سال سوم، شماره دوم، زمستان ۱۳۹۵، ص ص ۱- ۸
دو فصل‌نامه علمی – ترویجی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو
renemag.ir

مقاله
تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۳۰

سلول خورشیدی پلیمری: ابزاری نوین در تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی

زهرا تیموری[۱]، لیلا ناجی[۲*]، شعله کاظمی فرد[۳]

۱- کارشناسی ارشد ، شیمی کاربردی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
۲- استادیار، شیمی تجزیه (الکتروشیمی)، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
۳- دانشجوی دکتری، شیمی کاربردی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
* تهران، ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳، leilanaji@aut.ac.ir

چکیده

از میان انواع منابع انرژی تجدیدپذیر، خورشید بعنوان یک منبع بسیار مهم درنظر گرفته می‌شود. سلول‌های خورشیدی دستگاه‌های فوتوولتائیک تبدیل کننده انرژی خورشید به انرژی الکتریکی می‌باشند. درمیان انواع سلول‌های خورشیدی شامل آلی و معدنی، سلول‌های خورشیدی پلیمری بدلیل ساخت آسان، انعطاف پذیری، سبک وزن بودن و هزینه ساخت پایین بسیار مورد توجه هستند. ساختار سلول‌های خورشیدی پلیمری شامل لایه فعالی می‌باشد که بین دو الکترود آند و کاتد ساندویچ شده است. آند در سلول‌های خورشیدی پلیمری، معمولا ایندیوم قلع اکساید (ITO) می‌باشد. امروزه محققان بدلیل کمبود منابع ایندیوم، قیمت بالا و پروسه تولید مشکل، بدنبال جایگزین کردن آن با مواد دیگر از جمله نانوساختارهای فلزی هستند. سلول‌های خورشیدی پلیمری که دارای آندی غیر از ITO هستند را سلول‌های خورشیدی پلیمری ITO-Free می‌نامند. نانوسیم‌های نقره، ترکیبات نویدبخشی در جایگزینی آند ITO می‌باشند که دارای خصوصیات الکترودی و نوری مطلوبی هستند. این مقاله مروری، به معرفی انواع منابع انرژی، انرژی خورشیدی، سلول‌های خورشیدی، ساختار سلول‌های خورشیدی پلیمری و مکانیزم عملکرد آن‌ها، مواد جایگزین آند در این سلول‌ها، سلول‌های ITO-Free و نانوسیم‌های نقره بعنوان جایگزینی موفق برای آند می‌پردازد. همچنین در انتها مقایسه‌ای میان بازده تبدیل انرژی در سلول‌های خورشیدی پلیمری با آند ITO و سلول‌های خورشیدی پلیمری فاقد ITO می‌پردازد.

کلیدواژگان: سلول خورشیدی پلیمری، الکترود نانوسیم نقره، فوتوولتائیک، دستگاه های ITO-Free، آند

Polymer Solar Cell: A New Device in Conversion of Solar Energy to Electricity

Zahra Teymouri[1], Leila Naji[2*], Sholeh Kazemifard[3]

1, 2, 3- Department of Chemistry, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 15875-4413 Tehran, Iran, leilanaji@aut.ac.ir
Received: 1 March 2016 Accepted: 19 May 2016

Abstract

Among the renewable resources of energy, sun is known as a main resource. Solar cells are devices that convert solar energy to electricity by photovoltaic effect. Among different types of solar cells including organic and inorganic cells, polymer solar cells (PSCs) caused to easy fabrication process, flexibility, light weight and low cost fabrication are interested. PSCs are constructed of an active layer that is sandwiched between two anode and cathode electrodes. Indium Tin Oxide (ITO) usually applied as anode in PSCs. Today scientists are surveyed on replacement of ITO with metallic nanostructures, due to loss of Indium source, high cost and complicated process for production of ITO. ITO-Free PSCs are devices that have not ITO in structure. Silver nanowires are promising candidate for ITO replacement based on favourable electrode and optical properties. In this review article, different types of energy sources, solar energy, solar cells, PSC structure and PSC performance mechanism, ITO replacement materials, ITO Free devices and Ag-NWs as good candidates for anode are considered. Also, a comparison between the power conversion efficiency of ITO based PSC and ITO-Free PSC is reported.

Keywords: Polymer Solar Cell, Ag-NW Electrode, Photovoltaic, ITO-Free Devices, Anode

۱- مقدمه ای بر انواع انرژی

منابع انرژی به دو دسته منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تقسیم می‌شوند. منابع تجدیدناپذیر مانند نفت، زغال سنگ و گاز طبیعی اثرات مخرب زیست محیطی بسیاری داشته و با داشتن اثرات گلخانه‌ای موجب گرم شدن کره زمین می‌شوند. از سویی دیگر، کاهش ذخایر منابع تجدیدناپذیر در جهان باعث تشدید نگرانی‌ها در استفاده از آن‌ها شده است. انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، انرژی باد، انرژی موج‌ها و جذر و مد نامحدود هستند. یکی از مزایای استفاده از منابع تجدیدپذیر آن است که این منابع هیچ گونه اثر گلخانه‌ای و یا آلودگی به همراه ندارنـد. استفاده از این منابع بی‌انتها بوده و این منابع محدودیت کاربردی ندارند [۱]. با توجه به پیش بینی‌های انجام شده مبنی بر اتمام ذخایر منابع انرژی تجدیدناپذیر و با توجه به اثرات مخرب زیست محیطی ناشی از استفاده‌ی این منابع، باید روش‌های جدیدی برای تأمین انرژی به کار گرفته شود. در معرفی یک تکنولوژی جدید، پارامترهای مختلفی از قبیل نوع مواد، سمیت و آلودگی زیست محیطی، هزینه‌ی پایین، سبک بودن، بازده بالا، تکرارپذیری بالا، روش ساخت آسان و ساده باید مورد بررسی قرارگیرد [۲]. انرژی های تجدید پذیر را می توان به انرژی های باد، خورشید، زمین گرمایی، هیدروالکتریک و زیست توده تقسیم بندی نمود [۳]. درمیان منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی خورشید، امیدوارکننده ترین و قابل اعتماد ترین منبع انرژی در بسیاری از کشورهاست [۴].

