

Design and Fabrication of Flexible Graphene Electrode with Visible Laser

Hedieh Pazokian^{*1}, Maryam Bahreini² and Fateme Rajabi³

Abstract

In this paper, the fabrication of graphene electrodes on Polyimide film with laser induced graphene phenomenon was investigated. For this purpose, a visible laser with a wavelength of 445 nm was used to create graphene on the surface. The formation of the graphene on the surface following irradiation was tested by Raman spectroscopy and X-ray diffraction of the irradiated sample. An electrical multimeter and a scanning electron microscope were used to investigate the effect of irradiation parameters such as laser power, laser irradiated lines overlapping, and laser scanning velocity on the electrical resistance and the surface morphology, respectively. The results indicate the formation of porous graphene with different structures on the surface by the laser laser-induced graphene phenomenon. The minimum electrical resistance of ~80 ohms was achieved with a specific irradiation condition. However, surface morphology is an important parameter affecting the quality of the electrodes in many applications, such as energy storage devices. According to this research, the irradiation conditions should be optimized for the formation of an electrode for the desired application.

Keywords: *Laser Induction, Graphene Electrode, Polyimide, Visible Laser*

¹ Associate Professor, Photonics and quantum technologies research school, Nuclear science and technology research institute, Tehran, Iran. (Corresponding Author)(Email: hpazokian@aeoi.org.ir)

² Assistant Professor, Physics department, Iran university of science and technology, Tehran, Iran. (Email: m.bahreini@iust.ac.ir)

³ PhD Student, Physics department, Iran university of science and technology, Tehran, Iran. (Email: fatemeh.rajabi7979@gmail.com)

طراحی و ساخت الکترودهای انعطاف پذیر گرافنی با تابش لیزر مرئی

هدیه پاکیان^۱، مریم بحرینی^۲، فاطمه رجبی^۳

چکیده:

در این مقاله ساخت الکترودهای گرافنی بر روی فیلم پلی ایمید با پدیده القای لیزری گرافن مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از لیزر مرئی با طول موج ۴۴۵ نانومتر برای ایجاد گرافن در سطح استفاده شد. تشکیل گرافن بر روی سطح پس از تابش با استفاده از طیف سنجی رامان و پراش اشعه ایکس نمونه تابیده شده مورد آزمایش قرار گرفت. یک مولتی متر الکتریکی و یک میکروسکوپ الکترونی روبشی برای بررسی اثر کمیت های تابش مانند توان لیزر، همپوشانی خطوط تابش داده شده با لیزر و سرعت پایش لیزر، به ترتیب بر مقاومت الکتریکی و ریخت شناسی سطح استفاده شد. نتایج نشان دهنده تشکیل گرافن متخلخل با ساختارهای مختلف بر روی سطح با استفاده از فرآیند القای لیزری گرافن است. کمینه مقاومت الکتریکی ۸۰ اهم با شرایط تابش مشخص بدست آمد. با این حال، از آنجایی که ریخت شناسی سطح کمیت مهمی بر کیفیت الکترودها در بسیاری از کاربردها چون دستگاه های ذخیره ساز انرژی است، و با توجه به نتایج این پژوهش، باید شرایط تابش را برای ایجاد الکترودها با توجه به کاربرد مورد نظر بهینه کرد.

واژگان کلیدی: القای لیزری، الکترودهای گرافنی، پلی ایمید، لیزر مرئی.

^۱ دانشیار، پژوهشکده فوتونیک و فناوری های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، تهران، ایران. (نویسنده مسئول) (رایانامه:

hpazokian@aeoi.org.ir)

^۲ استادیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. (رایانامه: m.bahreini@iust.ac.ir)

^۳ دانشجوی دکتری، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. (رایانامه:

fatemeh.rajabi7979@gmail.com)

۱. مقدمه

از زمان کشف گرافن و پتانسیل‌های الکتریکی و مکانیکی آن از حدود ۱۰ سال پیش تلاش‌های زیادی برای استفاده از آن در فناوری‌های آینده شده است [۶-۱]. گرافن در حقیقت اتم‌های کربن در یک شبکه لانه زنبوری در لایه‌ای به ضخامت یک اتم است که با توجه به ویژگی‌های شگرف، توانایی استفاده در بسیاری از کاربردها مثل ساخت الکترودها، حسگرها، ترانزیستورها و بسیاری موارد دیگر را دارد [۹-۷]. از طرفی با پیشرفت فناوری استفاده از ابزارهای انعطاف‌پذیر و نیز کوچک‌سازی در صنایع مختلف از جمله ابزارهای پوشیدنی و حسگرهای زیستی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. گرافن به دلیل ویژگی‌های الکتریکی و مکانیکی خارق‌العاده و همچنین با توجه به ابعاد آن پتانسیل زیادی برای ساخت الکترودها در چنین کاربردهایی دارد. استفاده از گرافن در حسگرهای حرکت، زیستی و حسگرهای گاز بارها گزارش شده است. باتری‌ها مثال مهم دیگری برای استفاده از گرافن هستند و پیش‌بینی شده است که گرافن بتواند در آینده جایگزین مناسبی برای باتری‌های لیتیوم یونی باشد [۱۰].

