فناوری پلیمر ایران

فصلنامه علمی - ترویجی
سال سوم شماره ۲، شماره پیاپی ۱۰، تابستان ۱۳۹۷
Vol. 3, No. 2, Issue No. 10, Summer 2018, Quarterly
صفحه ۴۶ - ۳۷

Iran Polymer Technology: Research and Development

سلول‌های خورشیدی پلیمری، آخرین دستاوردها و چالش‌ها

فرامرز افشار طارمی*[۱]، بهاره رضایی[۲]، شیما امیری ریگی[۳]

۱ استاد دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲ دانشجوی دکتری، گروه مستقل شیمی، دانشگاه امیرکبیر

۳ کارشناسی ارشد، مهندسی پلیمرو رنگ، دانشگاه امیرکبیر

چکیده ...

سلول‌های خورشیدی به دلیل آلوده نکردن محیط زیست و تبدیل مستقیم انرژی خورشیدی به الکتریسیته بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. سلول‌های خورشیدی سیلیکونی شکننده بوده، هزینه تولید بالایی دارند، در حالی‌که سلول‌های خورشیدی پلیمری قابلیت انعطاف داشته، هزینه کمتری برای ساخت آن‌ها مصرف می‌شود. مهم‌ترین و کاربردی‌ترین ماده مورد استفاده به‌عنوان الکترود در سلول خورشیدی پلیمری ایندیوم قلع اکسید است. این ماده شکننده بوده، هزینه تولید و بهره‌وری آن بسیار بالاست. بنابراین نیاز زیادی به تولید الکترود منعطف در سلول خورشیدی پلیمری احساس می‌شود. مواد مختلفی مانند گرافن، نانولوله‌های کربنی، پلیمرهای رسانا و نانوکامپوزیت‌های این مواد با ساختارهای فلزی و اکسید فلزی در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. علاوه بر این جذب پایین در سلول‌های خورشیدی پلیمری موجب کاهش بازده در این سلول‌ها شده است که برای بهبود آن‌ها از مواد مختلفی به عنوان جزء سوم استفاده می‌شود. در این پژوهش تلاش می‌شود با ارائه ویژگی‌های سلول‌های خورشیدی، مواد جایگزین برای الکترود سلول‌های منعطف و مواد مورد استفاده به منظور افزایش جذب نور مورد بررسی قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی:

سلول خورشیدی منعطف
بازده
الکترود سلول خورشیدی
نانوساختارهای کربنی و فلزی
جزء سوم

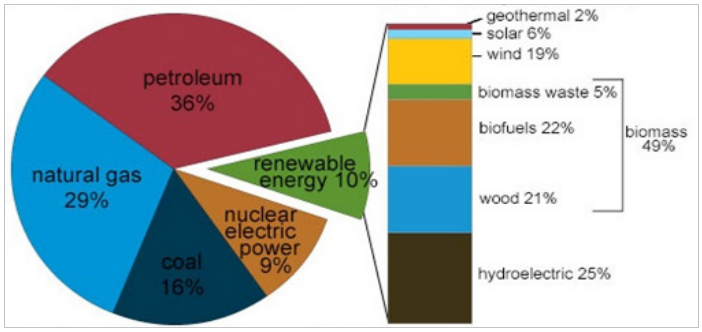
*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
afshar@aut.ac.ir

۱ مقدمه

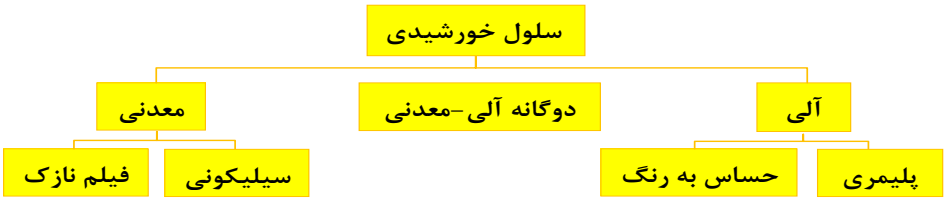
امروزه رشد اقتصادی کشورها وابسته به انرژی است. این انرژی از منابع مختلفی تأمین می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها سوخت‌های فسیلی شامل نفت، زغال‌سنگ و گازهای طبیعی هستند. استفاده از سوخت‌های فسیلی در دهه‌های اخیر رو به کاهش است. این انرژی‌ها، تجدید ناپذیر بوده، با توجه به مصرف بیش از حد انسان‌ها، این ذخایر رو به اتمام هستند. مهم‌تر این که مصرف سوخت‌های فسیلی با تولید گاز کربن دی اکسید (CO_2) باعث آلودگی شدید محیط زیست می‌شود، بنابراین باید به فکر تأمین انرژی از منابع دیگری بود. انرژی‌های تجدیدپذیر شامل انرژی خورشیدی، باد، هیدروالکتریک، هسته‌ای و ... هستند. از آنجا که الکتریسیته، نوع غالب انرژی مصرفی است و بیشتر دستگاه‌ها با نیروی برق کار می‌کنند، انرژی به هر حالتی که تولید شود در نهایت باید به الکتریسیته تبدیل شود. از این رو انرژی خورشیدی که مستقیماً از نور، الکتریسیته تولید می‌کند منبع مناسب تأمین انرژی است. علاوه بر این انرژی خورشیدی یکی از پاک‌ترین منابع انرژی در دسترس است که می‌توان آن را جایگزین سوخت‌های فسیلی کرد [۱]. مطالعات آماری بازارهای جهانی نشان می‌دهد که میزان تقاضا و استفاده از سلول‌های خوشیدی درسال‌های اخیر باسرعت زیادی روبه افزایش است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در سال ۲۰۱۵ حدود ۱۰ درصد از مصرف جهانی، انرژی تجدید پذیر بوده که ۶ درصد آن مربوط به انرژی خورشیدی است.پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۴۰ این میزان از ۶ به ۲۲ درصد افزایش یابد [۲].