۱-۲- انرژی خورشیدی

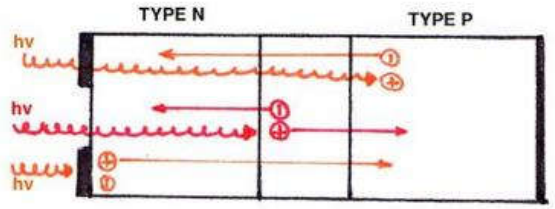
خورشید یک کره‌ی داغ تشکیل شده از گاز می‌باشد که دمای درونی آن به علت واکنش‌های همجوشی هسته‌ای در اثر تبدیل هیدروژن به هلیوم در هسته‌ی خورشید، به ۲۰ میلیون درجه‌ی کلوین می‌رسد. تشعشعات هسته‌ی درونی توسط لایه‌ی اتم‌های هیدروژن نزدیک به سطح خورشید به شدت جذب شده و به این دلیل قابل رؤیت نیست. گرما از طریق این لایه توسط همرفت منتقل می‌شود [۵]. انرژی کل ساتع شده‌ی خورشید از یک طول موج منفرد تشکیل نشده است بلکه از طول موج‌های بسیاری تشکیل شده است بنابراین به رنگ سفید یا زرد به چشم انسان به نظر می‌رسد [۶]. خورشید انرژی خود را از طریق فرایند ترمو هسته‌ای[1] که تبدیل حدود ۶۵۰ میلیون تن هیدروژن به هلیوم در هر ثانیه است؛ ایجاد می‌کند. این فرایند گرما و تابش الکترومغناطیس ایجاد خواهد کرد. تنها کسر کوچکی از کل تابش تولید شده خورشیدی به سطح زمین می‌رسد. تابشی که به سطح زمین می‌رسد تقریباً منبع غیرمستقیم هر نوع از انرژی مورد استفاده است [۷]. انرژی خورشید عامل اصلی برای چندین حرکت طبیعی از جمله باد، موج، گرما، نور و... است [۸].

تابش خورشید در ماکزیمم دانسیته شار حدود ۱/۰ kW/m^2 در پهنای طول موج بین ۰/۳ تا ۲/۵ μm به زمین می‌رسد. این تابش طول موج کوتاه در ناحیه‌ی مرئی است و بسته به مکان، زمان و شرایط آب و هوایی متغیر است [۹]. طراحی یک سیستم برای تبدیل انرژی خورشید به انرژی گرمایی و یا الکتریکی مبتنی بر ارزیابی دقیق تابش خورشید با توجه به موقعیت معین و دانش خواص تابش خورشید می‌باشد. در سطح خورشید دما به ۵۰۰۰ کلوین کاهش می‌یابد. خورشید منبع اصلی انرژی است که شرایط آب و هوایی را بر روی سطح زمین تعیین می‌کند. پتانسیل تئوری انرژی خورشید ۸۹۰۰۰ TW تخمین زده شده است که به هر متر مربع پوشش بیرونی اتمسفر ۳۴۲ وات می‌رسد که ٪۳۲ و یا ۱۰۶ وات، بلافاصله درون فضا توسط ابرها، جو و سطح زمین بازتاب می‌گردد. باقیمانده‌ی انرژی یعنی ۲۳۶ W/m^2 توسط زمین، آب سطح اقیانوس‌ها و به طور جزئی اتمسفر جذب می‌گردد و آنها را گرم می‌کند [۱۰]،[۱۱].

انرژی خورشید بیش از هرگونه انرژی دیگر با توجه با تقاضای انرژی قابل تصور در آینده، در دسترس می باشد. بهره برداری از انرژی خورشیدی چالش هایی به همراه خواهد داشت. بهره برداری از این انرژی جهت تولید الکتریسیته به هزینه و سودمندی (بهره وری، بازده) تکنولوژی وابسته است که بهبود مستمر و کاهش هزینه به ازای هر پیک (peak) کیلو وات می باشد [۱۲]. شار تابش خورشید می تواند به صورت حرارتی، فوتوشیمیایی (فوتو ولتاییک) و فوتو فیزیکی (فوتوسنتز) مورد استفاده قرار داد. انرژی خورشید به انواع مستقیم و غیر مستقیم تقسیم بندی می شود. بیشترین منابع انرژی زمین از اشکال غیر مستقیم خورشید هستند. در سیستم هایی که به طور مستقیم از انرژی خورشید استفاده می کنند؛ انرژی خورشید می تواند از طریق پنل‌های خورشید یا آینه‌ها برای تولید الکتریسیته و گرما به دام بیفتد (گرفته شود) [۱۱] ، [۱۳]. خورشید فراوان ترین منبع انرژی برای زمین است. توسعه‌ی فناوری انرژی خورشیدی پاک، بی پایان و مقرون به صرفه دارای مزایای بسیار طولانی مدت می‌باشد. با این پیش زمینه تکنولوژی انرژی خورشیدی می تواند برای گسترش تولید الکتریسیته‌ی پایدار استفاده گردد. برای تبدیل انرژی خورشید به شکل انرژی‌های قابل استفاده برای نیازهای بشر چند مسیر ترمودینامیکی وجود دارد. به طور کلی انرژی گرمایی، سینتیکی، الکتریکی و شیمیایی از تبدیل انرژی خورشید توسط سلول‌های خورشیدی فراهم می‌شوند. در ۵۰ سـال اخیر مطالعـات گسترده ای بر روی طراحی و عملکرد سلول‌های خورشیدی انجام شده که هدف اصلی آنها تولید مدول‌های فوتوولتاییک با کارایی بالا برای رقابت با منابع قدیمی تر انرژی است. در سال‌های اخیـر توسـعه ی نانو تکنولوژی و پیشرفت آن در تولید نانوساختارها، نانو لوله‌ها و نقاط کوانتومی در سـلول‌های خورشیدی، امکان بهبود عملکرد این مدول‌ها در تبدیل انرژی خورشید به جریان الکتریکی و نیـز رونـق اقتصادی آن‌ها را فراهم آورده است [۴].

۲- اثر فوتوولتائیک و سلول‌های خورشیدی

فوتوولتاییک نقش مهمی را در بهره برداری از سلول‌های خورشیدی برای تولید برق ایفا می‌کند. در شکل ۱ اثر فوتوولتاییک نشان داده شده است. فوتوولتاییک تبدیل مستقیم نور خورشید به الکتریسیته در سطح اتمی می‌باشد. پس از کشف اثر فوتوولتائیک، زمینه طراحی و ساخت سلول‌های خورشیدی فراهم شد. بررسی روند پیشرفت سلول‌های خورشیدی از گذشته تا به امروز، نشان می دهد که در طول زمان، ترکیبات مختلفی طراحی و سنتز شده اند که خصوصیات فوتوولتائیک را از خود نشان می دهند [۱۴].

