



سنتز نانوچندسازه rGO/Pt(Nano Star) به عنوان ماده انتقال دهنده حفره در سلول خورشیدی پلیمری

سید مسعود حسینی، لیلا ناجی*، زهرا فخاران

گروه مستقل شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

چکیده: در این پژوهش، نانوچندسازه اکسیدگرافن احیاشده/پلاتین نانوستاره Pt/rGO (NS) به عنوان ماده‌ای جدید برای قرارگیری در لایه انتقال حفره سلول خورشیدی پلیمری و جایگزینی برای پلی (۳، ۴-اتیلن دی اکسی تیوفن): پلی (استایرن سولفونیک اسید) PEDOT:PSS معرفی شده است. نانوچندسازه Pt/rGO(NS) با روش کریستالیزاسیون درجا و با استفاده از فرمیک اسید و بخار اتیلن گلیکول به عنوان احیاکننده سنتز شده است. ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و الکتروشیمیایی نانوچندسازه Pt/rGO(NS) با استفاده از روش‌های FT-IR، XRD، TEM، EIS، CV و J-V مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌های به دست آمده در این پژوهش نشان داد نانوچندسازه Pt/rGO(NS) با مقاومت انتقال بار 138Ω به نسبت PEDOT:PSS با مقاومت انتقال بار 208Ω مقاومت انتقال بار کمتری داشته است. همچنین، تراز فرمی نانوچندسازه rGO/Pt(NS) به نسبت PEDOT:PSS سد انرژی کمتری برای انتقال حفره‌ها ایجاد می‌کند که در مجموع این دو عامل باعث بهبود جریان مدار باز به میزان ۱۳٪ و کارایی سلول خورشیدی پلیمری ساخته شده با لایه انتقال حفره rGO/Pt(NS) به میزان ۱۸٪ نسبت به سلول خورشیدی پلیمری ساخته شده با لایه انتقال حفره PEDOT:PSS شده است.

واژگان کلیدی: سلول خورشیدی پلیمری، لایه انتقال حفره، اکسید گرافن، نانوچندسازه اکسید گرافن احیاشده/ پلاتین نانوستاره.

* leilanaji@aut.ac.ir

در این پژوهش به دلیل کار روی لایه انتقال حفره بیشتر به معرفی این بخش پرداخته خواهد شد. ترکیبی که به عنوان لایه انتقال دهنده حفره استفاده می‌شود، باید در ناحیه مرئی طول موج شفاف باشد و جذبی در این ناحیه نداشته باشد تا حداکثر تابش ورودی به لایه فعال سلول خورشیدی برسد. توانایی انتقال بار را داشته باشد تا بتواند حفره‌های ایجاد شده در لایه فعال را به فتوآند برساند. پایداری فیزیکی و شیمیایی مناسبی داشته باشد تا در برابر تابش خورشید و رطوبت تجزیه نشود و همچنین، نیم‌رسانای نوع P باشد تا توانایی انتقال حفره را داشته باشد و بتواند حفره‌ها را از الکترون‌ها جدا کند. پلی (۳، ۴-اتیلن دی اکسی تیوفن): پلی

۱- مقدمه

سلول خورشیدی پلیمری به دلیل ویژگی‌هایی مانند فرایند ساخت آسان، انعطاف‌پذیری و هزینه ساخت کم، به عنوان جایگزینی برای سلول‌های خورشیدی رایج امروزی معرفی می‌شود [۱]. این نوع از سلول‌های خورشیدی از پنج بخش کاتد، لایه انتقال دهنده الکترون، لایه انتقال دهنده حفره، لایه فعال و فتوآند تشکیل شده‌اند [۲]. در این بین حضور لایه‌های انتقال دهنده حفره و الکترون باعث کاهش بازترکیبی و افزایش کارایی سلول خورشیدی پلیمری می‌شوند و به همین دلیل از اهمیت ویژه‌ای در ساختار سلول خورشیدی برخوردار هستند [۳].

(استایرن سولفونات) معروف به PEDOT:PSS رایج‌ترین ماده مورد استفاده در لایه انتقال‌دهنده حفره سلول خورشیدی پلیمری است [۴]. از ویژگی‌های PEDOT:PSS می‌شود به شفافیت در ناحیه مرئی طول‌موج، توانایی انتقال بار مناسب و P-type بودن اشاره کرد [۵]. با این وجود این ماده نیز دارای عیب‌هایی است. ویژگی اسیدی بالا، توانایی جذب آب، ویژگی‌های الکتریکی غیرهمگن و ناکارآمدی در جلوگیری از ورود الکترون به فتوآند از جمله عیب‌های این ماده است [۶] که باعث شده پژوهشگران بسیاری در تلاش برای یافتن ماده‌ای جایگزین برای PEDOT:PSS باشند. از جمله موادی که به‌عنوان جایگزین PEDOT:PSS استفاده شده‌اند می‌توان به اکسیدهای فلزهایی همچون وانادیم [۶]، مولیبدن [۷] و تنگستن [۸] و مواد آلی مانند پلیمرها، کربن نانوتیوب [۹]، اکسیدگرافن [۱۰] و گرافن و نانوچندسازه‌های [۱۱] آن اشاره کرد.

در این بین اکسیدهای فلزی به دلیل داشتن باند گپ زیاد، موادی مناسب برای جلوگیری از ورود الکترون به فتوآند هستند که باعث کاهش بازترکیبی می‌شود، اما لایه‌نشینی دشوار و هزینه زیاد لایه‌نشانی از نقطه‌های ضعف اکسیدهای فلزی هستند [۱۰]. ترکیب دیگری که به‌عنوان جایگزین برای PEDOT:PSS مطرح شده است اکسیدگرافن است که به دلیل P-Type بودن و شفاف بودن و فیلم‌پذیری مناسب، توجه بسیاری را به خود جلب کرده [۱۰ و ۱۲]، ولی رسانایی ضعیف اکسیدگرافن باعث شده نتواند جایگزین مناسبی برای PEDOT:PSS باشد [۱۳]. گرافن ماده کربنی دیگری است که به‌عنوان جایگزین PEDOT:PSS استفاده شده است. این ماده نیز در ناحیه مرئی شفاف بوده و رسانایی خوبی دارد [۱۴]، اما ویژگی‌های این ماده از جمله شفافیت و رسانایی وابستگی زیادی به روش سنتز این ماده دارد.

روش‌های سنتز گرافن را می‌توان به دو دسته کلی از بالا به پایین و از پایین به بالا تقسیم کرد [۱۵]. در روش بالا به پایین از پودر گرافیت برای سنتز گرافن استفاده می‌شود. از انواع این روش می‌شود به لایه‌برداری مکانیکی، لایه‌برداری الکتروشیمیایی و لایه‌برداری شیمیایی اشاره کرد. در روش از پایین به بالا از اتم‌های کربن که طی عمل جوانه‌زنی شکل گرفته و با تشکیل خوشه‌ها رشد می‌کنند برای تهیه گرافن استفاده می‌شود. از انواع این روش می‌شود به سنتز شیمیایی فاز بخار اشاره کرد. هر کدام از

روش‌های یادشده دارای عیب‌ها و خوبی‌هایی هستند. روش سنتز شیمیایی فاز بخار، گرافنی با تعداد لایه بسیار کم، شفافیت بالا و رسانایی خوب ایجاد می‌کند. ولی روش سنتز دشوار و هزینه‌بر از عیب‌های این روش است. در روش لایه‌برداری شیمیایی فرایند سنتز آسان و هزینه ساخت بسیار کم است، اما گرافن سنتز شده، رسانایی ضعیف‌تر و تعداد لایه‌های بیشتری داشته که از شفافیت آن می‌کاهد [۱۵]. در این بین با نانوچندسازه کردن گرافن تولیدشده با روش شیمیایی می‌توان نقطه‌های ضعف آن را بهبود بخشید.