امروزه روش‌های مختلفی برای تولید گرافن وجود دارد. اگرچه، به صورت کلی چهار روش برای ساخت الکترودهای گرافنی انعطاف‌پذیر ارائه شده است. این روش‌ها شامل روش سنتز آلی، لایه-برداری اکسید گرافن، رسوب بخار شیمیایی و رشد همبافته است [۱۱]. با این حال این روش‌ها دارای نقص‌هایی مانند نیاز به انرژی زیاد، بازده پایین، هزینه بالا و آلودگی محیطی هستند که کاربردهای صنعتی آن‌ها را محدود می‌کند. به عنوان مثال، گرافن ایجاد شده با لایه‌برداری مکانیکی، رسانایی بسیار بالایی دارد اما از لحاظ اندازه کوچک بوده و دارای شکل نامنظم است. روش القای لیزری گرافن یکی از روش‌هایی است که از سال ۲۰۱۴ برای ایجاد گرافن روی فیلم‌های نازک پلیمری ارائه شده است [۱۲]. لیزر مورد استفاده در این فرآیند لیزر گاز کربنیک با طول موج $10.6 \mu\text{m}$ بود. در این روش فیلم‌های قابل انعطاف پلیمری شامل حلقه‌های کربنی به ویژه پلی‌ایمید با استفاده از لیزر و تحت شرایط ویژه مورد تابش قرار گرفته می‌شود. به این ترتیب در نواحی تابش‌دیده، لایه متخلخل گرافن ایجاد می‌شود که دارای ویژگی‌های منحصر به فرد برای ساخت الکترودهای مورد استفاده در حسگرها، ابرخازن‌ها و غیره است. این فرآیند امروزه جهت ساخت الکترودها در ابزارهای مختلف از جمله ابزارهای ذخیره انرژی و حسگرها بسیار مورد توجه است. این موضوع به دلیل سادگی و هزینه کم این فرآیند نسبت به سایر فرآیندها برای ایجاد

الکترودهای گرافنی بوده و از زمان کشف این فرآیند مواد مختلفی از پارچه تا کاغذ برای این کار استفاده شده‌اند [۱۳ و ۱۴].

با توجه به فرآیندهای درگیر در القای لیزری گرافن، لیزرهایی با طول‌موج‌های متفاوت از مرئی و فرابنفش تا مادون قرمز توانایی ایجاد گرافن با فرآیند القای لیزری را دارند. با این حال کیفیت و روش ایجاد گرافن در آن‌ها می‌تواند تا حدودی متفاوت باشد. با این وجود، در اغلب گزارش‌های اعلام‌شده از لیزر CO₂ با طول‌موج $10.6 \mu\text{m}$ برای این فرآیند استفاده شده‌است. به همین منظور در این مقاله به بررسی ایجاد الکترودهای گرافنی روی پلیمر پلی‌ایمید با استفاده از تابش لیزر با طول‌موج مرئی ۴۴۵ نانومتر پرداخته می‌شود. اثر کمیت‌های مختلف تابش‌دهی شامل توان لیزر، میزان همپوشانی خطوط تابش‌دهی شده و سرعت پایش لیزر در ایجاد گرافن روی نمونه پلی‌ایمید بررسی و بهینه شرایط تابش برای ایجاد الکتروود مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. چیدمان، مواد و روش آزمایش

برای ساخت الکتروود از فیلم‌های پلی‌ایمید با ضخامت ۶۰ میکرون استفاده شده است. نمونه با استفاده از زیرلایه روی لام میکروسکوپ محکم شده و با استفاده از اتانول تمیز شد. سپس با استفاده از یک لیزر دیود با طول‌موج ۴۴۵ nm که روی یک میز متحرک با توانایی جابه‌جایی در راستای X و Y قرار گرفته بود، با شرایط مختلف مورد تابش قرار داده شد. برای بررسی تاثیر کمیت‌های تابش‌دهی بر ویژگی‌های گرافن ایجاد شده، نمونه‌های مستطیل شکل با ابعاد $1 \times 3 \text{ cm}^2$ ، با استفاده از توان، سرعت و تعداد خط تابش‌دهی شده در هر اینچ از عرض نمونه (در راستای Y) که معیاری از میزان مختلف همپوشانی خطوط لیزر است، مورد تابش قرار گرفتند. همچنین با توجه به اینکه بسیاری از انواع حسگرها دارای ساختار سه الکتروودی هستند، تعدادی از شرایط آزمایش برای هر دو ساختار (مستطیلی و سه الکتروودی) مورد بررسی قرار گرفت. پس از تابش‌دهی نمونه‌ها جهت بررسی تغییرات شیمیایی و ریخت‌شناسی با استفاده از طیف‌سنجی رامان و میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور بررسی مقاومت الکتریکی الکترودهای ایجاد شده، مقاومت نمونه‌ها پس از تابش‌دهی با استفاده از یک مولتی‌متر اندازه‌گیری شد. بدین منظور پروب‌های مولتی‌متر در نقاط مختلف سطح و با فاصله مشخص (حدود ۱cm) قرار گرفته و مقاومت سطح ۵ بار در قسمت‌های مختلف سطح با خطای کمتر از ۱۰ اهم اندازه‌گیری شدند.