اما انرژی پاک خورشیدی، به علت بازده تبدیل انرژی (Power Conversion Efficiency) نسبتاً پایین سلول‌های خورشیدی موجود، منبع گرانی برای تأمین انرژی در ابعاد گسترده است. از این رو نیاز است در این زمینه تحقیقات بیشتری انجام گیرد. در شکل ۱ نمایی از سهم انرژی خورشیدی در مصرف انرژی جهانی نشان داده شده است.

سلول‌های خورشیدی برای عملکرد، وابسته به اثر فتوولتاییک هستند. عبارت فتوولتاییک (Photovoltaic) ترکیبی از کلمه یونانی Photos به معنی نور با Volt به معنی تولید الکتریسیته از نور است. اثر فتوولتاییک برای اولین بار در سال ۱۸۳۹ توسط فیزیکدان فرانسوی، بکرل (Becquerel) کشف شد. او مشاهده کرد هنگامی که باطری تحت تابش نور قرار می‌گیرد ولتاژ آن تغییر می‌کند. در سال ۱۹۵۴، اولین سلول سیلیکونی با بازده تبدیل انرژی ۶ درصد ساخته شد که پیشرفت بزرگی در زمینه سلول‌های خورشیدی به شمار می‌رفت، چرا که اولین سلول خورشیدی بود که با بازده تبدیل انرژی قابل قبولی نور خورشید را به الکتریسیته تبدیل می‌کرد. در سال ۱۹۵۸، از سلول سیلیکونی به عنوان منبع تأمین انرژی در فضاپیماها استفاده شد. در اوایل دهه ۱۹۶۰، طراحی این سلول بهینه شد و تا دهه‌ی بعد مهم‌ترین استفاده آن در صنعت فضایی بود. در اواخر دهه ۱۹۷۰، تولید سلول‌های سیلیکونی گسترده‌تر شد که منجر به کاهش قیمت تمام شده این سلول‌ها و ارزان‌تر شدن این فناوری شد. به این ترتیب در دهه ۱۹۸۰ سلول‌های خورشیدی وارد بازار تجاری شدند و به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفتند [۳].



شکل ۱ نمایی از سهم انرژی خورشیدی در مصرف انرژی جهانی [۲].



شکل ۲ انواع سلول‌های خورشیدی [۳].

۲ انواع سلول‌های خورشیدی

سلول خورشیدی ازلایه‌های مختلفی تشکیل شده است. براساس نوع ماده‌ای که درلایه فعال (Active Layer) سلول به کاربرده می‌شود، سلول‌های خورشیدی را به دودسته معدنی وآلی تقسیم می‌کنند تقسیم‌بندی سلول‌های خورشیدی در شکل ۲ آورده شده است.

۲-۱سلول‌های خورشیدی پلیمری و ساختار آن

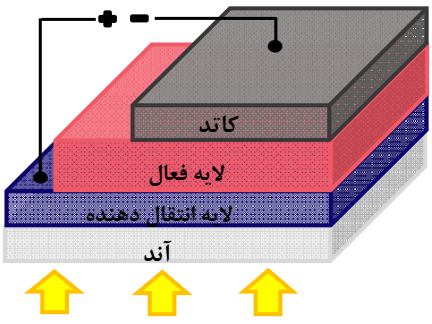
سلول‌های خورشیدی پلیمری، دسته‌ای از سلول‌های خورشیدی آلی هستند، که در لایه فعال آن‌ها از پلیمر مزدوج (Conjugated Polymers) استفاده شده است. امروزه بازده این سلول‌های خورشیدی به ۱۰ درصد رسیده است. با توجه به هزینه ساخت کم و انعطاف پذیری، با وجود بازده کم، این سلول‌ها وارد رقابت با سلول‌های سیلیکونی شده‌اند. در حال حاضر تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه صورت می‌گیرد و این فناوری به طور چشمگیری رو به پیشرفت است [۴].

در شکل ۳ نمایی از ساختار سلول خورشیدی پلیمری نشان داده شده است. سلول خورشیدی پلیمری دارای لایه فعالی است که بین دو لایه الکترود قرار گرفته است. در برخی سلول‌ها از لایه‌های کمکی نیز برای سهولت برقراری جریان، استفاده می‌شود. هر یک از لایه‌ها در ادامه معرفی خواهند شد [۵].

۳ الکترود سلول خورشیدی پلیمری و چالش‌های پیش‌رو

در هرسلول خورشیدی با ساختار معمول، کاتد، الکترود پذیرنده الکترون است؛ از این رو باید از ماده‌ای ساخته شود که تابع کار (Work Function) (کمینه کار ترمودینامیکی لازم برای جدا کردن یک الکترون از جامد به نقطه‌ای بی‌نهایت نزدیک سطح جامد) کوچکی داشته باشد و بتواند به راحتی الکترون از دست داده، جریان را برقرار کند. از سوی دیگر کاتد باید ماده‌ای رسانا با پایداری شیمیایی مناسب باشد تا با لایه فعال وارد واکنش نشود. متأسفانه موادی که تابع کار آن‌ها کوچک باشد معمولاً از لحاظ شیمیایی، پایداری مناسبی ندارند. از موادی همچون کلسیم و سدیم که رسانایی بالایی دارند و تابع کار آن‌ها نیز کوچک است در ساخت کاتد استفاده نمی‌شود چرا که این مواد به شدت فعال هستند. به همین علت برای ساخت کاتد به سراغ موادی می‌روند که از لحاظ شیمیایی پایدارتر باشند، گر چه تابع کار آن‌ها بزرگتر باشد [۶]. از آلومینیوم به علت رسانایی خوب، پایداری شیمیایی و تابع کار مناسب (۴/۲ eV) در ساخت کاتد بسیار استفاده می‌شود.