نانوچندسازه اکسیدگرافن احیاشده و نانوذرات فلزی ترکیبی است که می‌تواند با رفع نقایص اکسیدگرافن و گرافن به‌عنوان جایگزینی برای PEDOT:PSS مطرح شود. اکسیدگرافن احیاشده ماده‌ای است که توانایی انتقال بار بهتری نسبت به اکسیدگرافن دارد، از طرفی افزوده شدن نانوذرات فلزی مانند طلا و پلاتین و نقره باعث بهبود انتقال بار روی صفحات گرافنی می‌شود [۱۶].

در میان نانوذرات فلزی پلاتین به دلیل رسانایی بالا و شفافیت در ناحیه مرئی طول‌موج می‌تواند گزینه مناسبی برای ایجاد نانوچندسازه با گرافن باشد [۱۷]. از طرفی ریخت‌شناسی نانوستاره‌ای به دلیل سطح تماس بالای که ایجاد می‌کند می‌تواند سطح تماس بین لایه انتقال حفره و لایه فعال را افزایش دهد که این امر می‌تواند باعث کاهش بازترکیبی و افزایش کارایی سلول خورشیدی پلیمری شود [۱۸]. از این‌رو، در این پژوهش از نانوچندسازه اکسیدگرافن احیاشده و نانوذرات پلاتین با ریخت‌شناسی نانوستاره‌ای برای استفاده در لایه انتقال‌دهنده حفره در سلول خورشیدی پلیمری استفاده شد. ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و نوری این نانوچندسازه با استفاده از فن‌های FT-IR، XRD، TEM، CV، و J-V مورد بررسی قرار گرفت. و نتیجه‌های به‌دست آمده از آزمون‌های J-V نشان داد استفاده از نانوچندسازه rGO/Pt(NS) به‌عنوان لایه انتقال حفره باعث بهبود در کارایی (PCE%) سلول خورشیدی به مقدار ۱۸٪ و در جریان مدار باز (Jsc) سلول خورشیدی پلیمری به مقدار ۱۳٪ نسبت به سلول خورشیدی پلیمری با لایه انتقال‌دهنده حفره رایج، یعنی PEDOT:PSS شده است.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و دستگاه‌های استفاده شده

پودر گرافیت (با اندازه دانه > 50 میکرومتر، شرکت مرک)، سدیم نیترات ($99\% \text{NaNO}_3$ ، مرک)، پتاسیم پرمنگنات ($99\% \text{KMnO}_4$ ، مرک)، سولفوریک اسید (H_2SO_4 ، 98% ، مرک)، هیدروژن پروکسید (H_2O_2 ، 30% ، مرک)، اتیلن گلیکول ($\text{OHCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ ، 99% ، مرک)، فرمیک اسید (95% ، مرک)، کلروپلاتینیک اسید ۶ آبه ($\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ، 99% ، آلفایسر)، پلی (۳-هگزیل تیوفن) (P3HT)، با وزن مولکولی $5400-7500$ گرم بر مول، سیگما آلدریج)، پلی فیل C61 بوتریک اسید متیل ایستر ($99\% \text{PC61BM}$ ، مرک)، ایندینیم قلع اکسید (ITO)، لایه‌نشانی شده روی شیشه با مقاومت $20-8 \Omega/\text{sq}$ ، سیگما آلدریج)، فویل آلومینیم (Al، $99/99\%$ ، با ضخامت 0.25 میکرومتر، سیگما آلدریج)، لیتیم پرکلرات ($99/99\%$ ، گرید باتری سیگما آلدریج) و استونیتریل ($99/97\% >$ ، مرک)

در این پژوهش برای مطالعه گروه‌های عاملی اکسیدگرافن و اکسیدگرافن احیاشده از طیف‌سنجی FT-IR استفاده شد. برای این منظور از دستگاه Alpha Bruker استفاده شد. برای مطالعه ساختار بلوری نمونه‌ها از طیف‌سنجی XRD استفاده شده با استفاده از دستگاه (EQUINOX3000 Intel) با منبع تابش Cu/K α و طول موج تابش ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$). همچنین، به منظور بررسی فاصله بین صفحات گرافن از قانون براگ (معادله ۱) استفاده شد [۱۹].

$$n \lambda = 2 d \sin \theta \quad (1)$$

در این معادله λ طول موج منبع تابش، d فاصله بین صفحات گرافنی و θ زاویه بازتابش پرتو است. برای بررسی اندازه نانوذرات و ریخت‌شناسی نانوذرات از فن TEM با دستگاه Philipse em208 100kv استفاده شد. برای بررسی ویژگی‌های الکتریکی و توانایی انتقال بار نمونه‌ها و همچنین، برای تعیین سطح تراز HOMO و LUMO و از فن ولتامتری چرخه‌ای استفاده شد. از فن امپدانس برای بررسی ویژگی‌های الکتریکی، مقاومت انتقال بار نمونه‌ها و تعیین پتانسیل فلات باند نمونه‌ها استفاده شد. فن ولتامتری چرخه‌ای و امپدانس با استفاده از دستگاه computer controlled SP100 Zive potentiostat و

روش سه الکترودی انجام گرفت. در این روش برای الکتروود کار از روش لایه‌نشانی نمونه‌ها با روش قطره‌چکانی بر روی الکتروود گلاسی کربن با شعاع 0.5 سانتی‌متر استفاده شد. و الکتروود پلاتین به‌عنوان الکتروود مقابل و الکتروود Ag/AgCl به‌عنوان الکتروود مرجع استفاده شد. گستره پتانسیل اعمالی برای فن ولتامتری چرخه‌ای از -0.4 تا 1.2 ولت با پتانسیل روبش 50 میلی‌ولت بر ثانیه بوده و محلول 0.1 مولار لیتیم پرکلرات در حلال استونیتریل به‌عنوان الکتروولیت در این فن استفاده شد. برای تعیین تراز HOMO و LUMO نیز از فن ولتامتری چرخه‌ای استفاده شد. در این فن از بافر فسفات با PH برابر 7 به‌عنوان الکتروولیت استفاده شد. این فن با سرعت روبش پتانسیل 0.1 ولت بر ثانیه و گستره پتانسیل $2.5-3$ ولت انجام شد. همچنین، برای تعیین تراز HOMO و LUMO نمونه از معادله‌های ۲ و ۳ استفاده شد [۲۰].

$$E_{\text{HOMO}} = - (E_{\text{ox}} + 4/4) \quad (2)$$

$$E_{\text{LUMO}} = - (E_{\text{red}} + 4/4) \quad (3)$$

برای تعیین پتانسیل Flat band از فن امپدانس و معادله Mott-Schottky استفاده شد (معادله ۴)

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{e N A^2 \epsilon \epsilon_0} (V - U_f - \frac{kT}{e}) \quad (4)$$

در این معادله C (F/cm^2) ظرفیت خازنی به‌دست آمده در طیف‌سنجی امپدانس، e (C) بار الکتریکی الکترون، N ($1/\text{cm}^2$) چگالی بار، A (cm^2) سطح مقطع نمونه در الکتروولیت، ϵ ثابت دی‌الکتریک نمونه ($8.85 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$) ثابت گذردهی خلاء، V پتانسیل اعمالی بر امپدانس، T دما و K (J/K) ثابت بولتزمن است. همچنین، برای تعیین تراز فرمی نمونه از معادله ۵ استفاده شده است.

$$U_f(NHE) = A + \Delta E_F + V_H + E_0 \quad (5)$$

در این معادله U_f پتانسیل فلات باند، به‌دست آمده نسبت به پتانسیل الکتروود استاندارد هیدروژن است. A الکترون‌خواهی، ΔE_F اختلاف پتانسیل سطح فرمی و تراز ظرفیت، و V_H پتانسیل هلمهولتز و E_0 پتانسیل الکتروود رفرنس است [۲۰].

