., Liu, B., Pei, S., Cheng, H. M., "Three-dimensional flexible and conductive interconnected graphene networks grown by chemical vapour deposition", *Nature Materials*, 2011, 10, 424-428.
8. Bello, A., Fabiane, M., Dodo-Arhin, D., Ozoemena K.I., Manyala, N., "Silver Nanoparticles Decorated on a Three-Dimensional Graphene Scaffold for Electrochemical Applications", *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2014, 75, 109-114.
9. Chae, S.J., Güneş, F., Kim, K.K., Kim, E.S., Han, G.H., Kim, S.M., Shin, H.J., Yoon, S., Choi, J., Park, M.H., Yang, C.W., Pribat, D., Lee, Y.H., "Synthesis of Large-Area Graphene Layers on Poly-Nickel Substrate by Chemical Vapor Deposition: Wrinkle Formation", *Advanced Materials*, 2009, 21, 2328-2333.
10. Ferrari A. C., "Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron-phonon coupling, doping and nonadiabatic effects", *Solid State Communication*, 2007, 143, 47-57.
11. Subrahmanyam K. S., Vivekchand S. R. C., Govindaraj A., Rao C. N. R., "A study of graphenes prepared by different methods: characterization, properties and solubilization", *Journal of Materials Chemistry*, 2008, 18, 1517-1523.
12. Yoon D., Moon H., Cheong H., "Variations in the Raman Spectrum as a Function of the Number of Graphene Layers", *Journal of Korean Physics Society*, 2009, 55, 1299-1303.
13. Caçado L. G., Takai K., Enoki T., "General equation for the determination of the crystallite size L_a of nanographite by Raman spectroscopy", *Applied Physics Letters*, 2006, 88, 163106.
14. Chowdhury D. R., Singh C., Pau A., "Role of graphite precursor and sodium nitrate in graphite oxide synthesis", *RSC Advances*, 2014, 4, 15138.
15. Partoens B., Peeters F. M., "From graphene to graphite: Electronic structure around the K point", *Physical Review B*, 2006, 74, 075404.
16. García N., Esquinazi P., Barzola-Quiquia J., Dusari S., "Evidence for semiconducting behavior with a narrow

۱۳/۱ دیده می‌شود. این پیک ناشی از فوتوالکترون‌های ثانویه^۱ پراکنده شده داخل ترازهای اشغال نشده^۲ گرافن می‌باشد. حضور این پیک تاییدی بر وجود حلقه‌های کربنی در ساختار فوم گرافن می‌باشد. برای بررسی دقیق‌تر طیف UPS در نزدیکی لبه فرمی، ناحیه (۴-۰) الکترون-ولت به صورت بزرگتر در شکل (۵) ارائه شده است. در این ناحیه یک پیک در حدود ۲/۲۵ eV قابل مشاهده است که به فوتوالکترون‌های نشر پیدا کرده از تراز $2p-\pi$ کربن اختصاص دارد. وجود این پیک نشان دهنده ساختار لایه‌ای گرافن می‌باشد [۱۹].



شکل ۶. طیف UPS گرافن سه بعدی سنتز شده در نزدیکی لبه فرمی.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، گرافن سه بعدی با روش CVD حرارتی و با استفاده از فوم نیکل به عنوان شابلون و اتانول به عنوان منبع کربن، سنتز شد. تصاویر SEM ماهیت بسیار متخلخل گرافن سه بعدی سنتز شده را آشکار کرد. در ضمن سطح گرافن سه بعدی ناهموار و دارای چین‌ها و موج‌هایی بود. نتایج طیف رامان تایید کننده تشکیل گرافن چندلایه و بدون عیب بود. مقاومت الکتریکی گرافن سه بعدی $0.25 \Omega \cdot \text{cm}$ به دست آمد که نشان دهنده رسانایی الکتریکی مناسب آن می‌باشد. تابع کار 3DG با استفاده از UPS، ۵ eV اندازه‌گیری گردید که بیانگر انتقال الکترونی هموار از 3DG به موادی با تابع کار بالاتر از ۵ eV می‌باشد.

¹ Secondary Photoelectrons

² Unoccupied States

18. Misra A. Waikar M. , Gour A. , Kalita H. , Khare M. , "Aslam M., Kottantharayil A., Work function tuning and improved gate dielectric reliability with multilayer graphene as a gate electrode for metal oxide semiconductor field effect device applications", *Applied Physics Letter*, 2012, 100, 233506.
19. Sherpa S. D. , Paniagua S. A. , Levitin G. , Marder S. R. , "Williams M. D., Photoelectron spectroscopy studies of plasma-fluorinated epitaxial grapheme", *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2012, B 30, 03D102.
- band gap of Bernal graphite", *New Journal of Physics*, 2012, 14, 053015.
17. Chandramohan S. , Kang J. H. , Katharria Y. S. , Han N. , Beak Y. S. , Ko K. B. , Park J. , Ryu B. D. , Kim H. K. , Suh E. K. , Hong C. H. , "Chemically modified multilayer graphene with metal interlayer as an efficient current spreading electrode for InGaN/GaN blue light-emitting diodes", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, 45, 145101.