بر خلاف کاتد، آند سلول خورشیدی، الکترود جمع‌کننده حفره است که باید تابع کار بزرگی داشته باشد. آند علاوه بر رسانایی خوب باید شفافیت مناسبی نیز داشته باشد تا بتواند نور را عبور دهد به همین



شکل ۳ نمایی از ساختار سلول خورشیدی پلیمری [۵].

علت به آن الکترود شفاف و رسانا ((TCE (Transparent Conducting Electrode) می‌گویند. در حال حاضر از اکسید قلع ایندیوم (ITO) به علت شفافیت و رسانایی الکتریکی بسیار خوب، در ساخت الکترود شفاف و رسانا استفاده می‌شود. ایندیوم قلع اکسید به دلیل منابع محدود در طبیعت، هزینه آماده‌سازی بالا و شرایط سخت تهیه، نیاز به جایگزین دارد. مواد مختلفی برای جایگزین کردن ایندیوم قلع اکسید در الکترود شفاف رسانا به‌کار برده شده‌اند؛ از جمله آن‌ها می‌توان به پلیمرهای رسانا، نانوساختارهای فلزی، گرافن و نانولوله‌های کربنی اشاره کرد [۷].

۳-۱ الکترودهای برپایه گرافن

گرافیت یکی از آلوتروپ‌های کربن است که در آن اتم‌های کربن به صورت شش ضلعی لانه زنبوری کنار هم قرار گرفته‌اند. گرافیت ساختاری لایه لایه دارد که هر کدام از این لایه‌ها با پیوند ضعیف واندروالسی به هم متصل شده‌اند. با غلبه بر این نیرو و جدا کردن لایه‌های گرافیت از یکدیگر ساختار جدید گرافن (Graphene) حاصل می‌شود [۵].

مفهوم گرافن نخستین بار در سال ۱۹۴۷ توسط فیلیپ والاس (Philip Wallace) مطرح شد و پس از آن تلاش زیادی برای ساخت این ماده صورت گرفت. در آن زمان قضیه‌ی مرمین-واگنر (Mermin–Wagner Theorem) در مکانیک آماری و نظریه میدان‌های کوانتومی ساخت ماده دو بعدی را غیرممکن و چنین ماده‌ای را ناپایدار می‌پنداشت. سرانجام در سال ۲۰۰۴ آندره گایم (Andre Geim) و کنستانتین نووسلف (Konstantin Novoselov) از دانشگاه منچستر موفق به ساخت گرافن دو بعدی شدند و جایزه نوبل فیزیک سال ۲۰۱۰ را از آن خود کردند. این دو دانشمند از چسب نواری برای جدا کردن لایه‌های گرافن استفاده کردند که امروزه به روش نوار اسکاچ معروف شده است. از آن پس تلاش برای بهبود خواص گرافن و رسیدن به روش بهینه ساخت این ماده شگفت‌انگیز آغاز شد [۸].

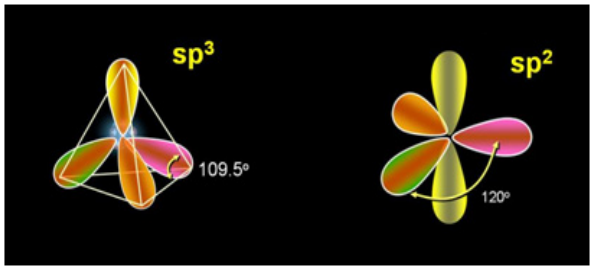
گرافن ماده‌ای دو بعدی با ضخامت یک لایه اتم کربن با اتصالات هیبریدی SP^2 است که در آن چهارمین الکترون پیوندی کربن به عنوان الکترون آزاد باقی مانده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، ۳ پیوند کوالانسی بین اتم‌های کربن در گرافن وجود دارد که خواص مکانیکی فوق‌العاده‌ای به آن بخشیده است و الکترون چهارم به عنوان الکترون آزاد، رسانایی الکتریکی را در گرافن به وجود آورده است. حال آن‌که الماس با اتصالات هیبریدی SP^3 به علت دارا بودن چهار پیوند کوالانسی بین اتم‌های کربن، جزء سخت‌ترین مواد شناخته شده در جهان است؛ اما به علت نداشتن الکترون آزاد، رسانایی الکتریکی ندارد [۸].

گرافن تعداد لایه‌های متفاوتی دارد. گرافن با ضخامت یک، دو و سه لایه اتم کربن را به ترتیب گرافن تک لایه، دو لایه و سه لایه گویند. اگر تعداد لایه‌ها بین ۵ تا ۱۰ باشد آن را گرافن کم لایه، و اگر بین ۲۰ تا ۳۰ لایه باشد آن را گرافن چند لایه یا ضخیم گویند [۸].

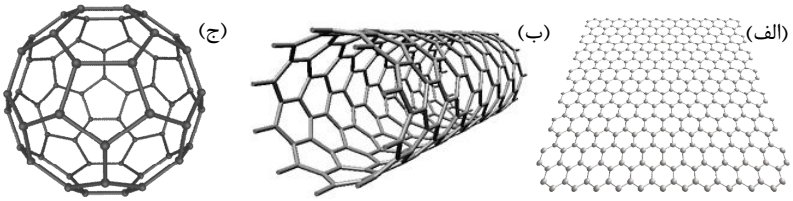
گرافن به علت خواص فوق‌العاده مکانیکی و نوری، استحکام کششی بالا، رسانش بالای الکتریکی و گرمایی، تحرک پذیری (Carrier Mobility) و چگالی بار (Carrier Density) بالا، به ماده‌ای شگفت‌انگیز در عصر جدید تبدیل شده است. امروزه گرافن در بیشتر دستگاه‌های نوری-الکتریکی مانند سلول‌های خورشیدی، دیودهای نوری، ابرخازن‌ها، باطری‌ها، صفحه‌های نمایش و ... کاربرد دارد [۹].