در مورد فن امیدانس گستره فرکانس ۱ تا 10^5 هرتر انتخاب شد. و از لیتیم پرکلرات ۰/۱ مولار در استونیتریل به عنوان الکترولیت استفاده شد. برای فیت کردن داده‌های امیدانس از نرم‌افزار Z-view استفاده شد. و داده‌های امیدانس با خطای کمتر از ۱٪ درصد فیت شده است.

۲-۲- سنتز اکسیدگرافن

اکسیدگرافن با استفاده از روش هامرز سنتز شد. برای این کار ۲ گرم پودر گرافیت، ۲ گرم سدیم نترات با ۹۶ میلی‌لیتر سولفوریک اسید غلیظ درون یک بشر بزرگ مخلوط شده و مخلوط به‌دست آمده در حال هم‌خوردن در حمام یخ صفر درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. سپس ۱۰ گرم پودر پتاسیم پرمنگنات به‌مرور و در طول یک ساعت آرام‌آرام به بشر در حال هم‌خوردن و درون حمام یخ افزوده شد. و برای ۹۰ دقیقه محلول قهوه‌ای‌رنگ به‌دست آمده در حمام یخ و در حال هم‌خوردن رها شد. سپس ظرف واکنش از حمام یخ خارج شد و دمای محیط واکنش به ۴۰ درجه سانتی‌گراد رسانده شد و برای ۲ ساعت در حال هم‌خوردن رها شد. در مرحله بعد ۸۰ میلی‌لیتر آب مقطر آرام‌آرام به محل واکنش افزوده و پس از آن دوباره ۲۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر افزوده شد. درنهایت ۱۰ میلی‌لیتر آب‌اکسیژنه ۳۰ درصد افزوده شد و رنگ محلول به سبز تغییر رنگ داد. درنهایت محلول به‌دست آمده را به مدت ۱۰ دقیقه در دور ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه داخل سانتریفیوژ قرار داده و رسوب به‌دست آمده را نگاه‌داشته و آب جدا شده از آن دور ریخته شد. فرایند شست‌وشو ۵ مرتبه تکرار شد.

۲-۳- سنتز نانوجندسازه اکسیدگرافن احیاشده / پلاتین (rGO/Pt(NS))

۵۰ میلی‌گرم پودر اکسیدگرافن به ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر افزوده شد. سپس ۱ میلی‌لیتر فرمیک اسید و ۲۶ میکرولیتر پلاتینیک اسید به غلظت ۲۰۲ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر به محلول افزوده شد. محلول به‌دست آمده به مدت ۳۰ دقیقه تحت امواج فراصوت قرار گرفت سپس ظرف حاوی مواد گفته‌شده به مدت پنج روز در مکانی بدون حرکت رها شد تا فرصت کافی برای تشکیل نانوساختارهای ستاره‌ای شکل داده شود. بعد از پنج روز آب روی رسوب به‌دست آمده حذف شد و رسوب به‌جامانده با استفاده از سانتریفیوژ در دور ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰

دقیقه شسته شد. سپس رسوب rGO/Pt(NS) به‌دست آمده را نگاه‌داشته و آب جدا شده دور ریخته شد. فرایند شست‌وشو با سانتریفیوژ سه بار تکرار شد.

۲-۴- تهیه و مشخصه‌یابی سلول خورشیدی پلیمری

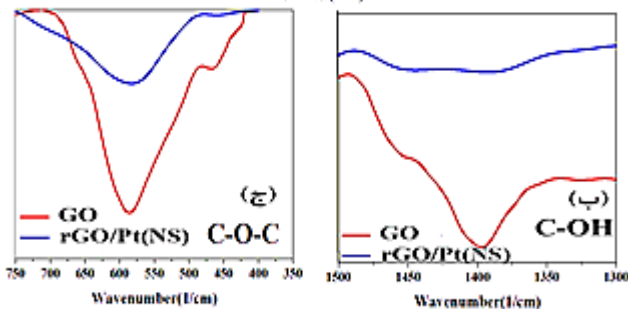
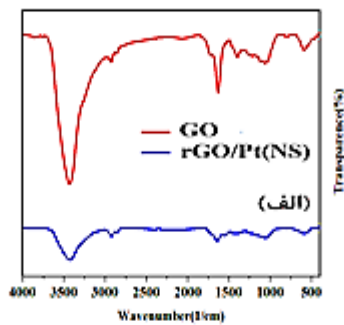
ابتدا فتوآند ایندینیم قلع‌اکسید (ITO)ها با اندازه‌های یکسان $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ بریده‌شده و با استفاده از آب‌مقطر و استون تمیز و پس از آن به مدت ۱۰ دقیقه در حلال ۲-پروپانول فرو برده شد. سپس سوسپانسونی از نانوجندسازه rGO/Pt(NS) با غلظت ۰/۳ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر در حلال اتانول تهیه‌شده و با روش لایه‌نشانی چرخشی با سرعت دور ۱۵۰۰ دور بر دقیقه روی ITOها لایه‌نشانی شد. سپس نمونه‌ها رها شد تا خشک شود. نمونه‌های شامل ITO و rGO/Pt(NS) لایه‌نشانی شده به مدت ۲ ساعت در معرض بخار اتیلن گلیکول قرار گرفت تا اکسیدگرافن به‌خوبی احیا شود و مقاومت آن کاهش یابد. نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت رها شد تا خشک شود. سپس فتوآند و لایه حفره‌های rGO/Pt(NS) در اتانول فروبرده شد تا اتیلن گلیکول موجود در حفره‌های rGO شسته شود. پس از این فتوآند و لایه rGO/Pt(NS) را به مدت ۲ ساعت رها کرده تا خشک شود و برای لایه‌نشانی لایه بعدی آماده شود. سپس محلولی از پلی (۳-هگزیل تیوفن): پلی فنیل C61 بوتریک اسید متیل ایستر (P3HT:PCBM) با نسبت ۱ به ۱ و غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر تهیه شد و با استفاده از فن لایه‌نشانی چرخشی با دور ۱۵۰۰ دور بر دقیقه روی لایه قبلی لایه‌نشانی شد. و نمونه‌ها رها شد تا خشک شود. درنهایت برای لایه‌نشانی کاتد از لایه‌نشانی آلومینیم با روش انباشت فیزیکی بخار (PVD) استفاده شد. برای این کار از ماسک‌های با ۵ شیار موازی و هم‌اندازه استفاده شد. بعد از آماده‌شدن سلول‌های خورشیدی ساخته‌شده از آن‌ها با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز نور خورشید تحت شرایط تابش ۱/۵ AMG و شدت تابش 100 mW/cm^2 آزمون J-V گرفته شد. نحوه نام‌گذاری نمونه‌ها در جدول ۱ آورده شده است. همچنین، در شکل ۱ خلاصه‌ای از کل فرایند سنتز و لایه‌نشانی نانوجندسازه rGO/Pt(NS) آورده شده است. در فرایند سنتز نانوجندسازه rGO/Pt از روش هامرز برای سنتز اکسیدگرافن استفاده شد. در

۱۳۴۰ و $540\text{ (}1/\text{cm)}$ مربوط به کششی در گروه عاملی اپوکسید است [۲۲]. شکل ۲-ب مربوط به پیک خمشی گروه عاملی C-OH برای نمونه‌های GO و rGO/Pt(NS) است. همان‌طور که در شکل مشخص است شدت این پیک در نمونه GO بسیار بیشتر از نمونه rGO/Pt(NS) است که دلیل آن کاهش گروه‌های C-OH توسط بخار اتیلن گلیکول و تبدیل اکسیدگرافن به اکسیدگرافن احیاء شده است. همین‌طور در شکل ۲-ج پیک مربوط به C-O-C نشان داده شده است، که در این شکل نیز افت پیک C-O-C در ناحیه $560\text{ (}1/\text{cm)}$ مربوط به کاهش گروه C-O-C در نمونه rGO/Pt(NS) است. در مجموع کاهش شدت پیک‌های مربوط به گروه‌های اکسیژنه را می‌توان دلیل احیای موفق اکسیدگرافن توسط بخار اتیلن گلیکول عنوان کرد.