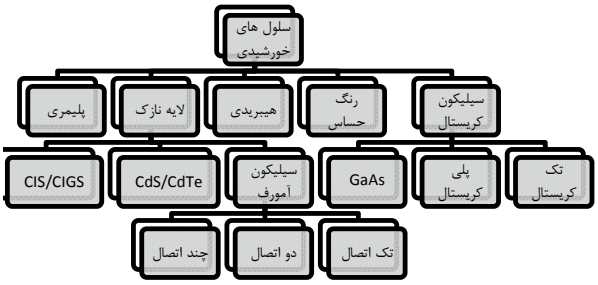


شکل۱ اثر فوتوولتاییک [۱۵]

سلول خورشیدی دستگاهی الکتریکی است که می تواند به واسطه اثر فوتوولتائیک، نور خورشید را با استفاده از یک نیمه رسانا به طور مستقیم به

[1] Thermonuclear

الکتریسیته تبدیل نماید، به همین دلیل به آن‌ها سلول‌های فوتوولتائیک نیز گفته می‌شود. تابش نور به سلول خورشیدی منجر به تولید جریان و ولتاژ خواهد شد که درنهایت انرژی الکتریکی تولید می‌گردد. برای این فرایند، در ابتدا نور توسط یک ماده جذب شده و یک الکترون را به حالت انرژی بالاتر انتقال می‌دهد. سپس توسط یک الکترود، الکترون به مدار خارجی منتقل شده و منجر به تولید الکتریسیته می‌شود. انواع مواد و فرایندها می‌توانند بالقوه الزامات تبدیل انرژی فوتوولتاییک را براورده کنند اما در عمل تقریباً همه‌ی تبدیل انرژی با استفاده از مواد نیمه رسانا به شکل یک اتصال p-n، عملی و امکان پذیراست. عملکرد سلول خورشیدی شامل جذب نور و تولید جفت الکترون-حفره، جدایش حاملان بار و انتقال حاملان بار به سمت مدارخارجی می‌باشد [۶]. در یک دسته بندی کلی انواع سلول‌های خورشیدی را می توان به سلول‌های خورشیدی سیلیکونی، لایه نازک، پلیمری، رنگدانه و هیبریدی دسته بندی کرد [۱۶]. انواع مختلف سلول‌های خورشیدی در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲ انواع سلول‌های فوتوولتاییک [۱۶]

در دسته‌بندی دیگر سلول‌های خورشیدی به عنوان سلول‌های فوتوولتاییک نسل اول، نسل دوم و نسل سوم طبقه بندی می‌شوند. نسل اول این سلول‌ها که سلول‌های سنتی و یا برپایه ویفر نیز نامیده می‌شوند؛ از سیلیکون کریستالی تشکیل شده‌اند. از لحاظ تجاری، این سلول‌ها فناوری غالب فوتوولتاییک شامل موادی از قبیل سیلیکون مونوکریستال و پلی کریستال می‌باشند. سلول‌های خورشیدی نسل دوم، سلول‌های فیلم نازک هستند که شامل سیلیکون آمورف، CdTe، CIGS هستند. سلول‌های خورشیدی نسل سوم شامل تعدادی از تکنولوژی‌های لایه نازک می‌باشند. این سلول‌ها اغلب به عنوان سلول‌های فوتوولتاییک نوظهور توصیف می‌شوند. این سلول‌ها، هنوز در مرحله‌ی تحقیق و توسعه می‌باشند و به صورت تجاری عرضه نمی‌گردند. در این سلول‌ها اکثراً از مواد آلی، ترکیبات آلی فلزی و همچنین مواد معدنی استفاده می‌شود. با وجود این واقعیت که بازده این سلول‌ها پایین بوده و همچنین پایداری مواد جاذب در این سلول‌ها، برای استفاده‌های تجاری بسیار کوتاه می‌باشد؛ تحقیقات بسیاری برروی این تکنولوژی‌ها با هدف دستیابی به سلول‌های خورشیدی با کارایی بالا و هزینه‌ی کم، انجام شده است. باتوجه به مشکلات زیست محیطی، مواد آلی و پلیمری بر اساس تکنولوژی لایه نازک از بهترین انتخاب‌ها می‌باشند [۱۷].

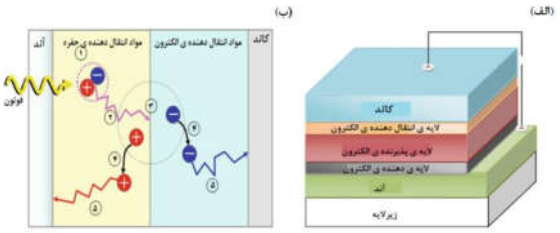
از میان انواع سلول‌های خورشیدی نامبرده، سلول‌های خورشیدی پلیمری بسیار به لحاظ علمی جذاب هستند زیرا به راحتی و با هزینه ای پایین ساخته می‌شوند، سبک بوده و از ویژگی‌های بارز آنها انعطاف‌پذیری است که آنها را برای کاربردهای مختلف قابل استفاده می‌نماید. عملکرد این سلول‌ها با طراحی‌های مولکولی، سنتز پلیمرهای جدید یا ترکیبات نیمه‌هادی آلی، قابل تغییر و افزایش می‌باشد [۱۸].

۳- معرفی سلول‌های خورشیدی پلیمری

در سال‌های اخیر، سلول‌های خورشیدی آلی به ویژه پلیمری انتخاب مناسبی به عنوان جایگزین انواع سلول‌های خورشیدی نسل اول و دوم می‌باشند. سلول‌های خورشیدی پلیمری به طور ویژه مزایایی را نسبت به همه‌ی تکنولوژی‌های فوتوولتاییک دارا می‌باشند که می توان به سرعت تولید بالا، دماهای پایین و همچنین بودجه‌ی کم ساخت اشاره کرد. شکل ۳ یک سلول خورشیدی پلیمری منعطف را نشان می‌دهد [۱۹].