دیگر نانوساختارهای کربنی مانند نانولوله‌های کربنی (Carbon Nanotubes,CNT) و فولرن (Fullerene) که به ترتیب از لوله شدن و کروی شدن گرافن حاصل می‌شوند در شکل ۵ قابل مشاهده است.

امروزه الکترودهای شفاف و رسانا یکی از بخش‌های اصلی دستگاه‌های الکترونیکی مدرن مانند صفحات نمایش، صفحات لمسی، دیودهای گسیل نوری آلی و سلول‌های خورشیدی را تشکیل می‌دهند. همان‌طور که گفته شد، در ساخت الکترودهای شفاف رسانا، معمولاً از ایندیوم قلع اکسید که شفافیت و رسانایی الکتریکی بالایی دارد، استفاده می‌شود [۱۰]. در سال‌های اخیر



شکل ۴ ساختار اوربیتال‌های هیبریدی SP^2 در گرافن و SP^3 در الماس [۸].



شکل۵ نانوساختارهای کربنی (الف) گرافن، (ب) CNT، (ج) فولرن [۸]

محققان برای ساخت الکترود منعطف، به دنبال جاگزین کردن ایندیوم قلع اکسید با دیگر مواد رسانا هستند. ایندیوم قلع اکسید به طور ذاتی شکننده است و در ساخت سلول خورشیدی پلیمری منعطف نمی توان از آن استفاده کرد. ایندیوم قلع اکسید از ترکیب In_2O_3 و SnO_2 تشکیل شده است که ۷۵ درصد مصرف جهانی ایندیوم را به خود اختصاص داده است. از طرفی ایندیوم فلزی نادر است و با پیشروی در این مسیر انتظار می رود که قیمت ایندیوم روند صعودی داشته باشد. در نتیجه استفاده از ایندیوم قلع اکسید اقتصادی نیز نیست [۱۱]. از دیگر دلایل نیاز به جایگزینی ایندیوم قلع اکسید، دمای فرآورش بالا، منابع محدود قلع و ناپایداری در محیط های قلیایی و اسیدی است [۱۲]. نسل بعدی الکترودهای شفاف رسانا که جایگزین ایندیوم قلع اکسید می شوند باید شفاف، رسانا و برای کاربرد در دستگاه های خمش پذیر، منعطف نیز باشند. در ضمن ایندیوم قلع اکسید برای کاربرد به عنوان آند بر زیرلایه شیشه نشانده می شود، اما شیشه ساختار صلبی دارد و دردستگاه های منعطف از پلی اتیلن ترفتالات یا پلیمرهای منعطف دیگر به جای شیشه استفاده می شود [۱۳].

۳-۲ الکترودهای بر پایه پلیمرهای رسانا

از (۳و۴-اتیلن دی اکسی تیوفن) پلی استایرن سولفونات دوپه شده به علت شفافیت و رسانایی بالا در ساخت الکترود سلول خورشیدی و دیودهای نشر نور آلی استفاده می شود. بزرگترین مشکل این پلیمر رسانا برای کاربرد به عنوان الکترودهای شفاف رسانا، ناپایداری در محیط مرطوب، تحت تابش فرابنفش و دماهای بالا است. بنابراین باید قبل از استفاده به عنوان الکترود، پایداری آن را بهبود داد [۱۳].

در سال ۲۰۱۷، لی (Lee) و همکارانش از کامپوزیت گرافن با (۳و۴-اتیلن دی اکسی تیوفن)پلی استایرن سولفونات در ساخت الکترود شفاف رسانا برای کاربرد در سلول خورشیدی منعطف استفاده کردند [۱۴].

۳-۳ الکترودهای برپایه نانوساختارهای فلزی

از ترکیبات فلزی نیز به علت رسانایی بالا در ساخت الکترود بسیار استفاده می شود؛ اما از فلزات به علت شفاف نبودن نمی توان در ساخت الکترود شفاف رسانا استفاده کرد. برای رفع این مشکل سه راه حل پیشنهاد شده است: ۱- استفاده از صفحات فلزی با ضخامت بسیار کم (کمتر از طول موج نور مرئی). ۲- استفاده از صفحات طرح دار فلزی. ۳- استفاده از نانوساختارهای فلزی.

در روش اول با کاهش ضخامت صفحات فلزی از رسانایی و استحکام این مواد کاسته شده، توانایی کاربرد در الکترود را از دست می دهند. در روش دوم از طرح هایی روی صفحات فلزی استفاده می شود و به این ترتیب قسمتی از صفحات دارای شفافیت ۱۰۰ درصد بوده، شفافیت نسبی در الکترود ایجاد می کنند؛ این روش بسیار هزینه بر است. در روش سوم از نانوسیم ها، نانوذرات و دیگر نانوساختارهای فلزی در ساخت الکترود شفاف رسانا استفاده می شود که دارای شفافیت نسبی و رسانایی الکتریکی مناسبی هستند [۱۱].

۳-۴ الکترود بر پایه نانوذرات طلا

از نانو ذرات طلا به علت رسانایی بالای الکتریکی، پراکندگی (Scattering) و توانایی تنظیم تابع کار مواد گرافنی، در ساخت الکترود شفاف و رسانای سلول خورشیدی استفاده می شود.