این فرایند با اکسید صفحات گرافیت فاصله بین صفحات گرافیت افزایش یافته و نیروی واندروالسی بین صفحات کم شده و صفحات به راحتی از هم جدا می‌شود [۲۱]. سپس نمک پلاتین و احیاکننده افزوده شده و در فرایند کریستالیزاسیون درجا نانوجندسازه rGO/Pt(NS) سنتز شده است. برای کاهش مقاومت rGO/Pt(NS) از بخار اتیلن گلیکول استفاده شد.

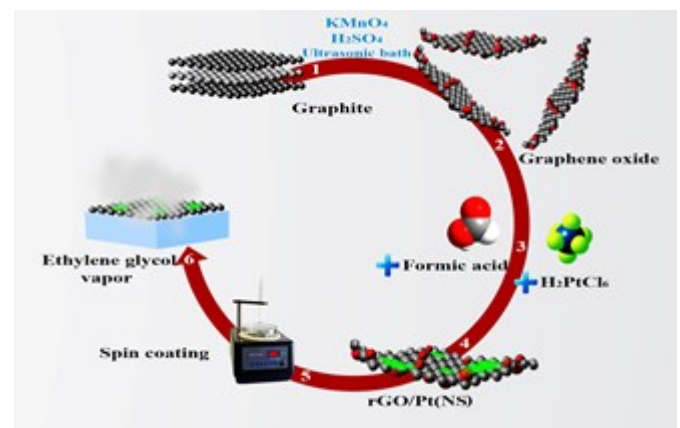
جدول ۱: نحوه نام‌گذاری سلول‌های خورشیدی پلیمری ساخته شده با لایه انتقال حفره متفاوت

| نام نمونه | لایه انتقال دهنده ی حفره استفاده شده |
|----------------|--|
| PSC-PEDOT:PSS | PEDOT:PSS (انتقال دهنده ی حفره ی رایج) |
| PSC-rGO/Pt(NS) | rGO/Pt(NS) |



شکل ۲: (الف) تصویر طیف FT-IR از نمونه‌های GO و rGO/Pt(NS) (ب) ناحیه جذب گروه C-OH، (ج) ناحیه جذب گروه C-O-C

تصویر ۳-الف مربوط به طیف XRD نمونه‌های GO و rGO/Pt(NS) است. مانند طیف FT-IR پس از احیا با بخار اتیلن گلیکول از این نمونه طیف XRD گرفته شد. در این طیف پیک در $11^\circ = 2\theta$ مربوط به فاز اکسیدگرافنی نمونه‌ها است [۲۳]. شدت این پیک وابسته به مقدار اکسیدگرافن در نمونه است و هرچه نمونه اکسیدگرافنی، بیشتر احیا شود، این پیک بیشتر به سمت محور شدن پیش می‌رود. از راه این پیک می‌توان فاصله بین نانوصفات گرافنی را با استفاده از قانون براگ ارزیابی کرد. پیک

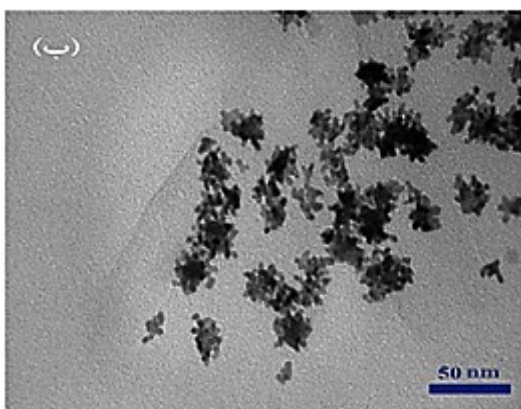
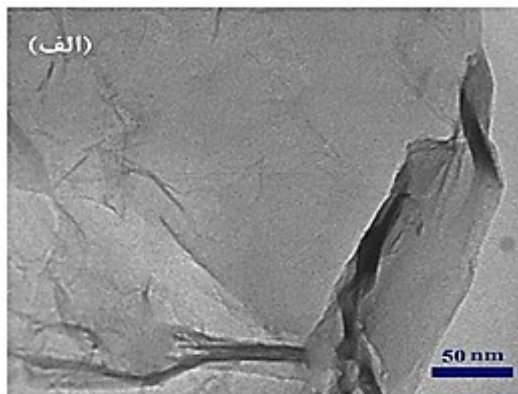


شکل ۱: تصویر شماتیک از فرایند سنتز و لایه‌نشانی نانوجندسازه rGO/Pt(NS)

۳- نتیجه‌ها و بحث

تصویر ۲-الف مربوط به طیف FT-IR، به منظور بررسی گروه‌های اکسیژنه بر روی GO و rGO/Pt(NS) است. این طیف از نمونه rGO/Pt(NS) پس از قرار گرفتن در معرض بخار اتیلن گلیکول گرفته شده است. در این طیف پیک پهن در ناحیه 3000 تا $3700\text{ (}1/\text{cm)}$ مربوط به کششی الکل‌ها و کربوکسیلیک اسیدها است. و پیک موجود در ناحیه 1712 تا $1740\text{ (}1/\text{cm)}$ مربوط به کششی گروه‌های کربوکسیل و کربونیل است. و همچنین، پیک موجود در ناحیه 1600 تا $1585\text{ (}1/\text{cm)}$ مربوط به کششی مربوط به حلقه‌های کربنی گرافنی است. جذب در ناحیه $1370\text{ (}1/\text{cm)}$ به دلیل حضور C-O-H خمشی گروه‌های هیدروکسیل است و پیک در ناحیه

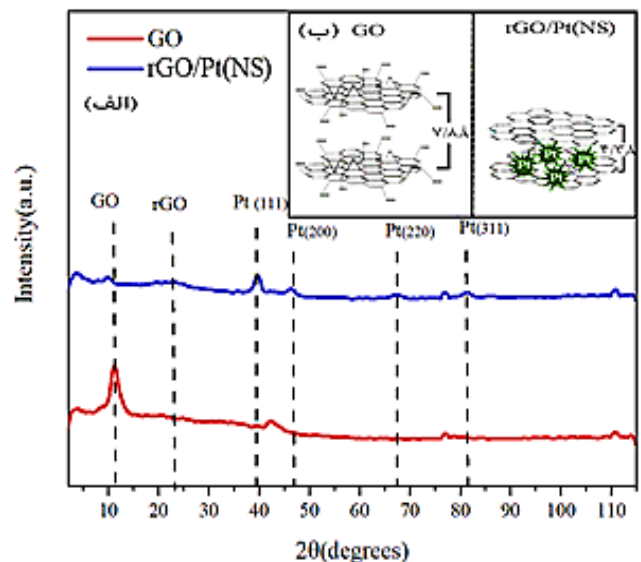
نانوصفحات GO است که به صورت بستری نازک و شفاف و دارای چین و چروک مشخص است و شکل ۴-ب مربوط به تصویر نانوپندسازه rGO/Pt(NS) است که نانوذرات پلاتین با ریخت ستاره‌ای مانند به صورت ذرات سیاه‌رنگ با قطر حدود ۱۰ تا ۲۵ نانومتر در بستر شفاف و دارای چین و چروک گرافنی مشخص است. همان‌طور که در تصویر دیده می‌شود، نانوذرات پلاتین به صورت یکنواخت با اندازه ۱۰ تا ۲۵ نانومتر در بستر گرافنی پخش شده است که این نشان‌دهنده سنتز موفق نانوپندسازه rGO/Pt(NS) است. تصویر TEM نانوپندسازه rGO/Pt(NS) تأییدی بر آزمون XRD نیز است که نشان می‌داد نانوذرات پلاتین تشکیل شده است. دلیل تشکیل ریخت ستاره‌ای مانند را باید در احیاکننده استفاده شده یعنی فرمیک‌اسید دنبال کرد. احیاکننده فرمیک‌اسید بر اساس واکنش ۱ در حین احیای نمک پلاتین تولید فرآورده جانبی کربن مونوکسید می‌کند.