۳. نتایج

جهت بررسی تاثیر کمیت‌های تابش‌دهی بر ویژگی‌های نمونه، نمونه‌ها با توان‌های مختلف لیزر ۱.۲۵، ۱.۵، ۱.۷۵ و ۲ وات، سرعت اسکن ۸-۱۵ mm/s و میزان همپوشانی مختلف ۲۰، ۲۲۰ و ۲۳۰ خط در اینچ مورد تابش قرار گرفتند. شکل (۱) تصاویر تعدادی از نمونه‌های تابش‌دهی شده برای ایجاد الکتروستاتیکی و ساختار سه الکترودی را نشان می‌دهد.

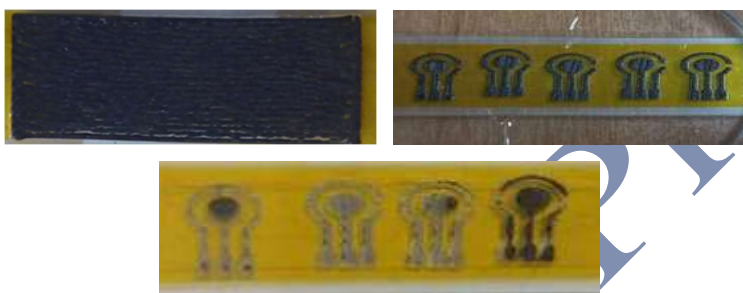


Fig. 1 Optical image of a rectangular electrode and three-electrode patterns created under different irradiation conditions.

شکل ۱ تصویر نوری از یک الکتروستاتیکی و الگوهای سه الکترودی ایجاد شده در شرایط مختلف تابش‌دهی.

همان‌طور که در تصویر مشخص است، سطوح تعدادی از نمونه‌ها بعد از تابش‌دهی کاملاً سیاه شده است. درحالی‌که سطح تعدادی از الگوها به صورت نایک‌نواخت دچار تغییراتی شده‌اند. میزان تغییرات ایجاد شده روی سطح نمونه به میزان زیادی به کمیت‌های تابش‌دهی به‌ویژه توان لیزر و سرعت پایش نمونه دارد. در توان‌های کمتر از ۱ وات، تابش لیزر در محدوده سرعت‌های پایش مورد استفاده در این آزمایش، تنها منجر به ذوب نمونه می‌شود. این توان در حقیقت توان آستانه برای ایجاد گرافن روی سطح نمونه است. با این حال باید بیان داشت که با افزایش سرعت پایش، توان آستانه بالاتری برای ایجاد گرافن نیاز است.

با افزایش توان لیزر و با ایجاد گرافن روی سطح نمونه، سطح شروع به سیاه شدن می‌کند. افزایش بیشتر توان لیزر بالاتر از یک حد مشخص که در این آزمایش حدود ۲ وات است منجر به تخریب سطح نمونه شده و ذرات کنده شده در اطراف نمونه پخش می‌شود.

برای بررسی تغییرات شیمیایی و ایجاد گرافن روی سطح نمونه، یک نمونه تابش‌دهی شده با مقاومت کم با طیف‌سنج رامان مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۲) (الف و ب) به ترتیب طیف رامان و پراش پرتو ایکس گرفته شده از نمونه را نشان می‌دهد.

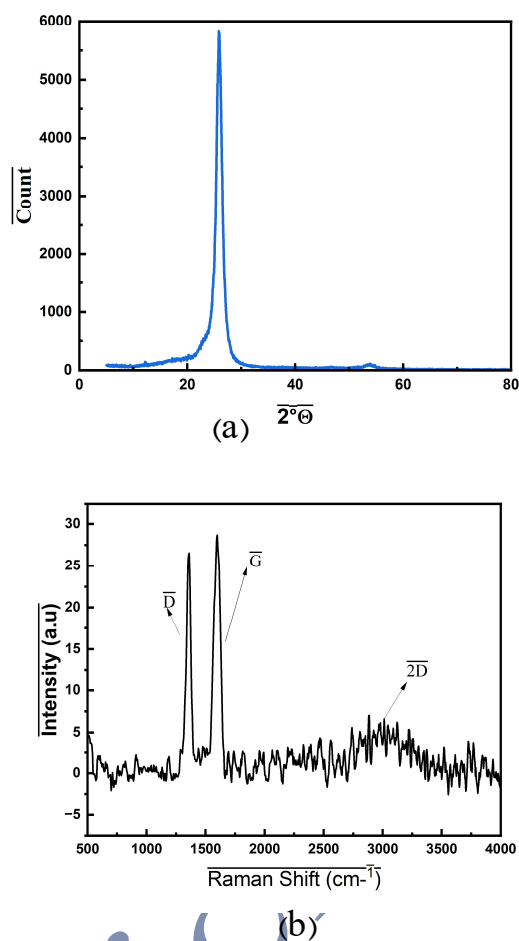


Fig. 2 (a) Raman spectrum, and (b) XRD spectrum taken from the sample irradiated at 1.75 W and scanning speed of 10 mm/s.