برای مثال کی (Ki) و همکارانش با قرار دادن فیلم گرافن در محلول کلروریک اسید (Chloroauric Acid) و جذب نانوذرات طلا روی سطح گرافن باعث افزایش رسانایی الکتریکی گرافن شدند. جذب نانوذرات طلا

منجر به دوپه کردن قوی نوع p در گرافن می‌شوند و در این حالت به علت رسانایی بالای نانوذرات طلا، مقاومت صفحه‌ای از ۴۴۸ به Ω/sq ۱۵۰ کاهش می‌یابد در حالی که شفافیت تنها ۲ درصد کم می‌شود [۱۸].

۳-۵ الکترود بر پایه نانوسیم‌های نقره

اخیراً الکترودهای رسانا بر پایه نانوسیم‌های نقره، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. کولمن و همکارانش از فیلم نانوسیم نقره به عنوان الکترود استفاده کردند و به شفافیت ۸۵ درصد و مقاومت صفحه‌ای Ω/sq ۱۳ رسیدند. الکترود حاصل، منعطف بوده، مقاومت آن طی ۱۰۰۰ دوره خمش تغییر چندانی نکرد. مشکل عمده نانوسیم‌های نقره، اکسید شدن در حضور هوا و عدم پایداری شیمیایی است. که برای رفع این مشکل می‌توان از ترکیب این ماده با دیگر مواد رسانا استفاده کرد [۱۹].

در سال ۲۰۱۴، میناکشی(Meenakshi) و همکارانش از نانوسیم نقره در ساخت الکترود شفاف رسانا استفاده کردند. آن‌ها متوجه شدند که به علت اکسید شدن نقره در حضور هوا، الکترود حاصل مقاومت صفحه‌ای بسیار بالایی دارد. آن‌ها به منظور کاهش مقاومت از ترکیب گرافن و نانوسیم نقره در ساخت الکترود استفاده کردند که باعث شد مقاومت الکترود از Ω/sq ۲۰۰۰ به Ω/sq ۳۰۰ کاهش یابد.

در سال ۲۰۱۱، مورگنسترن (Morgenstern) و همکارانش از نانوسیم نقره پوشش داده شده با نانوذره اکسید روی در ساخت الکترود شفاف و رسانا برای سلول خورشیدی استفاده کردند. نانو ذرات اکسید روی مانع اکسید شدن نانو سیم‌های نقره شده، پایداری شیمیایی آن‌ها را بالا می‌برد [۱۹].

۳-۶ الکترود بر پایه نانولوله‌های کربنی و گرافن

نانولوله‌های کربنی موادی به نسبت ارزان هستند که می‌توان به راحتی از آن‌ها در سطح گسترده، فیلم تهیه کرد و به عنوان الکترود برای انواع دستگاه‌های الکترونیکی استفاده کرد. اما همان‌طور که گفته شد، مقاومت در اتصالات بین لوله‌ای نانولوله‌های کربنی بسیار بالاست که در مجموع رسانایی الکتریکی فیلم را کاهش می‌دهد.

تحقیقات نشان داده است که گرافن به علت خواص مکانیکی، الکتریکی و نوری بسیار خوب می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی برای ایندیوم قلع اکسیددر الکترودهای شفاف و رسانا باشد. از الکترود شفاف و رسانای گرافنی در صفحات لمسی، کارت‌های حافظه، شناساگرهای نوری، حسگرهای زیستی، ترانزیستورها، دیودهای نشردهنده نور آلی و سلول‌های خورشیدی استفاده شده است. با این حال تحرک‌پذیری گرافن به شدت، به روش سنتز آن و کیفیت گرافن نهایی وابسته است. بنابراین چالش اصلی در جایگزین کردن ایندیوم قلع اکسید با گرافن، مقاومت صفحه‌ای بالای گرافن است. مقاومت صفحه‌ای گرافن را می‌توان با افزایش چگالی بار، تحرک‌پذیری و تعداد لایه‌ها، کاهش داد. تحرک‌پذیری گرافن وابسته به روش سنتز آن است و می‌توان با بهینه کردن روش سنتز، آن را افزایش داد. علاوه بر این، تغییر چگالی بار گرافن با فرایند دوپینگ آن امکان‌پذیر است.

تحقیقات نشان داده است که ترکیب گرافن با دیگر مواد رسانا، مانند نانولوله‌های کربنی و نانوذرات فلزی می‌تواند در بهبود خواص و رسیدن به الکترود شفاف و رسانای بهینه، موثر باشد. در جدول ۱ مقایسه‌ای بین مواد به‌کار رفته در الکترودهای شفاف رسانا برای جایگزین کردن ایندیوم قلع اکسید ارائه شده است.

۴ افزایش جذب سلول‌های خورشیدی

در سال‌های اولیه (۱۹۸۰-۱۹۵۰)، سلول‌های خورشیدی معمولاً از یک ماده آلی تک جزئی تشکیل می‌شدند اما بازده بسیار پایینی داشتند. مفهوم اتصالات ناهمگن توده‌ای (BHJ) برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ گزارش و ترکیب دو جزئی با این ساختار در لایه فعال غالب شد. در مقایسه با سلول‌های خورشیدی آلی تک جزئی، سلول‌های‌خورشیدی آلی دوجزئی مزایای متعددی را نشان دادند؛ از جمله: جدایش موثر بار ناشی از انتقال الکترون در اثر القای نور در سطح مشترک مواد الکترون‌دهنده/گیرنده (D/A) و بازده بالاتر جمع‌آوری بارناشی از شبکه دو بعدی در ترکیب D/A و در نتیجه، سلول‌های خورشیدی آلی دوجزئی بازده تبدیل انرژی‌ای تا ۱۰درصد برای تک اتصال‌ها [۲۰] و۱۱درصد برای اتصال دو طرفه [۲۱] نشان دادند. اگرچه بازده سلول‌های خورشیدی آلی دو جزئی نسبت به ۲۰ سال قبل بهبود یافته‌اند، اما هنوز در سلول‌های خورشیدی آلی دوجزئی نقطه‌ضعف‌هایی وجود دارد. به عنوان مثال ترکیب دوتایی پلی ۳-هگزیل تیوفن (P3HT) / فنیل سی۶۱ بوتیریک اسید متیل استر

جدول۱ مقایسه بین مواد به‌کار رفته در TCE برای جایگزین کردن ITO [۱۳].