شکل ۴: (الف) تصویر TEM نمونه rGO و (ب) تصویر TEM نمونه rGO/Pt(NS) است.

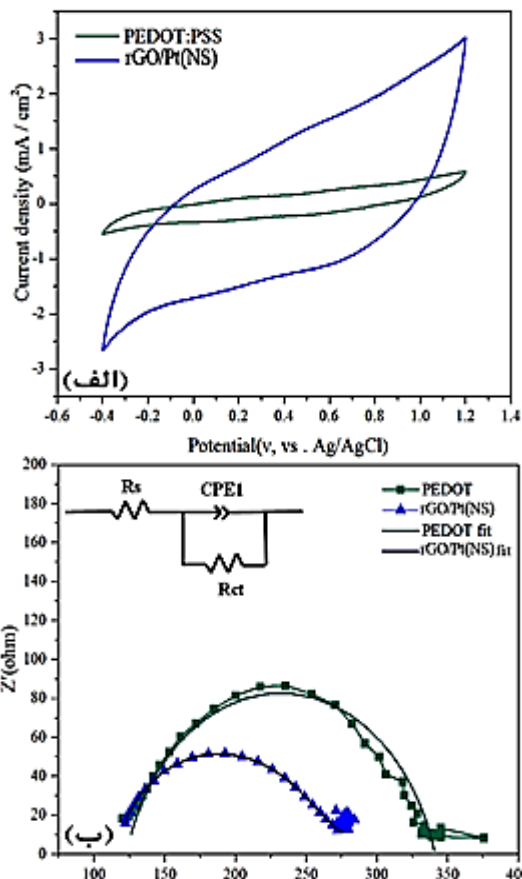
کربن مونوکسید تولید شده باعث ایجاد مسمومیت CO در جوهری از بلور پلاتین می‌شود. مسمومیت CO مانع از رسیدن نمک پلاتین به سطح بلور پلاتین می‌شود. در این بین وجهی

در $2\theta = 26^\circ$ مربوط به اکسیدگرافن احیا شده است [۲۳]. و از راه این پیک می‌شود فاصله بین نانوصفحات اکسیدگرافن احیا شده را با استفاده از قانون براگ ارزیابی کرد. همان‌طور که در شکل ۳-الف مشخص است شدت پیک $2\theta = 11^\circ$ که مربوط به اکسیدگرافن است، در نمونه rGO/Pt(NS) به تقریب محوشده است و همچنین، در این نمونه پیک $2\theta = 26^\circ$ که مربوط به فاز اکسیدگرافن احیا شده، ظاهر شده است، که این پیک در نمونه GO دیده نمی‌شود. این موضوع نشانگر احیا اکسیدگرافن و تبدیل آن به اکسیدگرافن احیا شده است. پیک $2\theta = 39^\circ$ مربوط به نانوذرات پلاتین است [۲۴]. حضور این پیک همچنین، نشان‌دهنده این موضوع است که نانوذرات پلاتین در نمونه rGO/Pt(NS) به خوبی شکل گرفته است. شکل ۳-ب تصویری نمادین از فاصله بین صفحات گرافنی در نمونه‌های GO و rGO/Pt(NS) را نشان می‌دهد. فاصله بین صفحات گرافنی با استفاده از قانون براگ برای اکسیدگرافن $7/8$ آنگستروم به دست آورده شد و برای نمونه rGO/Pt(NS) این فاصله به $4/3$ آنگستروم رسیده است. این کاهش فاصله نشان‌دهنده کاهش گروه‌های اکسیژنه بر روی نانوصفحات اکسیدگرافن است [۲۳].



شکل ۳: (الف) تصویر طیف XRD نمونه‌های GO و rGO/Pt(NS) و (ب) تصویر شماتیک از فاصله بین دو صفحه گرافن

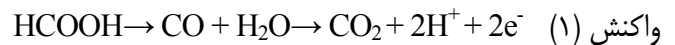
شکل ۴ مربوط به تصویرهای TEM نمونه‌های GO و rGO/Pt(NS) است. آزمون TEM به منظور بررسی اندازه و ریخت‌شناسی نانوذرات انجام شد. شکل ۵-الف مربوط به



شکل ۵ (الف) ولتاموگرام نمونه‌های PEDOT:PSS و rGO/Pt(NS) در الکترولیت ۰/۱ مولار لیتیم پرفلورات در حلال استونیتریل است. (ب) مربوط به امپدانس نمونه‌های PEDOT:PSS و rGO/Pt(NS) در الکترولیت ۰/۱ مولار لیتیم پرفلورات و در حلال استونیتریل است.

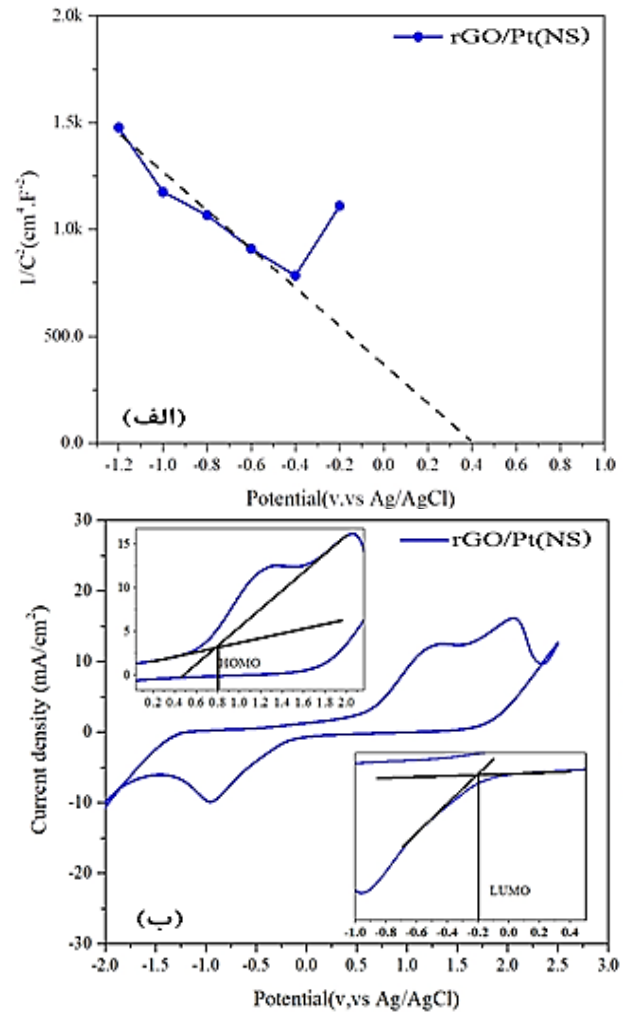
شکل ۶-الف مربوط به نمودار Mott-Schottky نمونه rGO/Pt(NS) است. در این شکل با استفاده از معادله ۴ مقدار $1/C^2$ به دست آمده از طیف امپدانس نمونه rGO/Pt(NS) در پتانسیل‌های متفاوت را رسم کرده و با استفاده از نمودار به دست آمده پتانسیل فلات باند نمونه rGO/Pt(NS) به دست آمد. همچنین، با استفاده از پتانسیل‌های HOMO و LUMO به دست آمده از ولتاموگرام شکل ۶-ب و معادله ۲ و ۳ و پتانسیل فلات باند به دست آمده از نمودار Mott-Schottky و معادله ۴ می‌توان با استفاده از معادله ۵ سطح تراز فرمی نمونه rGO/Pt(NS) را به دست آورد [۲۱]. پتانسیل تراز HOMO، LUMO، فلات باند و تراز فرمی نمونه rGO/Pt(NS) در جدول ۲ آورده شده است.