شکل ۲ (الف) طیف رامان و (ب) طیف XRD گرفته شده از نمونه تابش داده شده در توان ۱.۷۵ W و سرعت ۱۰ mm/s.

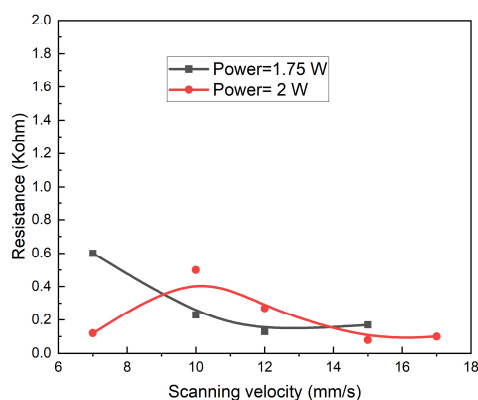
همان طور که در طیف مشخص است، با تابش نمونه در توان ۱.۷۵ W قله گرافن در طول موج های حدود 1360 cm^{-1} ، 1590 cm^{-1} و یک قله پهن حول 2900 cm^{-1} ، که به ترتیب مربوط به قله های D، G و ۲D در گرافن هستند ایجاد می شود. بنابراین این طیف به روشنی ایجاد گرافن روی نمونه را نشان می دهد. نوار D بیانگر نقوص ایجاد شده در نمونه و نوار ۲D، اطلاعاتی از تعداد لایه های گرافن می دهد. هرچند شدت نوار D نشان دهنده ایجاد نقوص در نمونه است، اما پایین بودن نسبت

شدت D به G نشان دهنده کیفیت مناسب گرافن ایجاد شده است. از طرفی پهن بودن قله ۲D و نیز نسبت شدت قله ۲D به G که حدود ۰.۸۵ است، بیانگر ایجاد گرافن چندلایه روی سطح و نوار G بیانگر ارتعاشات کششی پیوند SP^2 اتم‌های کربن است. همچنین همان‌طور که شکل (۲-ب) نشان می‌دهد، طیف XRD نمونه تابش داده شده دارای یک قله تیز در 25.8° و یک قله پهن با شدت پایین در حدود 53° است. قله اول مربوط به صفحات گرافن با شبکه بلوری ۰۰۲ و با فاصله تقریبی ۳.۴ آنگستروم و نشان دهنده درجه بالا گرافیت شدن نمونه، و پیک دوم در اثر ناخالصی‌های موجود در نمونه از جمله ذرات فیلم پلی‌ایمید است. از طرفی تقارن قله ۰۰۲ با دنباله در زوایای کمتر از 25.8° بیانگر افزایش فاصله لایه‌های گرافنی است که به دلیل پخش شدن نقوص در لایه‌های شش ضلعی گرافن ایجاد شده است [۱۲]. اندازه بلوری در امتداد محور ۰۰۲ با استفاده از رابطه (۱) قابل محاسبه است:

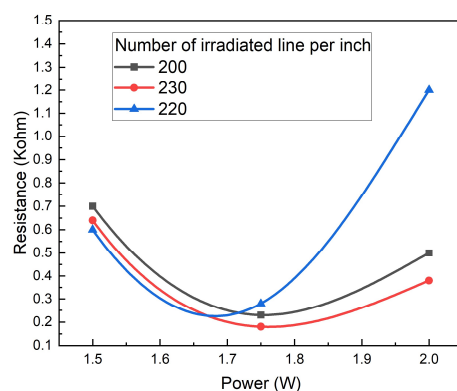
$$L_{002} = \frac{0.89 \lambda}{B_{1/2}(2\theta) \cos(\theta)} \quad (1)$$

که در آن، λ طول موج پرتو X، ۱.۵۴ آنگستروم و $B_{1/2}(2\theta)$ برحسب رادیان، پهنای قله ۰۰۲ در بیشینه موثر است [۱۲]. با استفاده از طیف XRD، L_{002} حدود ۸ نانومتر بدست می‌آید. باید بیان داشت که طیف XRD نمونه‌های با مقاومت بالاتر (در اینجا نشان داده نشده است)، شامل قله‌هایی در محدوده ۱۰-۱۲ nm که بیانگر ایجاد اکسید گرافن در نمونه است.

به منظور بررسی مقاومت الکتریکی الکترودهای ایجاد شده، مقاومت نمونه‌ها پس از تابش دهی با استفاده از مولتی متر اندازه گیری شد. شکل (۳) (الف و ب) به ترتیب نمودار تغییرات مقاومت نمونه برحسب توان‌ها در همپوشانی‌های مختلف، و سرعت‌های پایش مختلف نشان می‌دهد:



(a)



(b)

Fig. 3 Sample resistance in terms of (a) laser power for different number of lines per inch, and (b) scanning speed at two different laser powers.

شکل ۳ نمودار مقاومت نمونه‌ها برحسب (الف) توان لیزر برای تعداد خط در اینچ متفاوت و (ب) سرعت پایش در دو توان مختلف.