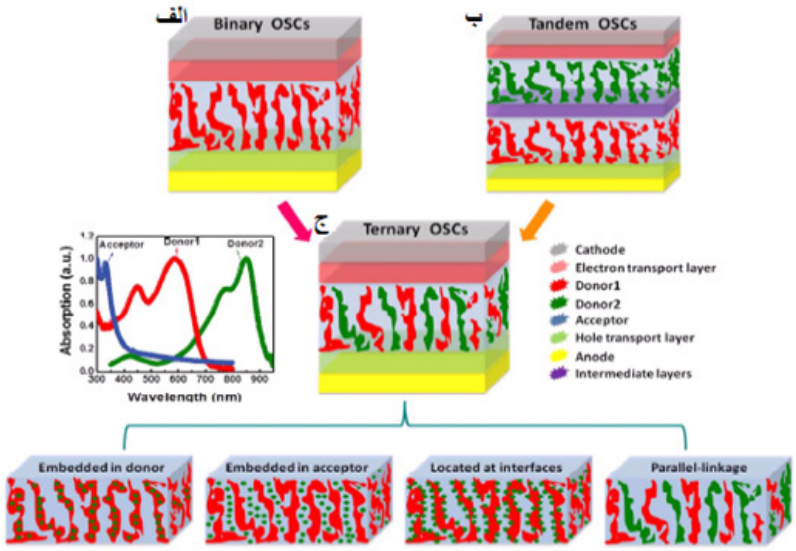
الکترود	مقاومت (Ω/sq)	شفافیت (٪)	معایب
ایندیوم قلع اکسید	۲۵	۸۵	شکنندگی، منابع محدود، ناپایداری
گرافن	۳۰	۹۰	مشکل روش سنتز در گرافن با کیفیت
نانولوله های کربنی	۱۵۰۰	۹۰	مقاومت بالا،ناخالصی
توری طلا	۵	۷۹	فرآیند پیچیده، سطح کوچک
نانوسیم نقره	۱۱۰	۹۰	چسبندگی ضعیف، ناهمواری سطح بالا
پلی اتیلن دی اکسی تیوفن:پلی استایرن سولفونات	۲۵۰	۸۰	مقاومت بالا، ناپایداری شیمیایی

(PC61BM)([6,6]-Phenyl C61 Butyric Acid Methyl) (ester هنوز مشکلات جدی دارد: ۱) طیف جذب این فیلم مخلوط، گسترده (کمتر از ۶۵۰ نانومتر) و قوی نیست (فیلم بسیار ضخیم مورد نیاز است)؛ ۲) بالاترین اوربیتال مولکولی دارای الکترون ((Highest Occupied Molecular Orbital(HOMO) و پایین‌ترین اوربیتال مولکولی فاقد الکترون ((Lowest Unoccupied Molecular Orbital(LUMO به طور قابل توجهی بیشتر از ۰/۳eV است (حداقل مقدار مورد نیاز برای انتقال بار) و منجر به از دست دادن انرژی و کاهش انتقال موثر بار می‌شود. ۳) ترکیبی ساده از ماده الکترون‌دهنده و الکترون‌گیرنده نمی‌تواند مسیرهای انتقال موثربار را ایجاد کند.۴) اتصال شاتکی (Schottky) بین لایه فعال و الکترودها و جدایی فازی نامطلوب به صورت عمودی مانع استخراج موثر بار در الکترودها می‌شود. ۵) ریزساختار فیلم مخلوط در حین حرارت‌دهی یا مدت زمان طولانی پایدار نیست. سلول‌های خورشیدی آلی سه جزئی شامل ماده الکترون دهنده، الکترون پذیرنده و جزء سوم (آلی یا معدنی، نیمه هادی یا عایق)هستند. در هشت سال اخیر افزودن جزء سوم توجه زیادی را به خود جلب کرده، بازده تبدیل توان را به۱۱درصد افزایش داده است. در مقایسه با ترکیب دو جزئی، سلول‌های خورشیدی سه جزئی دارای مزایایی هستند: جذب وسیع‌تر و قوی‌تر، انتقال بار بیشتر، مسیرانتقال بار موثرتر، استخراج بار بهتر در الکترود و بهبود پایداری.

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، سلول‌های خورشیدی سه جزئی بر اساس سامانه D1/ D2/A، مزایای متعددی از جمله ساختار ساده دستگاه و طیف وسیعی از برداشت فوتون را نشان می‌دهند. سازوکاری که فرایند فتوولتائیک را در سلول‌های خورشیدی سه جزئی کنترل می‌کند بسیار متفاوت از سلول‌های خورشیدی دوجزئی معمول است. در سلول‌های خورشیدی سه جزئی با توجه به محل قرارگیری جزء سوم، فرایند انتقال بار و انتقال انرژی متفاوت است (شکل ۱ (c)). بخش سوم می‌تواند: i) به طور کامل در ماده الکترون‌دهنده قرار گیرد؛ ۲) به طور کامل در ماده الکترون‌گیرنده قرار بگیرد؛ iii) در سطح مشترک مواد الکترون‌دهنده / الکترون‌گیرنده قرار گیرد یا iv) کانال‌های خود را ایجاد کند [۲۲].