مانند وجوه ۱۱۱ بلور پلاتین حساسیت کمتری به مسمومیت CO نشان می‌دهد و این باعث می‌شود در بعضی از وجه‌های بلور پلاتین نمک پلاتین رسیده و بلور در آن نواحی رشد کرده و در بعضی از وجوه به دلیل مسمومیت CO نمک پلاتین نرسیده و بلور از آن نواحی رشد نکند. این عدم توازن در رشد بلور در همه نواحی باعث تشکیل ریخت‌شناسی ستاره‌ای شکل می‌شود [۲۵].



پس از بررسی آزمون‌های ساختاری نانوجندسازه rGO/Pt(NS) و به اطمینان رسیدن از سنتز این نانوجندسازه، ویژگی‌های الکتروشیمیایی نمونه‌های PEDOT:PSS و rGO/Pt(NS) با استفاده از طیف امپدانس و ولتامتری چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفت تا توانایی انتقال بار این نمونه‌ها مورد مقایسه قرار گیرد. شکل ۵-الف مربوط به آزمون ولتامتری چرخه‌ای نمونه‌های rGO/Pt(NS) و انتقال‌دهنده حفره رایج یعنی PEDOT:PSS است. این آزمون نشان می‌دهد که نمونه rGO/Pt(NS) جریان بسیار قوی‌تری نسبت به PEDOT:PSS ایجاد کرده است. که این مربوط به سطح فعال الکتروشیمیایی بیشتر و رسانایی بهتر نمونه rGO/Pt(NS) نسبت به PEDOT:PSS است [۲۱] که این موارد باعث سطح تماس بیشتر لایه انتقال‌دهنده حفره با لایه فعال و انتقال بار بهتر در نمونه rGO/Pt(NS) است. شکل ۵-ب مربوط به منحنی نایکوئیست طیف امپدانس نمونه‌های PEDOT:PSS و rGO/Pt(NS) است. قطر نیم‌دایره منحنی نایکوئیست نشان‌دهنده مقاومت انتقال بار در نمونه است. هر چه این قطر کمتر باشد به این معنی است که انتقال بار در نمونه راحت‌تر انجام گرفته است [۲۶]. داده‌های به دست آمده از فیت طیف امپدانس، مقدار مقاومت انتقال بار محلول (R_s) که نشان‌دهنده مقاومت الکترولیت است [۲۷] را در حدود 125Ω و مقاومت انتقال بار (Rct) نمونه‌های PEDOT:PSS و rGO/Pt(NS) را به ترتیب 208Ω و 138Ω نشان می‌دهد. نتیجه‌های به دست آمده نشان می‌دهد انتقال بار در نمونه rGO/Pt(NS) راحت‌تر انجام گرفته است. این امر نشان‌دهنده این موضوع است که نانوجندسازه rGO/Pt(NS) در انتقال بار موفق‌تر نسبت به PEDOT:PSS عمل کرده است.

ساخته شده ITO به عنوان فتوآند، HT:PCBM3P به عنوان لایه فعال و آلومینیم به عنوان کاتد استفاده شد. و هر دو سلول ساخته شده تحت تابشی یکسان با شرایط AM ۱/۵ و توان $100 \text{ cm}^2/\text{mW}$ قرار گرفت. که نمودار J-V و اطلاعات به دست آمده از آن به ترتیب در شکل ۷-الف و جدول ۳ آورده شده است. نتیجه‌های به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از نانوپساز rGO/Pt(NS) به عنوان لایه انتقال حفره، باعث افزایش در جریان مدار باز (J_{sc}) سلول خورشیدی پلیمری به مقدار حدود ۱۳٪ نسبت به سلول خورشیدی پلیمری با لایه انتقال حفره رایج یعنی PEDOT:PSS شده است. همچنین، کارایی سلول خورشیدی پلیمری rGO/Pt-PSC مقدار افزایش حدود ۱۸٪ را نسبت به سلول خورشیدی PEDOT:PSS-PSC نشان می‌دهد. دلیل برتری نانوپساز rGO/Pt نسبت به PEDOT:PSS را می‌توان در دو عامل بررسی کرد. عامل اول رسانایی بهتر و عملکرد بهتر آن در انتقال بار است. همان‌طور که در طیف‌سنجی امپدانس این دو نمونه دیده شد، نمونه PEDOT:PSS مقاومت انتقال باری حدود ۱/۵ برابر بیشتر از نمونه rGO/Pt(NS) دارد که این نشان می‌دهد رسانایی و توانایی انتقال بار در نمونه rGO/Pt(NS) نسبت به نمونه PEDOT:PSS بیشتر است. این رسانایی بیشتر موجب افزایش جریان مدار باز در سلول خورشیدی به مقدار حدود ۱۳٪ شده است. از طرفی، عامل دیگر عملکرد بهتر نانوپساز rGO/Pt(NS) را باید در سطح‌های انرژی این ماده جست‌وجو کرد. سطح تراز فرمی نانوپساز rGO/Pt(NS) با توجه به موارد بیان شده در آزمایش‌های قبلی در حدود 4.8 eV به دست آمده است. همچنین، سطح تراز HOMO برای PEDOT:PSS در حدود 5.2 eV محاسبه شده است. این موارد نشان‌دهنده این موضوع است که بین تراز HOMO لایه فعال و تراز فرمی نانوپساز rGO/Pt(NS) سد انرژی کمتری به نسبت چندساز PEDOT:PSS وجود دارد. همان‌طور که در شکل ۷-ب نشان داده شده است تراز HOMO برای PEDOT:PSS 5.2 eV گزارش شده است که با توجه به این موضوع که تراز HOMO برای لایه فعال P3HT در حدود 5 eV گزارش شده است و نمی‌تواند لایه انتقال حفره مناسبی در برابر P3HT باشد و نانوپساز rGO/Pt(NS) در این زمینه نیز عملکرد بهتری نسبت به PEDOT:PSS دارد. در نهایت این افزایش در جریان و قرارگیری تراز فرمی rGO/Pt(NS) در محلی مناسب‌تر به نسبت لایه فعال



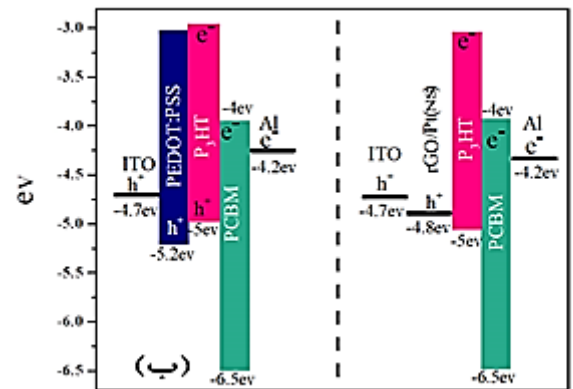
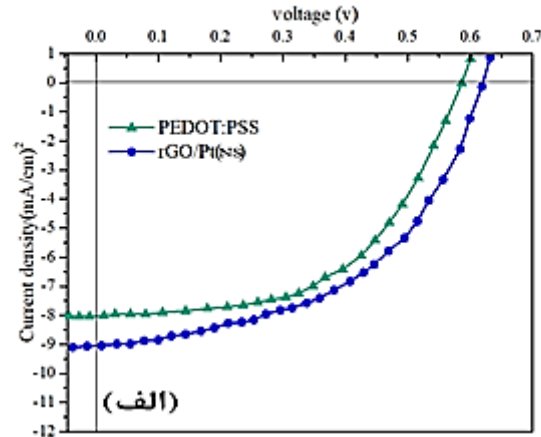
شکل ۶: (الف) نمودار Mott-Schottky نمونه rGO/Pt(NS) برای محاسبه پتانسیل flat-band. (ب) ولتاموگرام مربوط به نمونه rGO/Pt(NS) برای محاسبه پتانسیل HOMO و LUMO در الکترولیت بافر فسفات در گستره پتانسیل ۲- ولت تا ۲/۵ ولت با سرعت رویش ۰/۱ ولت بر ثانیه