شکل ۳ سلول خورشیدی پلیمری [۱۹]

این سلول‌ها دارای مشکلاتی از جمله طول عمر عملیاتی کوتاه و بازده تبدیل انرژی پایین می‌باشند. با این حال سلول‌های خورشیدی پلیمری به طور مداوم در هر دو زمینه بهبود یافته اند. اکنون طول عمر عملیاتی آن‌ها به چندین سال و بازده تبدیل انرژی این سلول‌ها به ۱۰٪ نیز رسیده است. از ویژگی‌های بارز بسیاری از سلول‌های خورشیدی پلیمری، چاپ کردن یا پوشش دستگاه به صورت مستقیم بر روی یک بستر حامل انعطاف پذیر با استفاده از تکنیک های roll to roll و پرینت که قابلیت حمل و نقل آسان و پردازش سریع را دارند؛ امکان پذیر می‌باشد. برای سلول های خورشیدی آلی دو حالت وجود دارد. دستگاه نرمال که از چهار لایه‌ی آند (ایندیوم قلع اکساید: ITO)، لایه‌ی انتقال حفره، لایه‌ی فعال و کاتد تشکیل شده است. در بعضی از ساختارها از لایه انتقال دهنده الکترون نیز بهره می گیرند [۲۰]. در شکل ۴ لایه‌های مختلف سلول خورشیدی پلیمری نشان داده شده است و شماتیکی از مکانیزم عملکرد این سلول‌ها آورده شده است. نحوه‌ی عملکرد این سلول‌ها به این صورت است که ابتدا نور از الکترود شفاف رسانا عبور کرده و توسط لایه‌ی فعال پلیمری جذب می گردد. پلیمر رسانا که در ساختار لایه فعال به کار گرفته شده است تولید اکسایتون (جفت الکترون- حفره) می‌کند. اکسایتون به سمت فصل مشترک لایه‌ی الکترون دهنده و الکترون گیرنده نفوذ کرده و در آنجا جدایش الکترون و حفره صورت می‌گیرد. پس از جدایش بارها در لایه‌ی فعال، الکترون از طریق لایه‌ی انتقال دهنده‌ی الکترون به سمت کاتد و حفره از طریق لایه‌ی انتقال دهنده‌ی حفره به سمت آند حرکت می‌کند و در نهایت به مدار خارجی منتقل شده و جریان الکتریکی حاصل می‌گردد [۲].



شکل ۴ (الف) لایه‌های مختلف یک سلول خورشیدی پلیمری (ب) شماتیکی از نحوه‌ی عملکرد سلول خوشیدی پلیمری [۲].

۴- سلول‌های خورشیدی پلیمری بدون ITO یا ITO-Free

برای تکنولوژی‌های جدید، در حال حاضر ویژگی‌های جدید مانند انعطاف پذیری بالا، فرایند ساخت آسان، قیمت ارزان و وزن سبک در الکترودهای شفاف مورد نیاز است. ITO نمی‌تواند همه ویژگی‌های مورد انتظار برای نسل جدید دنیای الکترونیک را فراهم آورد. زیرا خواص سرامیکی دارد و بنابراین انعطاف پذیر نیست. مقداری تنش درحد ٪ ۳-۲ می تواند ترک‌هایی در فیلم ITO بر روی بسترهای منعطف ایجاد کند که در این صورت هدایت الکتریکی الکترود و عملکرد دستگاه به شدت کاهش خواهد یافت. ایندیم یک ماده کمیاب است و به این دلیل قیمت ایندیم رو به افزایش می‌باشد. از آنجا که برای ساخت الکترود ITO دما و خلاء بالا مورد نیاز است شرایط تولید این الکترودها مشکل می‌باشد و همچنین انرژی زیادی صرف خواهد شد. همچنین این ترکیب ضریب شکست بالایی دارد. با توجه به موارد ذکر شده، الکترودهای ITO، در بازار رو به رشد کنونی نمی توانند به رقابت بپردازند [۲۱]. در دهه‌ی گذشته محققین سعی کرده‌اند که یک ماده جایگزین مناسب برای ITO پیداکنند. تاکنون آن‌ها پیشرفت‌های قابل توجهی در تولید مواد جایگزین جدید برای الکترودهای شفاف صورت گرفته است. با این حال هر کدام از مواد جایگزین مزایا و معایبی دارند و بررسی‌های بیشتری قبل از تجاری شدن هرکدام نیاز است. مواد کنونی مورد توجه به عنوان جایگزین برای ITO، نانولوله‌های کربنی، گرافن، پلیمرهای رسانای شفاف و نانوسیم‌های فلزی می‌باشند [۲۲].

۴-۱- نانولوله‌های کربنی

اولین بار نانولوله‌های کربنی در سال ۱۹۹۰تهیه شدند. نانولوله‌های کربنی تحرک الکترونی بسیار بالایی دارند[۲۲]. به خاطر تحرک الکترونی بالای نانولوله‌های کربنی، تصور می‌شود که این مواد جایگزین مناسبی برای الکترودهای ITO باشد. اما چالش‌هایی برای فیلم‌های نانولوله‌های کربنی پیش رو است. مهم ترین چالش به رسانایی الکتریکی فیلم نانولوله‌های کربنی مربوط می‌شود. هدایت الکتریکی در فیلم نانولوله‌های کربنی، به وسیله مقاومت ایجاد شده در محل اتصال نانولوله‌های کربنی متصل شده به هم، محدود می‌شود. از این جهت، هدایت فیلم تشکیل شده با نانولوله‌های کربنی به شدت درمقایسه با نانولوله کربنی تک کاهش می‌یابد. تاکنون برخی روش‌هایی برای کاهش مقاومت اتصال بین نانولوله‌ها مطرح شده است [۲۳]،[۲۴].

۴-۲-گرافن

گرافن از لایه‌ی نازکی از اتم‌های کربن با اوربیتال‌های sp^2 متصل به هم تشکیل شده است. از خواص جالب توجه گرافن، اضافه کردن دوپانت‌های خارجی است که هدایت الکتریکی ورقه‌های گرافن را بالا می برد. ضخامت ورقه‌های گرافن درحد چند نانومتر است بنابراین ورقه‌های گرافن نسبت به نور مرئی نسبتا شفاف هستند. بزرگ ترین چالش درمورد گرافن این است که ساخت یک لایه منفرد گرافن در مقیاس بزرگ، کار مشکلی است. اغلب به جای یک ورق گرافن، ورقه‌های گرافنی سنتز می‌گردد. این ورقه‌ها مقاومت بالایی درحد چند کیلو اهم دارند. از آنجا که مقاومت در محل اتصال این ورقه‌ها بالاست؛ بنابراین هدایت الکتریکی کل کم می‌شود. با توجه به شفافیت و هدایت الکتریکی کم، الکترودهای گرافن جایگزین مناسبی برای ITO نمی‌باشند [۲۵]،[۲۶].

۴-۳- پلیمرهای رسانا

پلیمرهای رسانا در اواسط قرن بیستم ظاهر شدند و به خاطر خواص منحصر به فرد مانند انعطاف پذیری بالا، قیمت کم و وزن سبک توجه محققان را به خود جلب کردند. ترکیب پلی (۴،۳ اتیلن دی اکسی تیوفن)- پلی استایرن سولفونات (PEDOT:PSS) یکی از رایج ترین موادی است که به صورت تجاری در دستگاه‌های الکترونیک آلی استفاده می‌شود. یکی از مشکلات بزرگ این پلیمرها، ناپایداری در هوا به علت جذب اکسیژن هوا و رطوبت می‌باشد. برای مثال PEDOT:PSS در زمان کوتاهی در معرض هوا تخریب می‌گردد. علاوه بر پایداری، مشکل بزرگ دیگر این پلیمرها، هدایت الکتریکی پایین می‌باشد[۲۷]،[۲۸].