۴-۱ الکترون دهنده / نقاط کوانتومی / الکترون گیرنده

نقاط کوانتومی (QDs) به عنوان الکترون گیرنده در سلول‌های خورشیدی آلی به دلیل پاسخ نوری مستقل از اندازه آن‌ها، تولید موثر حاملان بار و هزینه کم آن‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. در سال‌های اخیر، از QD نیز به عنوان جزء سوم در سلول‌های خورشیدی آلی استفاده کردند. سولفید سرب، کادمیوم سلناید (CdSe) و کادمیوم تلوراید (CdTe) بیشترین استفاده به عنوان جزء سوم را داشتند، اما متأسفانه تنها چند پروژه به کارایی

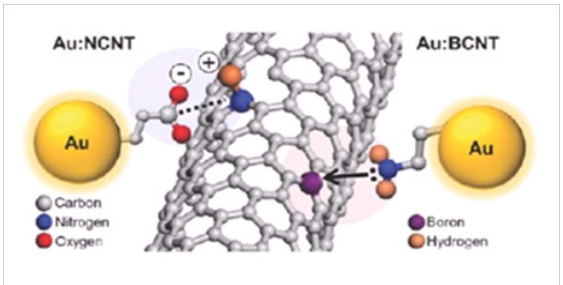


شکل ۶ طرح‌واره پیکربندی الف) سلول‌های دو جزئی قدیمی، ب) سلول‌های پشت سر همو ج) سلول‌های سه جزئی با چهار ریزساختارممکن لایه فعال بر اساس محل قرارگیری جزء سوم [۲۲]

بالاتر رسید. به عنوان مثال، سلول‌هایی که دارای نقاط کوانتومی کادمیوم سلنایدبودند عملکرد بهتری نسبت به سامانه دوتایی $P3HT/PC_{61}BM$ نشان دادند [۲۳].

۴-۲ الکترون دهنده/ نانومواد بر پایه کربن/ الکترون گیرنده

نانومواد بر پایه کربن می‌توانند مسیرهای هدایت‌کننده در لایه فعال را به علت تحرک بسیار زیاد حامل‌های بار، ایجادکنند. نانولوله‌های کربنی (CNT)، یکی از نانومواد بر پایه کربنی است که به طور گسترده در سلول‌های خورشیدی به عنوان جزء سوم مورد استفاده قرار گرفته است. به تازگی گروه مشابهی از نانوذرات طلا و CNTهای دوپ شده با بور (Au:BCNT) و نانولوله‌های کربنی دوپ شده با نیتروژن (Au:NCNT) به عنوان جزء سوم در مخلوط $PTB7/PC_{71}BM$ (شکل ۷) مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از مقدار کمی Au:BCNT موجب افزایش برانگیختگی نور، جدایش زوج الکترون- حفره به صورت حامل‌های بار و انتقال بار به الکترودها می‌شود. اثرات هم‌افزایی چندگانه منجر به کارایی بسیار بالای ۹/۸۱ درصد شد [۲۴].



شکل ۷ طرح‌واره برهم‌کنش‌های شیمیایی برای Au:NCNT (چپ) و Au:BCNT (راست) [۲۴]

۵ نتیجه‌گیری

سلول‌های خورشیدی پلیمری منعطف، با داشتن الکترودهای جایگزین ایندیوم قلع اکسید می‌توانند در حوزه‌های متفاوتی مورد استفاده قرار گیرند. استفاده از ساختارهای کربنی و ترکیبات آن‌ها با نانوساختارهای فلزی و پلیمرهای رسانا می‌تواند تابع کار مناسب الکترود در سلول‌های خورشیدی پلیمری را ایجاد کند و در نتیجه جایگزینی آن‌ها با ایندیوم قلع اکسید امکان‌پذیر شود. تحقیقات زیادی بر روی مواد جایگزین ایندیوم قلع اکسید انجام گرفته، ترکیبات کربنی مانند گرافن و نانولوله‌های کربنی نتایج خوبی را نشان دادند. استفاده از ساختارهای فلزی مانند نانوسیم‌های نقره، نانوذرات

فلـزی و نانـوذرات اکسـید فلـزی ماننـد اکسـید روی می توانند همـراه بـا ترکیبـات کربنـی مـورد اسـتفاه قـرار گیرنـد. اضافـه کـردن نانوسـاختارهای فلـزی می توانـد رسـانایی گرافـن و نانولوله هـای کربنـی را بهبـود داده، تابـع کار آن را تحـت تأثیر قـرار دهـد. الکتـرود آنـد در سـلول خورشـیدی پلیمـری، نیاز بـه رسـانایی بـالا همـراه بـا شـفافیت خـوب دارد. بـر همیـن اسـاس انتخـاب نـوع مـاده جایگزیـن و نیـز ضخامـت لایـه از اهمیـت بالایـی برخـوردار اسـت. بـرای اسـتفاده از ترکیبـات گرافنـی بـا افزایـش ضخامـت لایـه، رسـانایی بـالا مـی رود ولـی میـزان شـفافیت کاهـش می یابـد. بـر همیـن اسـاس به دسـت آوردن میـزان بهینـه رسـانایی و شـفافیت الکتـرود آنـد بسـیار حائـز اهمیـت اسـت.

تلاش هـای زیـادی بـرای افزایـش کارایـی سـلول های خورشـیدی پلیمـری انجـام گرفتـه اسـت تـا امـکان تجاری سـازی ایـن سـلول ها میسـر شـود. اسـتفاده از جـزء سـوم در سـاختار لایـه فعـال سـلول خورشـیدی می توانـد بـا افزایـش جـذب تابـش نـور خورشـید میـزان الکتریسـیته تولیـدی را افزایـش دهـد. نانـوذرات، نقـاط کوانتومـی، ترکیبـات برپایـه کربـن و پلیمرهـا می تواننـد به عنـوان جـزء سـوم در سـاختار سـلول مـورد اسـتفاده قـرار گیرنـد.