فیلم پلی‌ایمید قبل از تابش‌دهی کاملاً نارسا بوده و مقاومت آن بیش از ۹۰ مگا اهم بر سانتی‌متر مربع است. با تابش‌دهی نمونه با توان ۱ وات با میزان متفاوت از همپوشانی خطوط لیزر، تغییری در مقاومت نمونه ایجاد نمی‌شود. درحالی‌که با افزایش توان لیزر به ۱.۵ وات، مقاومت نمونه به شدت کاهش یافته و به حدود ۷۰۰ اهم می‌رسد. میزان این کاهش به میزان همپوشانی خطوط لیزر نیز بستگی داشته و با افزایش میزان همپوشانی بیشتر است. به صورتی که افزایش تعداد خطوط لیزر به میزان ۲۰ خط در اینچ، سبب کاهش ۱۰۰ اهمی در مقاومت نمونه می‌شود. افزایش بیشتر توان لیزر

سبب کاهش بیشتر مقاومت و رسیدن آن به حدود ۲۳۰ اهم می‌شود. با افزایش میزان همپوشانی، مقاومت ابتدا تا حدی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. کاهش مقاومت با افزایش توان ادامه‌دار نبوده و با افزایش توان به ۲ وات مقاومت نمونه شروع به افزایش کرده و دوباره مقاومت نمونه با افزایش همپوشانی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. با این حال میزان تغییرات مقاومت در این توان بسیار بیشتر و حدود ۹۰۰ اهم است. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت توان لیزر به عنوان کمیت اساسی در کاهش مقاومت نمونه می‌باشد.

از طرفی همان‌طور که در شکل (۳-ب) مشخص است، تغییرات مقاومت نمونه به سرعت پایش نیز بستگی دارد. هرچند در نگاه اول در توان‌های بالاتر می‌توان با سرعت‌های پایش بیشتر مقاومت نمونه را کاهش داد، با این حال این کاهش مقاومت با تغییرات سرعت در توان‌های مختلف رفتار یکسانی را از خود نشان نمی‌دهد. به عنوان مثال، همان‌طور که در نمودار مشخص است، در سرعت ثابت 7 mm/s تابش نمونه با توان بالاتر منجر به کاهش مقاومت نمونه تا ۱۲۰ اهم شده است، در حالی که در توان حدود ۱۰٪ پایین‌تر مقاومت نمونه حدود ۶۰۰ اهم است. با افزایش سرعت مقاومت در نمونه تابش داده شده با توان 1.75 W کاهش می‌یابد، اما مقاومت نمونه تابش داده شده با توان کمتر افزایش می‌یابد. این روند تغییر مقاومت با سرعت پایش تا سرعت حدود 14 mm/s ادامه داشته و در سرعت‌های بالاتر معکوس می‌شود. تفاوت مورفولوژی روی سطح در توان‌های مختلف و نیز افزایش توان آستانه مورد نیاز برای ایجاد گرافن روی سطح با افزایش سرعت پایش از دلایل این رفتار متفاوت است.

همان‌طور که اشاره شد، ریخت‌شناسی سطح الکتروود یکی از کمیت‌های مهم در بکارگیری آن در کاربردهای مختلف به ویژه ابزارهای ذخیره انرژی است. به منظور بررسی ساختار ایجاد شده و تغییرات ریخت‌شناسی روی سطح نمونه بعد از تابش در توان‌های مختلف، تعدادی از نمونه‌های با مقاومت پایین با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفتند. شکل (۴) تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های تابش داده شده در توان ۱.۵، ۱.۷۵ و ۲ وات را نشان می‌دهد.

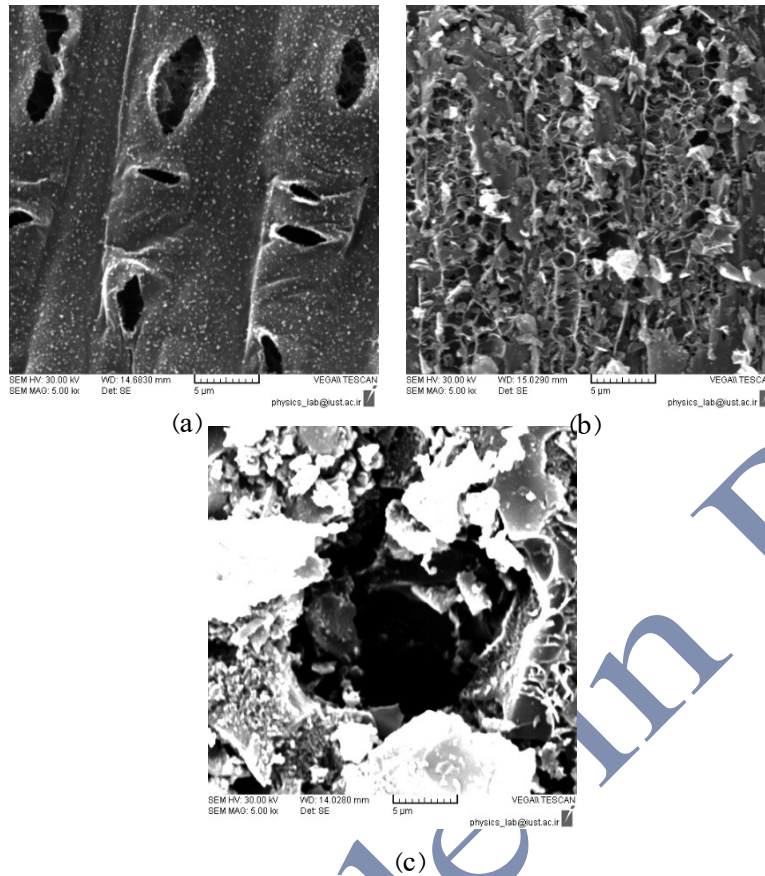


Fig. 4 Electron microscope images of samples irradiated at constant scanning speed and overlap, and laser power of (a) 1.5 W, (b) 1.75 W, and (c) 2 W.

شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های تابش داده شده در سرعت اسکن و همپوشانی ثابت و توان

(الف) ۱.۵ وات،

(ب) ۱.۷۵ وات و (ج) ۲ وات.

همان‌طور که از تصاویر مشخص است، در اثر تابش نمونه در توان ۱.۵ وات، مواد از سطح نمونه کنده شده و در اثر این کندگی ساختار لانه زنبوری در ابعاد زیر ۵ میکرون روی سطح نمونه ایجاد شده است. این ساختار کاملاً متخلخل بوده و به صورت کمابیش یکنواخت روی سطح پخش شده است. با افزایش توان لیزر در ۱.۷۵ وات حفره‌های میکرونی با ابعاد ۵-۱ میکرون در نقاطی از سطح ایجاد شده و ذرات زیرمیکرونی در کل سطح دیده می‌شوند. ایجاد حفره‌های میکرونی روی سطح نمونه می‌تواند ناشی از آزاد شدن گاز حین شکستن و بازترکیب پیوندها در نمونه در اثر برهم‌کنش با

لیزر باشد. به عبارت دیگر تابش لیزر سبب پیرولیز آنی پیش ساز و در نتیجه شکستن و ترکیب دوباره پیوندهای شیمیایی و آزاد شدن گاز می شود. افزایش بیشتر توان تا ۲ وات منجر به کندگی وسیع در سطح نمونه شده و در اثر این کندگی مواد کنده شده روی سطح نمونه پخش شده و ساختاری غیر یکنواخت روی نمونه ایجاد شده است.

۴. بحث

الکترودها از اجزای حیاتی در فرآیندهای الکتروشیمیایی بوده و ماهیت و عملکرد آنها نقش اساسی در به کارگیری آنها دارند. برخی از الکترودها مثل فولاد ضد زنگ و گرافیت سرب مدادی ارزان قیمت هستند، درحالی که برخی دیگر گران بوده و به ساختار پیچیده ای نیاز دارند. به همین دلیل ساخت الکترودهای ارزان قیمت بسیار مورد توجه پژوهشگران بوده است [۱۵]. از طرفی همان طور که در مقدمه بیان شد، امروزه الکترودهای گرافنی با توجه به مزایای زیاد بسیار مورد توجه قرار دارند. با این حال هزینه بالای تولید گرافن مانع از پیشرفت مناسب در این حوزه شده است. برهم-کنش لیزر با ماده به منظور ایجاد ویژگی های منحصر به فرد روی سطح نمونه از زمان ساخت لیزر بسیار مورد توجه بوده است و پژوهشگران بسیاری در این زمینه به بررسی نوع برهم کنش لیزر با ماده در رژیم های مختلف تابش پرداخته اند [۱۶-۱۹]. به صورت کلی برهم کنش لیزر با ماده منجر به دو فرآیند فتوحارتی یا فتوشیمیایی و یا ترکیب هر دو فرآیند می شود. نوع این برهم کنش به ویژه به طول موج لیزر مورد استفاده و میزان جذب ماده مورد نظر در طول موج لیزر دارد. لیزرهای با طول موج کوتاه معمولاً از راه فرآیندهای فتوشیمیایی با نمونه برهم کنش می کنند، در حالی که فرآیند غالب در برهم کنش ماده با طول موج های بلند در محدود مادون قرمز فرآیند حرارتی است. در فرآیند فتوشیمیایی برهم کنش لیزر با ماده به دلیل انرژی کافی فوتون، پیوندهای کوالانسی به صورت مستقیم شکسته می شوند. اما در فرآیندهای حرارتی، برهم کنش لیزر از راه افزایش ارتعاشات در پیوندها با انتقال حرارت منجر به شکستن پیوند می شود. افزایش دما در برهم کنش های حرارتی در طول موج مادون قرمز بسیار زیاد بوده و دما در این فرآیند به صورت محلی و جایگزیده تا چند هزار درجه سانتی گراد افزایش می یابد. این افزایش دما برای شکستن پیوندهای کربنی موجود در پلی ایمید کافی بوده و به آسانی منجر به شکستن آنها می شود [۲۰]. حین فرآیند القای لیزری گرافن در اثر برهم کنش فیلم پلی ایمید با لیزر، بسیاری از پیوندهای C-O، C=O و N=C در پلی ایمید شکسته شده و بعد از بازترکیب به صورت گاز آزاد شده و نانو صفحات گرافن متخلخل با ساختار شبکه های هفت ضلعی و شش ضلعی متشکل از بیش از ۸۵ درصد کربن تولید