۴-۴- الکترودهای نانوسیم فلزی

به علت هدایت کم فیلم‌های نانولوله‌های کربنی، گرافن و پلیمرهای رسانا، نانوسیم‌های فلزی یک جایگزین مناسب برای الکترودهای ITO می‌باشند. فلزات بالاترین هدایت الکتریکی را در میان سایر مواد دارند؛ هرچند به علت شفافیت کم در نور مرئی، ساخت الکترودهای فلزی شفاف تا چند دهه اخیر ممکن نبود. با ظهور نانوتکنولوژی و مواد نانوساختار، ساخت الکترودهای شفاف با استفاده از ساختارهای فلزی آسان گشت. نانوسیم‌های فلزی به عنوان رایج ترین مواد مورد استفاده به عنوان الکترودهای رسانای شفاف می‌باشند. نانوسیم‌های فلزی به عنوان یک ساختار تک بعدی در نظر گرفته می‌شوند. آن‌ها به شکل سیم‌هایی هستند که قطر کم تر از ۱۰۰ نانومتر و طول یک میکرومتر یا بیشتر دارند. نانوسیم‌های فلزی مثل مس یا نقره به روش‌های ساده در فاز محلول تهیه می‌شوند و سپس برروی بسترهای شفاف مثل شیشه یا پلاستیک لایه نشانی می‌گردند. شفافیت الکترودهای بر پایه نانوسیم‌های فلزی با مقاومت سطحی کمتر از ۱۰ Ω می تواند به ۹۰ درصد برسد. این مقاومت و شفافیت مشابه با الکترودهای ITO می‌باشد. بنابراین الکترودهای رسانای شفاف برپایه نانوسیم‌های فلزی، جایگزین مناسبی برای ITO می‌باشند. روش ساخت ارزان و ساده، شفافیت بالا و مقاومت سطحی پایین از مزایای ساختارهای نانوسیم فلزی می‌باشد. همچنین الکترودهای نانوسیم از لحاظ مکانیکی انعطاف پذیرند. آن‌ها همچنین شفافیت بالایی در ناحیه ی IR نسبت به ITO دارند بنابراین برای برخی کاربردها مناسب می‌باشند. نقره بالاترین هدایت الکتریکی را در میان سایر مواد دارا است؛ بنابراین نقره یکی از نوید بخش ترین مواد برای تهیه الکترود برپایه نانوسیم می‌باشد [۲۹]، [۳۰]، [۳۱].

۵- بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی پلیمری به منظور دستیابی به بازده تبدیل انرژی خورشیدی بالاتر

بازده تبدیل انرژی خورشیدی در سلول‌های خورشیدی پلیمری پایین است که به دلیل عدم تطابق طیفی بین ترکیبات جاذب نور در این سلول‌ها و تابش خورشیدی می‌باشد، همچنین تحرک پایین حاملان بار و جمع آوری ناکارآمد الکترون و حفره توسط الکترودها به عنوان مهمترین چالش در این مسیر مطرح می‌گردد. در حال حاضر برای بهبود عملکرد این سلول‌ها مطالعات بسیاری درحال انجام است. از تحقیقات جاری در این زمینه می توان به تغییرات کلیدی در لایه فعال در جهت افزایش جذب نور اشاره نمود. همچنین تغییر در الکترود

آند و جایگزین نمودن آن با تریبات دیگر بعنوان الکترود، یکی از مسیرهای مؤثر در تغییر بازده سلول‌های خورشیدی پلیمری می‌باشد [۱۸]، [۳۲].

درمیان فاکتورهای کلیدی برای سلول‌های خورشیدی پلیمری، آند نقش مهمی را در عملکرد این سلول‌ها ایفا می کند [۳۳]. بیشترین موادی که به عنوان آند استفاده می‌گردند اکسیدهای فلزی شامل آلومینیوم زینک اکساید[۱] (AZO)، فلوئور قلع اکساید[۲] (FTO) و ITO می‌باشند که درمیان این مواد، رایج ترین ماده مورد استفاده، ITO است [۳۴]. ITO معمولا با استفاده از روش‌های لایه نشانی بخار فیزیکی[۳] [۳۵]، رسوب شیمیایی بخار[۴] [۳۶]، اسپری پیرولیز[۵] [۳۷] و کندوپاش[۶] [۳۸] در دماهای بالای ۳۵۰-۲۰۰ °C لایه نشانی می‌گردد. فیلم‌های حاصل دارای درصد عبور نور بالای ۹۰٪ و مقاومت سطحی پایین تر از ۳۰ Ω/sq می‌باشند. این خواص به طور کامل ویژگی‌های مورد نیاز برای یک الکترود نوعی را برآورده می کند؛ اما در دماهای پایین تر از ۱۵۰ °C کاهش در شفافیت، هدایت الکتریکی و پایداری شیمیایی گزارش شده است. از آنجا که بیشتر زیرلایه‌های انعطاف پذیر فرایندهای دمای پایین را می توانند تحمل کنند، ITO معمولا مستقیما برروی شیشه لایه نشانی می‌شود [۳۹]. به علاوه ITO یک ماده سرامیکی شکننده و مستعد ترک خوردگی است، بنابراین برای استفاده در دستگاه‌های انعطاف پذیر محدودیت دارد. همچنین به دلیل کمبود قلع و افزایش قیمت آن، مصرف انرژی بالا در طی فرایند سنتز و لایه نشانی، مطالعاتی به دنبال جایگزین کردن این ماده با مواد دیگر در سراسر دنیا در حال انجام می‌باشد [۴۰]، [۴۱]. در این زمینه پیشرفت در تکنولوژی نانوساختارها کمک بسیاری به افزایش بازده تبدیل انرژی خورشید در سلول‌های خورشیدی پلیمری داشته است. از میان انواع نانوساختارهای فلزی، نانوسیم‌های نقره همانگونه که در بخش های قبل ارائه گردید می توانند به‌منظور آند در سلولهای خورشیدی پلیمری بکار گرفته شوند. بخش مهمی از بسیاری از دستگاههای الکترونیکی مانند سلول‌های خورشیدی، نمایشگرها، پنل‌های لمسی و هیترهای شفاف را الکترودهای رسانای شفاف تشکیل می‌دهند. فیلم‌های نازک الکترود شفاف از لحاظ نوری نسبت به نور مرئی شفاف هستند و همچنین از لحاظ الکتریکی رسانا می‌باشند.