جدول ۲: پتانسیل HOMO، LUMO، flat-band و تراز فرمی نمونه

| rGO/Pt(NS) | | | | نام نمونه |
|-----------------|--------------|----------|----------|------------|
| Fermi level(eV) | Flatband(eV) | LUMO(eV) | HOMO(eV) | |
| -۴/۸ | -۴/۷ | -۴/۲ | -۵/۲ | rGO/Pt(NS) |

در نهایت در شکل ۷-الف برای بررسی عملکرد نانوپساز rGO/Pt(NS) در ساختار سلول خورشیدی پلیمری به عنوان لایه انتقال حفره، دو سلول خورشیدی پلیمری با فتوآند، لایه فعال و کاتد یکسان ولی لایه انتقال حفره متفاوت، یکی با لایه انتقال حفره رایج یعنی PEDOT:PSS و دیگری با لایه انتقال حفره جایگزین یعنی rGO/Pt(NS) ساخته شد. در ساختار سلول‌های خورشیدی پلیمری

PEDOT:PSS موجب افزایش کارایی سلول خورشیدی PSC- rGO/Pt(NS) به مقدار حدود ۱۸٪ نسبت به سلول خورشیدی PSC-PEDOT:PSS شده است.



شکل ۷: نمودار J-V سلول‌های خورشیدی پلیمری، با لایه انتقال دهنده حفره PEDOT:PSS و rGO/Pt(NS) تحت شرایط تابش ۱۵ AM و $100 \text{ cm}^2/\text{mW}$

جدول ۳: پارامترهای فتوولتائیک سلول‌های خورشیدی پلیمری ساخته شده با PEDOT:PSS و rGO/Pt(NS) به عنوان لایه انتقال حفره.

| نام سلول خورشیدی پلیمری | JSC (mA/cm^2) | VOC (V) | FF (%) | PCE (%) |
|-------------------------|---------------------------------|---------|--------|---------|
| ۱ PSC-PEDOT:PSS | ۸.۰۴ | ۰.۶۰ | ۵۰ | ۲.۴۲ |
| ۲ PSC-rGO/Pt(NS) | ۹.۰۹ | ۰.۶۲ | ۵۰ | ۲.۸۶ |

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش نانوجندسازه Pt/rGO(NS) با استفاده از روش کریستالیزاسیون درجا سنتز و از فرمیک اسید و بخار اتیلن گلیکول به عنوان احیاکننده استفاده شد. برای بررسی کیفیت سنتز Pt/rGO(NS) از آزمون‌های FT-IR، XRD و TEM استفاده شد. نتیجه‌های به دست آمده از آزمون FT-IR نشان داد که نمونه Pt/rGO(NS) گروه عاملی اکسیژنه کمتری نسبت به نمونه

اکسیدگرافن دارد. که نشان دهنده احیای موفق اکسیدگرافن توسط بخار اتیلن گلیکول است. در آزمون XRD کاهش شدت پیک $\theta = 11^\circ$ که مربوط به فاز اکسیدگرافن است، و ظهور پیک در $\theta = 26^\circ$ که مربوط به فاز اکسیدگرافن احیاء شده است، نشان دهنده احیای موفق اکسیدگرافن به وسیله بخار اتیلن گلیکول و تولید اکسیدگرافن احیاء شده است. از طرفی ظهور پیک در $\theta = 39^\circ$ که مربوط به نانوذرات پلاتین است، نشان دهنده سنتز موفق نانوذرات پلاتین توسط احیاکننده فرمیک اسید است. از تصویر TEM برای بررسی ریخت‌شناسی و اندازه نانوذرات پلاتین استفاده شده است. نتیجه‌های تصویرهای TEM نشان داد که نانوذرات ستاره‌ای شکل پلاتین به خوبی شکل گرفته و در بستر گرافنی به خوبی پخش شده است. سپس از نمونه‌های Pt/rGO(NS) به عنوان لایه انتقال حفره جایگزین و PSS:PEDOT به عنوان لایه انتقال دهنده حفره رایج، آزمون امپدانس گرفته شد. تا عملکرد انتقال بار این دو نمونه مورد بررسی قرار بگیرد که نتیجه‌ها نشان داد مقاومت انتقال بار نمونه Pt/rGO(NS) از نمونه PSS:PEDOT کمتر است. سپس برای تعیین تراز فرمی نانوجندسازه rGO/Pt(NS) از آزمون CV در بافر فسفات و همچنین، از معادله Mott-Schottky استفاده شد. در نهایت دو سلول خورشیدی پلیمری با کاتد، لایه فعال و فتوآند یکسان ولی لایه انتقال دهنده حفره متفاوت، یکی لایه انتقال حفره رایج یعنی PSS:PEDOT و دیگری لایه انتقال حفره جایگزین یعنی Pt/rGO(NS) ساخته و در شرایط یکسان از آن‌ها آزمون J-V گرفته شد. در این آزمایش PCE و Jsc سلول خورشیدی پلیمری ساخته شده با لایه انتقال حفره Pt/rGO(NS) به ترتیب ۲.۸۶٪ و $9.09 \text{ cm}^2/\text{mA}$ و PCE و Jsc سلول خورشیدی پلیمری ساخته شده با لایه انتقال حفره PSS:PEDOT به ترتیب ۲.۴۲٪ و $8.04 \text{ cm}^2/\text{mA}$ به دست آمد. این نتیجه‌ها نشان داد استفاده از نانوجندسازه Pt/rGO(NS) باعث شد جریان مدار باز سلول خورشیدی با لایه انتقال حفره رایج یعنی PEDOT:PSS از $8.04 \text{ cm}^2/\text{mA}$ به $9.09 \text{ cm}^2/\text{mA}$ در سلول خورشیدی پلیمری با لایه انتقال حفره جایگزین یعنی rGO/Pt(NS) برسد که این نشان دهنده ۱۳٪ پیشرفت در جریان مدار باز سلول خورشیدی پلیمری با لایه انتقال دهنده حفره جایگزین یعنی rGO/Pt(NS) است. این افزایش در مقدار Jsc و سطح تراز انرژی مناسب‌تر نانوجندسازه rGO/Pt(NS) نسبت به PEDOT:PSS باعث شده

and V2O5 mixture as hole transport layer," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 120, pp. 238-243, 2014.

[7] A. Kyaw, X. Sun, C. Jiang, G. Lo, D. Zhao, and D. Kwong, "An inverted organic solar cell employing a sol-gel derived ZnO electron selective layer and thermal evaporated MoO₃ hole selective layer," *Applied Physics Letters*, 93, 221107-221110, 2008.

[8] C. Tao *et al.*, "Role of tungsten oxide in inverted polymer solar cells," *Applied Physics Letters*, 94, 29-37, 2009.

[9] E. Kymakis, M.M. Stylianakis, G.D. Spyropoulos, E. Stratakis, E. Koudoumas, and C. Fotakis, "Spin coated carbon nanotubes as the hole transport layer in organic photovoltaics," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 96, 298-301, 2012.

[10] S.-S. Li, K.-H. Tu, C.-C. Lin, C.-W. Chen, and M. Chhowalla, "Solution-processable graphene oxide as an efficient hole transport layer in polymer solar cells," *ACS nano*, 4, 3169-3174, 2010.