می کنند [۹، ۱۱]. باز ترکیب این پیوندها منجر به تشکیل و ایجاد ساختار گرافنی می شود. با این حال سازو کار تشکیل گرافن القا شده با لیزر (LIG) با توجه به طول موج لیزر مورد استفاده متفاوت است. در مورد تابش لیزر مادون قرمز، اثر فتوحرارتی برای توضیح انتقال انرژی پیشنهاد شده است. از سوی دیگر، لیزر ماوراء بنفش به احتمال زیاد سبب ایجاد یک فرآیند فتوشیمیایی می شود. در مورد لیزر مرئی که در این آزمایش از آن استفاده شده است، هر دو اثر فتوحرارتی و فتوشیمیایی به تشکیل LIG کمک می کنند. به عبارت دیگر با تابش لیزر پالسی، اتم های کربن SP^3 روی پلی ایمید به صورت فتوحرارتی و به میزان کمتر فتوشیمیایی به اتم های کربن SP^2 تبدیل می شوند.

صرف نظر از طول موج لیزر مورد استفاده برای ایجاد گرافن روی نمونه، کمیت های تابش دهی شامل توان لیزر، سرعت پایش لیزر یا نمونه و میزان هم پوشانی خطوط تابش دهی شده تاثیر زیادی روی کیفیت و میزان گرافن ایجاد شده روی نمونه و در نتیجه عملکرد الکترودهای ایجاد شده دارند. بنابراین با توجه به امکان تغییر و تنظیم کمیت های تابش دهی در فرآیند القای لیزری گرافن، کنترل ویژگی های سطح الکتروود فرآیندی ممکن و قابل توجه است. در این پژوهش کمینه مقاومت بدست آمده با تنظیم کمیت های تابش دهی حدود ۸۰ اهم است که مربوط به نمونه تابش داده شده در توان ۲ W با سرعت ۱۵ mm/s و تعداد ۲۰۰ خط در هر اینچ از عرض نمونه می باشد. این مقاومت برای استفاده از الکتروود در ابزارهای ذخیره انرژی و حسگرها مناسب بوده و هزینه تولید بسیار کمی دارد. از طرفی نتایج این پژوهش نشان می دهد که تغییرات ریخت شناسی سطح الکتروود که کمیت مهم دیگری در عملکرد الکتروود است، می تواند رفتار متفاوتی با تغییرات مقاومت الکتریکی در شرایط مختلف تابش دهی داشته باشد. با توجه به نتایج بدست آمده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی در شکل (۴) و مقایسه میزان مقاومت بدست آمده برای نمونه های تابش داده شده در توان های مختلف و با سرعت اسکن و هم پوشانی یکسان (به ترتیب ۱۰ و ۲۰۰ خط در اینچ)، سطح نمونه تابش داده شده با توان ۱.۵ W و ۲ W نسبت به نمونه تابش داده شده در توان ۱.۷۵ W دارای ساختار متخلخل متفاوت و با وسعت بیشتری است. همچنین تخلخل ایجاد شده در نمونه تابش داده شده در توان ۱.۵ W بسیار یکنواخت تر از نمونه تابش داده شده در توان ۲ W و مقاومت نمونه تابش داده شده با توان ۱.۷۵ وات از دو نمونه دیگر کمتر است. این تغییرات تاثیر زیادی روی عملکرد الکتروود داشته و بنابراین انتخاب شرایط تابش دهی و همچنین رقابت بین این دو کمیت با توجه به کاربرد مورد نظر بسیار مهم خواهد بود.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله الکترودهای گرافنی با استفاده از فرآیند القای لیزری گرافن با استفاده از لیزر nm ۴۴۵ روی فیلم پلیمر پلی‌ایمید ایجاد شد. در این فرآیند فیلم پلی‌ایمید با استفاده از لیزر در شرایط مختلف، تابش دهی و مورد بررسی قرار گرفت. کمینه مقاومت بدست آمده با تغییر توان، میزان همپوشانی خطوط تابش دهی (تعداد خط در هر اینچ از مساحت ثابتی از نمونه) و سرعت پایش، ۸۰ اهم است. با این حال نتایج نشان می‌دهد که تغییرات ریخت‌شناسی سطح نمونه و به عبارت دیگر افزایش سطح موثر ایجاد شده روی الکتروود در اثر ایجاد ساختار متخلخل لزوماً با کاهش مقاومت در یک راستا نیستند. بنابراین لزوم بررسی و بهینه‌سازی هر کدام از این عوامل برای کاربرد مورد نظر ضروری است.

۶. تقدیر و تشکر

برخود لازم می‌دانیم از زحمات و همکاری جناب آقای محسن منتظرالقائم در انجام آزمایش‌ها سپاسگزاری کنیم.