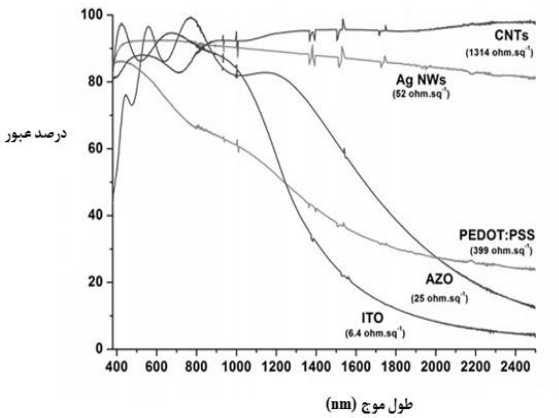
۶- ساخت الکترود رسانای شفاف برپایه‌ی نانوسیم‌های نقره

با توجه به خواص فیزیکی و روش ساخت آسان، نانوسیم‌های نقره با نسبت ابعاد بالا، یکی از بهترین گزینه‌های مواد جایگزین به عنوان الکترود رسانای شفاف می‌باشد [۴۲]. شبکه‌ی تصادفی نانوسیم‌های نقره با روش‌هایی ساده و ارزان مانند افتادن قطره[۷] [۴۳]، غوطه وری[۸] [۴۴]، رود مایر[۹] [۴۵] و لایه نشانی چرخشی[۱۰] [۴۶] ساخته می‌شوند. همه‌ی این تکنیک‌ها با فرایند لایه نشانی در دمای پایین و بدون هرگونه تجهیزات خلاء سازگار می‌باشد.

۶-۱- خواص نوری

وقتی نور به یک شیء برخورد می‌کند، نور فرودی می‌تواند عبور کند، جذب شود و یا منعکس گردد. نسبت نور عبور داده شده به نور تابشی به عنوان درصد عبور (شفافیت) یک شیء تعریف می‌شود. هنگام گزارش درصد عبور یک شیء، باید طول موج مورد نظر ذکر شود. شکل ۵ طیف عبوری در ناحیه‌ی مرئی تا مادون قرمز برای الکترودهای رسانای مختلف را نشان می‌دهد. فرکانس پلاسما ایندیم قلع اکساید و اکسید روی دوپ شده با آلومینیوم، در ناحیه IR نزدیک می‌افتد. به این علت، عبوردهی نور در این ناحیه به شدت کاهش می‌یابد.

نانولوله‌های کربنی و نانوسیم‌های نقره چنین ویژگی را نشان نخواهند داد و عبوردهی نور مشابه با ناحیه مرئی نشان می‌دهند. برای کاربردهایی که نیاز است که الکترودهای رسانا در محدوده‌ی IR طیف، شفاف باشند، فیلم‌های نانوساختار از نانوسیم‌های فلزی و نانولوله‌های کربنی یک انتخاب مناسب می‌باشند [۴۶]. در مورد فیلم‌های نانوسیم نقره، کاهش شفافیت عمدتاً به علت پراکندگی نور توسط نانوسیم‌های نقره می‌باشد. نسبت انتقال نور پراکنده شده به انتقال مستقیم نور به عنوان فاکتور مه[۱۱] (کدری) یک ماده، یک فاکتور بحرانی برای برخی از کاربردها می‌باشد [۴۷]. فاکتور مه با مقدار نور منتقل شده که پراکنده شده است؛ مرتبط می‌باشد. این فاکتور به شدت به شرایط آزمایشگاهی و روش‌های استفاده شده برای ساخت الکترود وابسته است. مقادیر بالای فاکتور مه برای افزایش جذب مسیر نور در لایه فعال سلول‌های خورشیدی مطلوب است و بازده فوتوولتاییک را افزایش می‌دهد [۴۸].



شکل ۵ طیف Vis-NIR انواع مختلف الکترودهای رسانای شفاف [۴۶]

۶-۲- خواص الکتریکی

هدایت الکتریکی یک ماده، انتقال الکترون درون لایه‌ی هدایت می‌باشد. پراکندگی الکترون ناشی از برهمکنش با فوتون‌ها، مرزدانه‌ها و ناخالصی‌ها به صورت بسیار زیادی تحرک الکترونی را کم خواهد کرد. در نتیجه، برای عملکرد مطلوب رساناهای الکتریکی، برخورد الکترون با این عوامل باید به حداقل برسد. مقدار رسانایی الکتریکی مورد نیاز براساس نوع کاربرد الکترودهای رسانای شفاف متفاوت می‌باشد. مقاومت یکی از پارامترهای اصلی مواد رسانا می‌باشد. مقاومت از فرمول ۱ محاسبه می‌شود:

$$R = \rho \frac{L}{Wt} \qquad (۱)$$

که در آن، L طول نمونه، W و t به ترتیب عرض و ضخامت نمونه می‌باشد. از آنجا که اندازه‌گیری ضخامت فیلم‌ها اغلب مشکل می‌باشد، مقاومت سطحی تعریف می‌شود که مقاومت در واحد سطح یک فیلم نازک می‌باشد که واحد آن Ω/sq است:

$$R_S = \frac{\rho}{t} \qquad (۲)$$

بنابراین مقاومت کل به صورت زیر بیان می‌شود:

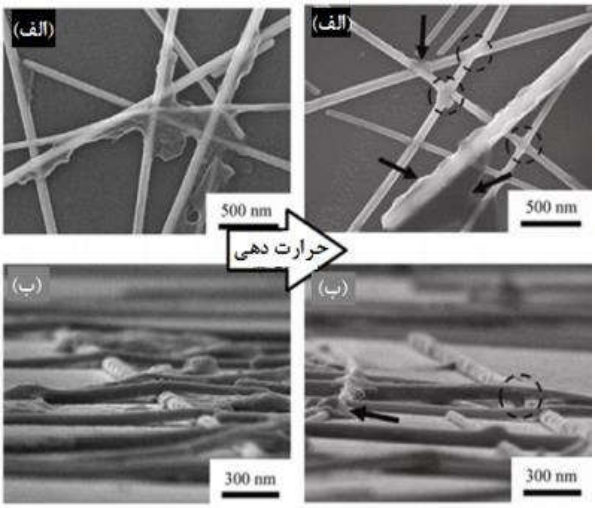
$$R = R_S \frac{L}{Wt} \qquad (۳)$$

[1] Aluminum Zinc Oxide
[2] Fluorine Tin Oxide
[3] Physical Vapor Deposition
[4] Chemical Vapor Deposition
[5] Spray Pyrolysis
[6] Sputtering

[7] Drop casting
[8] Dip coating
[9] Rod mayer
[10] Spin coating
[11] Haze factor

بدین ترتیب برای نمونه‌ای با طول و عرض یکسان مقاومت کل برابر با مقاومت سطحی می‌باشد [۲۱].