[11] J.M. Yun *et al.*, "Solution-processable reduced graphene oxide as a novel alternative to PEDOT:PSS hole transport layers for highly efficient and stable polymer solar cells," *Advanced Materials*, 23, 4923-4928, 2011.

[12] R. Garg, N.K. Dutta, and N.R. Choudhury, "Work function engineering of graphene," *Nanomaterials*, 4, 267-300, 2014.

[13] S. Pei and H.-M. Cheng, "The reduction of graphene oxide," *Carbon*, 50, 3210-3228, 2012.

[14] J. Zhao, S. Pei, W. Ren, L. Gao, and H.M. Cheng, "Efficient preparation of large-area graphene

است کارایی سلول خورشیدی پلیمری از ۲/۴۲٪ در سلول خورشیدی PSC-rGO/Pt(NS) به ۲/۸۶٪ در سلول خورشیدی پلیمری PSC-rGO/Pt(NS) برسد که نشان‌دهنده بهبود کارایی سلول خورشیدی پلیمری با لایه انتقال حفره rGO/Pt(NS) به مقدار ۱۸٪ به نسبت کارایی سلول خورشیدی پلیمری با لایه انتقال حفره رایج یعنی PEDOT:PSS است. این امر نشان‌دهنده این موضوع است که نانوجندسازه Pt/rGO(NS) نه تنها می‌تواند به‌عنوان جایگزینی برای PSS:PEDOT مطرح شود. بلکه می‌تواند باعث بهبود عملکرد سلول خورشیدی پلیمری نیز شود.

مراجع

[1] Y. Ma, Z. Kang, and Q. Zheng, "Recent advances in wide bandgap semiconducting polymers for polymer solar cells," *Journal of Materials Chemistry A*, 5, 1860-1872, 2017.

[2] S. Lattante, "Electron and hole transport layers: their use in inverted bulk heterojunction polymer solar cells," *Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 132-164, 2014.

[3] H.T. Chien *et al.*, "Effects of hole-transport layer homogeneity in organic solar cells—A multi-length scale study," *Surfaces and Interfaces*, vol. 6, 72-80, 2017.

[4] Y.-J. Jeon *et al.*, "2D/2D vanadyl phosphate (VP) on reduced graphene oxide as a hole transporting layer for efficient organic solar cells," *Organic Electronics*, 59, 92-98, 2018.

[5] J.H. Lee *et al.*, "Highly conductive, stretchable, and transparent PEDOT: PSS electrodes fabricated with triblock copolymer additives and acid treatment," *ACS applied materials & interfaces*, 10, 28027-28035, 2018.

[6] S.J. Lee, H.P. Kim, A.R. bin Mohd Yusoff, and J. Jang, "Organic photovoltaic with PEDOT: PSS

- [22] J. Guerrero-Contreras and F. Caballero-Briones, "Graphene oxide powders with different oxidation degree, prepared by synthesis variations of the Hummers method," *Materials Chemistry and Physics*, 153, 209-220, 2015.
- [23] T.-Q. Xu *et al.*, "Simultaneous determination of dopamine and uric acid in the presence of ascorbic acid using Pt nanoparticles supported on reduced graphene oxide," *Electrochimica Acta*, 115, 109-115, 2014.
- [24] N. Li, S. Tang, and X. Meng, "Preparation of Pt-GO composites with high-number-density Pt nanoparticles dispersed uniformly on GO nanosheets," *Progress in Natural Science: Materials International*, 26, 139-144, 2016.
- [25] Z. Luo *et al.*, "One-pot, low-temperature synthesis of branched platinum nanowires/reduced graphene oxide (BPtNW/RGO) hybrids for fuel cells," *Journal of Materials Chemistry*, 22, 7791-7796, 2012.
- [26] D. He, K. Cheng, T. Peng, X. Sun, M. Pan, and S. Mu, "Bifunctional effect of reduced graphene oxides to support active metal nanoparticles for oxygen reduction reaction and stability," *Journal of Materials Chemistry*, 22, 21298-21304, 2012.
- [27] Z. Fakharan, L. Naji, and K. Madanipour, "Surface roughness regulation of reduced-graphene oxide/iodine-Based electrodes and their application in polymer solar cells," *Journal of colloid and interface science*, 540, 272-284, 2019.
- oxide sheets for transparent conductive films," *ACS nano*, 4, 5245-5252, 2010.
- [15] X. Huang, X. Qi, F. Boey, and H. Zhang, "Graphene-based composites," *Chemical Society Reviews*, 41, 666-686, 2012.
- [16] Y. Si and E.T. Samulski, "Exfoliated graphene separated by platinum nanoparticles," *Chemistry of Materials*, 20, 6792-6797, 2008.
- [17] E. Gharibshahi, E. Saion, A. Ashraf, and L. Gharibshahi, "Size - controlled and optical properties of platinum nanoparticles by gamma radiolytic synthesis," *Applied Radiation and Isotopes*, 130, 211-217, 2017.
- [18] C.-T. Yen, F.-C. Wu, H.-L. Cheng, H.-S. Sheu, F.-C. Tang, and W.-Y. Chou, "Charge transfer highways in polymer solar cells embedded with imprinted PEDOT: PSS gratings," *RSC Advances*, vol. 4, no. 102, pp. 58342-58348, 2014.
- [19] X.-J. Shen, X.-Q. Pei, S.-Y. Fu, and K. Friedrich, "Significantly modified tribological performance of epoxy nanocomposites at very low graphene oxide content," *Polymer*, vol. 54, no. 3, 1234-1242, 2013.
- [20] M. Hosseini, L. Naji, and Z. Fakharan, "Influences of synthesis parameters on the physicochemical and electrochemical characteristics of reduced graphene oxide/Pt nanoparticles as hole transporting layer in polymer solar cells," *Synthetic Metals*, 263, 116366-116370, 2020.
- [21] G. Shao, Y. Lu, F. Wu, C. Yang, F. Zeng, and Q. Wu, "Graphene oxide: the mechanisms of oxidation and exfoliation," *Journal of Materials Science*, 47, 4400-4409, 2012.



Synthesis of rGO/Pt(Nano Star) nanocomposite as hole transporting material in polymer solar cells

Seyed Masoud Hosseini, Leila Najji*, Zahra fakharan

Department of Chemistry, Amirkabir University of Technology (Polytechnic), Tehran

Abstract: In the current work, reduced graphene oxide/Nano star platinum (rGO/Pt(NS)) nanocomposite is introduced as a novel hole transporting layer (HTL) to replace PEDOT:PSS in polymer solar cells (PSCs). The rGO/Pt(NS) nanocomposite was synthesized by in situ crystallization method, while formic acid and ethylene glycol vapor was used as the reducing agent. Physical, chemical and electrochemical properties of the rGO/Pt(ns) nanocomposite was evaluated using different characterization techniques including FT-IR, XRD, TEM, EIS, CV and J-V tests. The rGO/Pt(NS) nanocomposite, appeared to have a desirable electrical conductivity as a hole transporting material. Moreover, the prepared nanocomposite provided charge transfer resistance of 138Ω which was considerably lower than that obtained for PEDOT:PSS (208Ω). Also, by calculating the fermi level of rGO/Pt(NS) composite, it was found that the fermi level of rGO/Pt(ns) composite was in a more suitable place than the PEDOT:PSS. The photovoltaic performance of the rGO/Pt(NS) – based HTL PSCs was compared with those of the PEDOT:PSS – based HTL devices as standard PSCs. Results revealed that the rGO/Pt(NS) based PSCs can provide higher (about 13%) short circuit current (J_{sc}) and higher (18 %) power conversion efficiency (PCE).

Keywords: Polymer solar cell, hole transport layer, Graphene oxide, Reduced graphene oxide / Nano Star platinum nanocomposite (rGO/Pt(NS))