مراجع

1. Weickert J., Dunbar R.B., Hesse H.C., Wiedemann W. and Schmidt Mende, L., "Nanostructured Organic and Hybrid Solar Cells", *Advanced Materials*, 23,1810-1828, **2011**.

2. Green M.A., "Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications, Englewood Cliffs , Australia, **1982**.

3. Zhu H., Wei J., Wang K. and Wu D., "Applications of Carbon Materials in Photovoltaic Solar Cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells,* 93,1461-1470, **2009**.

4. Poortmans J., Arkhipov V., eds., "Thin Film Solar Cells: Fabrication, Characterization and Applications", John Wiley & Sons, USA, 5, **2006**.

5. Liu C., Yi C., Wang K., Yang Y., Bhatta R.S., Tsige M., Xiao S. and Gong X., "Single-junction Polymer Solar Cells with Over 10% Efficiency by a Novel Two-dimensional Donor–acceptor Conjugated Copolymer", *ACS Applied Materials & Interfaces,* 7, 4928-4935, **2015**.

6.Park H., Rowehl J.A., Kim K.K., Bulovic V. and Kong J., "Doped Graphene Electrodes for Organic Solar Cells", *Nanotechnology,* 21, 505204, **2010**.

7. Hecht D.S., Hu L., and Irvin G., "Emerging Transparent Electrodes Based on Thin Films of Carbon Nanotubes, Graphene, and Metallic Nanostructures", *Advanced Materials,* 23, 1482-1513, **2011**.

8. Kazuyoshi T., "Classification of Carbon." In Carbon Nanotubes and Graphene", Second Edition, Department of Molecular Engineering, Japan, 1-5, **2014**.

9. Liu Z., Lau S.P. and Yan, F., "Functionalized Graphene and Other Two-dimensional Materials for Photovoltaic Devices: Device Design and Processing", *Chemical Society Reviews,* 44, 5638-5679, **2015**.

10. Meenakshi P., Karthick R., Selvaraj M. and Ramu S., "Investigations on Reduced Graphene Oxide Film Embedded with Silver Nanowire as a Transparent Conducting Electrode", *Solar Energy Materials and Solar Cells,* 128, 264-269, **2014**.

11.Zhang Y.I., Zhang L. and Zhou C., "Review of Chemical Vapor Deposition of Graphene and Related Applications", *Accounts of Chemical Research,* 46, 2329-2339, **2013**.

12. Huang J.H., Fang J.H., Liu C.C. and Chu C.W., "Effective Work Function Modulation of Graphene/carbon Nanotube Composite Films as Transparent Cathodes for Organic Optoelectronics", *Acs Nano*, 5, 6262-6271, **2011**.

13. Chang H., Wang G., Yang A., Tao X., Liu X., Shen Y. and Zheng Z., "A Transparent, Flexible, Low Temperature, and Solution Processible Graphene Composite Electrode", *Advanced Functional Materials*, 20, 2893-2902, **2010**.

14. Lee C.P., Lai K.Y., Lin C.A., Li C.T., Ho K.C., Wu C.I., Lau S.P. and He J.H., "A Paper-Based Electrode Using a Graphene Dot/PEDOT: PSS Composite for Flexible Solar Cells", *Nano Energy*, 36, 260-267, **2017**.

15. Uikey P. Vishwakarma K., "Review of Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles Applications and Properties", *International Journal of Emerging Technology in Computer Science & Electronics*, 21, 239, **2016**.

16. Brintha S.R. Ajitha M. "Synthesis and Characterization of ZnO Nanoparticles Via Aqueous Solution, Sol-gel and Hydrothermal Methods", *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 8,66-72,**2015**.

17. Cho S., Jang J.W., Jung A., Lee S.H., Lee J., Lee J.S. and Lee K.H., "Formation of Amorphous Zinc Citrate Spheres and Their Conversion to Crystalline ZnO Nanostructures", *Langmuir*, 27, 371-378, **2010**.

18. Kim K.K., Reina A., Shi Y., Park, H., Li L.J., Lee Y.H. and Kong J. "Enhancing the Conductivity of Transparent Graphene Films Via Doping", *Nanotechnology*, 21, 285205, **2010**.

19. Morgenstern F.S., Kabra D., Massip S., Brenner T.J., Lyons P.E., Coleman J.N. and Friend R.H., "Ag-nanowire Films Coated with ZnO Nanoparticles as a Transparent Electrode for Solar Cells", *Applied Physics Letters*, 99, 242, **2011**.

20. Yuhang L., Zhao J., Li Z., Mu C., Ma W., Hu H., Jiang K., Lin H., Ade H., and Yan H., "Aggregation and Morphology Control Enables Multiple Cases of High-efficiency Polymer Solar Cells," *Nature Communications*, 5, 5293, **2014**.

21 MohdYusoff B., Rashid A., Kim D., Kim H., Kurt Shneider F., Jose da Silva W., and Jang J., "A High Efficiency Solution Processed Polymer Inverted Triple-junction Solar Cell Exhibiting a Power Conversion Efficiency of 11.83%." *Energy & Environmental Science 8*, 303-316, **2015**.

22. Qiaoshi A., Zhang F., Zhang J., Tang W., Deng Z., and Hu B., "Versatile Ternary Organic Solar Cells: A Critical Review", *Energy & Environmental Science 9*, 2 , 281-322, **2016**.

23. Honghong F., Choi M., Luan W., Kim Y., and Tu S., "Hybrid Solar Cells with an Inverted Structure: Nanodots Incorporated Ternary System," *Solid-State Electronics*, 69,50-54, **2012**.

24. Zhengguo X., Yuan Y., Yang B., VanDerslice J., Chen J., Gerd Duscher O.D., and Huang J., "Universal Formation of Compositionally Graded Bulk Heterojunction for Efficiency Enhancement in Organic Photovoltaics," *Advanced Materials* , 26, 19, 3068-3075, **2014**.