خواص الکتریکی شبکه‌ی الکترودهای نانوسیم نقره وابسته به ویژگی‌ها و مورفولوژی آنها می‌باشد. به طور کلی مقاومت الکترود با کاهش طول نانوسیم، افزایش خواهد یافت. مقاومت الکترودها با دانسیته‌ی نانوسیم‌ها و مقاومت اتصال نانوسیم‌های تک مشخص می‌گردد. قطر و طول نانوسیم‌ها نقش مهمی را در تراکم مورد نیاز برای انتقال الکترون و مسیرهای رسانا در الکترود ایفا می‌کنند. مطالعات نشان می‌دهد که افزایش دانسیته‌ی نانوسیم‌ها با افزایش در تعداد مسیرهای عبور الکترون منجر به کاهش مقاومت سطحی الکترود می‌شود. هرچند این عامل سبب کاهش عبور نور الکترود خواهد شد. نانوسیم‌های بلندتر با دانسیته‌ی کمتر می‌توانند باهم متصل شوند و انتقالات الکترونی را افزایش دهند. مقاومت ایجاد شده در محل اتصال نانوسیم‌ها (مقاومت اتصال) وابسته به رشد، خالص سازی و رشد نانوسیم‌ها می‌باشد [۴۹]. در برخی مطالعات، کاهش مقاومت اتصال با استفاده از روش آنیلینگ[1] حرارتی [۲۹]، اعمال نیروی خارجی برروی سطح [۵۰]، آنیلینگ الکتریکی [۵۱]، سینترینگ نوری[2] [۵۲] بررسی شده است که در نهایت سبب کاهش مقاومت سطحی الکترود می‌شود. در شکل ۶ تصاویر SEM از دو الکترود نانوسیم نقره قبل و بعد از فرایند حرارت دهی را نشان می‌دهد.



شکل ۶ تصاویر SEM دو الکترود نانوسیم نقره قبل و بعد از حرارت دهی (الف) بالای سطح نمونه (ب) سطح مقطع [۲۹]

۶-۳- بهینه کردن خواص الکتریکی- نوری

برای طراحی الکترود رسانای شفاف، هدایت الکتریکی و درصد عبور نور بالا مورد نیاز است. هدایت الکتریکی بالا معمولاً منجر به کاهش شفافیت می‌شود. برای دستیابی به شفافیت نوری بالا، ضخامت الکترودها باید کاهش یابد، از طرفی، زمانی که ضخامت کم شود، مسیرهای انتقال الکترون کاهش می‌یابد. بدین ترتیب خواص الکتریکی و نوری الکترودهای رسانای شفاف با توجه به کاربرد مورد نظر باید بهینه گردند. برای قضاوت و تعیین الکترودهای طراحی شده به عنوان الکترودهای رسانای شفاف، ارقام شایستگی[3] که در مقالات عنوان شده است، می توانند کمک کنند [۵۳]. رابطه ۴ به عنوان ارقام شایستگی یک الکترود، نسبت هدایت الکتریکی به هدایت نوری یک الکترود را بیان می کند.

$$\frac{\sigma_{DC}}{\sigma_{OP}} = \frac{188.5}{R_{sh}.(T^{-0.5}-1)} \qquad (۴)$$

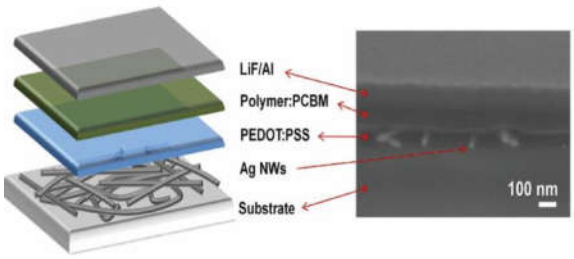
این نسبت وابسته به مقاومت سطحی و درصد عبور الکترود می‌باشد. هرچه نسبت هدایت الکتریکی به هدایت نوری بالاتر باشد، الکترود رسانای شفاف مطلوب‌تری بدست آمده است [۲۱].

۷- بررسی مقایسه‌ای بازده تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی در سلول‌های خورشیدی پلیمری معمول و سلول‌های خورشیدی ITO-Free

شبکه‌های تصادفی پراکنده‌ی نانوسیم‌های نقره به عنوان الکترود، رسانایی و شفافیت حتی بالاتری را نسبت به ITO نشان می‌دهند. لی[4] و همکارانش پیشگام در طراحی فرایندهای محلول (solution processing) نانوسیم‌های فلزی برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی آلی بوده‌اند [۵۴]. شبکه‌ی تصادفی از نانوسیم‌های نقره سبب افزایش پراکندگی نور و در نتیجه‌ی بهبود فوتوجریان در سلول خورشیدی می‌گردد. زبری و چسبندگی آن نیز ممکن است سبب بهبود در سطح مشترک لایه فعال الکترون دهنده و الکترون گیرنده شود. آنها از نانوسیم‌های نقره بر روی بسترهای منعطف در سلول های خورشیدی کوچک مولکول استفاده کردند و عملکرد مشابهی در مقایسه با همان سلول های خورشیدی بر پایه‌ی ITO مشاهده کردند. سپس یانگ[5] و همکارانش از الکترود نانوسیم‌های نقره در سلول های خورشیدی پلیمری نرمال استفاده کردند. به دلیل چالش هایی در پردازش، عملکرد پایین تری را نسبت به سلول خورشیدی برپایه‌ی ITO گزارش کردند [۵۵]. آن‌ها علت این پدیده را اختلاف تابع کار پایین بین نانوسیم‌های نقره با الکترود مخالف Al در مقایسه با اختلاف تابع کار ITO با Al گزارش کرده‌اند. این پدیده منجر به کاهش V_{oc} (ولتاژ مدار باز) در دستگاه‌های بر پایه‌ی نانوسیم‌های نقره در مقایسه با دستگاه‌های مرجع بر پایه‌ی ITO می‌گردد. این چنین مشکلاتی را می‌توان با تنظیم تابع کار الکترودها با استفاده از لایه‌های بافری حل نمود. برای مثال گاینور[6] و همکارانش از سزیم کربنات (Cs_2CO_3) استفاده کردند برای آنکه تابع کار الکترود نقره را به عنوان الکترود پشتی تغییر دهند و در نهایت اختلاف تابع کار الکترود نانوسیم نقره و الکترود نقره به طور مناسبی حفظ گردد. آنها عملکرد مشابهی در مقایسه با سلول‌های خورشیدی معکوس برپایه‌ی ITO با بازده ۲/۵٪ گزارش کردند [۵۶]. به طور مشابه لیم[7] و همکارانش از TiO_2 به عنوان لایه‌ی بافری در سلول-های خورشید معکوس استفاده کردند و بازده ۳/۴۵٪ نزدیک به سلول‌های خورشیدی مشابه با ITO مشاهده کردند [۵۷]. در تحقیقات جدید از لایه‌ی بافری ZnO بر روی نانوسیم‌های نقره در سلول‌های خورشیدی معکوس استفاده شد. آجوریا[8] و همکارانش بازده ۳/۸۵ ٪ برای این سلول‌های خورشیدی در مقابل با سلول‌های خورشیدی برپایه‌ی ITO با بازده ۳/۵۳٪ گزارش کردند [۵۸]. در سال‌های اخیر تحقیقات بر روی افزایش بازده سلول‌های خورشیدی نرمال بر پایه‌ی نانوسیم‌های نقره گسترش یافته است. گروهی از محققین سلول‌های خورشیدی با استفاده از آند نانوسیم‌های نقره با بازده ۳/۱۰ ٪ در