مراجع

- [1] Li, X., Yu, J., Wageh, S., Al-Ghamdi, A.A. and Xie, J., "Graphene in photocatalysis: a review," *Small*, 12(48), 6640-6696, 2016. <https://doi.org/10.1002/sml.201600382>.
- [2] Stoller, M.D., Park, S., Zhu, Y., An, J. and Ruoff, R.S., "Graphene-based ultracapacitors," *Nano letters*, 8(10), 3498-3502, 2008. <https://doi.org/10.1021/nl802558y>.
- [3] Berry, V., "Impermeability of graphene and its applications," *Carbon*, 62, 1-10, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.05.052>.
- [4] Zhang, Z., Zhu, H., Zhang, W., Zhang, Z., Lu, J., Xu, K., Liu, Y., and Saetang, V., "A review of laser-induced graphene: From experimental and theoretical fabrication processes to emerging applications," *Carbon*, 214, 118356, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118356>.
- [5] Avinash, K. and Patolsky, F., "Laser-induced graphene structures: From synthesis and applications to future prospects," *Materials Today*, 70, 104-136, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2023.10.009>.
- [6] Thaweekulchai, T., Sakdaphetsiri, K., and Schulte, A., "Ten years of laser-induced graphene: Impact and future prospect on biomedical, healthcare, and wearable technology," *Microchimica Acta*, 191, 292, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00604-024-06350-z>.
- [7] Tan, R. K. L., Reeves, S. P., Hashemi, N., Thomas, D. G., Kavak, E., Montazami, R., and Hashemi, N. N., "Graphene as a flexible electrode: review of fabrication approaches," *Journal of Materials Chemistry A*, 5, 17777-17803, 2017. <https://doi.org/10.1039/C7TA05759H>.
- [8] Burke, M., Larrigy, C., Vaughan, E., Paterakis, G., Sygellou, L., Quinn, A. J., Herzog, G. g., Galiotis, C., and Iacopino, D., "Fabrication and electrochemical properties of three-dimensional (3D) porous graphitic and graphenelike electrodes obtained by low-cost direct

- laser writing methods," *ACS omega*, 5, 1540-1548, 2020. <https://doi/full/10.1021/acsomega.9b03418>.
- [9] Yoon, H., Nah, J., Kim, H., Ko, S., Sharifuzzaman, M., Barman, S. C., Xuan, X., Kim, J., and Park, J. Y., "A chemically modified laser-induced porous graphene based flexible and ultrasensitive electrochemical biosensor for sweat glucose detection," *Sensors and Actuators B: Chemical*, 311, 127866, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.127866>.
- [10] Raccichini, R., Varzi, A., Wei, D., and Passerini, S., "Critical insight into the relentless progression toward graphene and graphene-containing materials for lithium-ion battery anodes," *Advanced materials*, 29(11), 1603421, 2017. <https://doi.org/10.1002/adma.201603421>.
- [11] Wang, L., Wang, Z., Bakhtiyari, A. N., and Zheng, H., "A comparative study of laser-induced graphene by CO₂ infrared laser and 355 nm ultraviolet (UV) laser," *Micromachines*, 11(12), 1094, 2020. <https://doi.org/10.3390/mi11121094>.
- [12] Lin, J., Peng, Z., Liu, Y., Ruiz-Zepeda, F., Ye, R., Samuel, E. L., Yacaman, M. J., Yakobson, B. I., and Tour, J. M., "Laser-induced porous graphene films from commercial polymers," *Nature communications*, 5(1), 5714, 2014. <https://doi.org/10.1038/ncomms6714>.
- [13] Chyan, Y., Cohen, J., Wang, W., Zhang, C., and Tour, J. M., "Graphene Art," *ACS Applied Nano Materials*, 2(5), 3007-3011, 2019. <https://doi/abs/10.1021/acsanm.9b00391>.
- [14] Han, X., Ye, R., Chyan, Y., Wang, T., Zhang, C., Shi, L., Zhang, T., Zhao, Y., and Tour, J. M., "Laser-Induced Graphene from Wood Impregnated with Metal Salts and Use in Electrocatalysis," *ACS Applied Nano Materials*, 1(9), 5053-5061, 2018. <https://doi/abs/10.1021/acsanm.8b01163>.
- [15] Shokurov, A. V. and Menon, C., "Laser-Induced Graphene Electrodes for Electrochemistry Education and Research," ed: ACS Publications, 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c01237>.
- [16] Mulser, P. and Bauer, D., "High power laser-matter interaction", *Springer Science & Business Media*, 238, 2010. 10.1007/978-3-540-46065-7.
- [17] Yin, J., Yang, L., Yang, X., Zhu, H., Wang, D., Ke, L., Wang, Z., Wang, G., and Zeng, X., "High-power laser-matter interaction during laser powder bed fusion," *Additive Manufacturing*, 29, 100778, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100778>.
- [18] Kumar, A., Pathak, A., Kumar, A., and Kumar, A., "Physics of laser-matter interaction in laser-based manufacturing," in *Laser-based technologies for sustainable manufacturing*, ed: CRC Press, 45-54, 2023 .
- [19] Malik, H. K., *Laser-matter interaction for radiation and energy*: CRC press, 2021. <https://doi.org/10.1201/b21799>.
- [20] Dreyfus, R., "CN temperatures above laser ablated polyimide," *Applied Physics A*, 55, 335-339, 1992. <https://doi.org/10.1007/BF00324081>.