[1] Annealing
[2] Optical sintering
[3] Figure of merit
[4] Lee
[5] Yang
[6] Gaynor
[7] Leem
[8] Ajuria

مقایسه با سلول خورشیدی مرجع بر پایه‌ی ITO با بازده ۳/۲۶ ٪ تولید کرده اند. شکل ۸ لایه‌های تشکیل دهنده‌ی این سلول خورشیدی به همراه تصویر SEM گرفته شده از این سلول خورشیدی را نشان می‌دهد [۵۹].



شکل ۸ لایه‌های تشکیل دهنده‌ی سلول خورشیدی پلیمری برپایه‌ی نانوسیم نقره و تصویر SEM از مقطع عرضی [۵۹]

نتیجه‌گیری

در تمدن‌های باستان، از نانوذرات کلوئیدی با هدف زیبایی بخشیدن به وسایل، تولید و از آنها استفاده می‌شده است. در میان انواع فلزات، نقره به عنوان یک فلز واسطه‌ی براق، هدایت الکتریکی و حرارتی بالایی دارد. در مقیاس نانو، خواص نقره تغییر کرده و قابل دستکاری می‌باشد. درمیان نانوساختارهای فلزی، نانوسیم‌های نقره، به علت داشتن هدایت الکتریکی و حرارتی بالای نقره، بیشترین سهم مطالعات را به خود اختصاص داده‌اند. نسبت سطح به حجم بالا در این نانوساختارها، سبب ایجاد خواص شیمیایی، الکتریکی، نوری، مغناطیسی و مکانیکی منحصر به فرد نسبت به نقره‌ی توده‌ای شده است. با توجه به خواص الکتریکی و نوری ویژه و همچنین روش‌های ساخت آسان و ارزان، نانوسیم‌های نقره یکی از بهترین گزینه‌های مواد جایگزین به عنوان الکترود رسانای شفاف می‌باشد. الکترودهای رسانای شفاف برپایه‌ی نانوسیم‌های نقره دارای کاربردهای وسیعی از جمله در هیترهای شفاف، نمایشگرها، پنل‌های لمسی و سلول‌های خورشیدی می‌باشند. فیلم‌های نانوساختار از نانوسیم‌های نقره برای کاربردهایی که شفافیت در محدوده‌ی IR نیاز است، مناسب می‌باشند. خواص الکتریکی شبکه‌ی الکترودهای نانوسیم نقره وابسته به ویژگی‌ها و مورفولوژی آنها می‌باشد. با طور کلی مقاومت الکترود با کاهش طول نانوسیم افزایش خواهد یافت. قطر و طول نانوسیم‌ها نقش مهمی را در تراکم مورد نیاز برای انتقالات الکترونی و مسیرهای رسانا در الکترود ایفا می‌کنند. افزایش دانسیته‌ی نانوسیم‌ها با افزایش در تعداد مسیرهای عبور الکترون، منجر به کاهش مقاومت سطحی الکترود می‌شود. نانوسیم‌های بلندتر با دانسیته‌ی کمتر می تواند به هم متصل شوند و انتقالات الکترونی را افزایش دهند. برای طراحی الکترود رسانای شفاف، هدایت الکتریکی و درصد عبور نور بالا مورد نیاز است. هدایت الکتریکی بالا معمولاً منجر به کاهش شفافیت می‌شود. برای دستیابی به شفافیت نوری بالا، ضخامت الکترود باید کاهش یابد. از طرفی زمانی که ضخامت کم شود مسیرهای انتقال الکترون کاهش می‌یابد. خواص نوری و الکتریکی الکترودهای رسانای شفاف با توجه به کاربرد مورد نظر باید بهینه گردد. برای قضاوت در تعیین الکترودهای طراحی شده به عنوان الکترود رسانای شفاف، ارقام شایستگی استفاده می‌شود. ارقام شایستگی یک الکترود نسبت هدایت الکتریکی به هدایت نوری یک الکترود را بیان می‌کند. هرچه ارقام شایستگی یک الکترود بالاتر باشد؛ الکترود رسانای شفاف مطلوبتری بدست آمده است.

مراجع

[1] D. K. Panda, “Nanostructured organic solar cells,” 2011.

[2] B. C. Thompson and J. M. J. Frechet, “Polymer–fullerene composite solar cells,” *Angew. chemie Int. Ed.*, vol. 47, no. 1, pp. 58–77, 2008.

[3] N. Johnstone, I. Haščič, and D. Popp, “Renewable energy policies and technological innovation: evidence based on patent counts,” *Environ. Resour. Econ.*, vol. 45, no. 1, pp. 133–155, 2010.

[4] T. K. Manna and S. M. Mahajan, “Nanotechnology in the development of photovoltaic cells,” in *Clean Electrical Power, 2007. ICCEP’07. International Conference on*, 2007, pp. 379–386.

[5] S. M. Hanasoge, T. L. Duvall, and K. R. Sreenivasan, “Anomalously weak solar convection,” *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 109, no. 30, pp. 11928–11932, 2012.

[6] “http://pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/the-sun.” .

[7] E. W. Brown, “An Introduction to Solar Energy.” pp. 1–6, 1988.

[8] I. Dincer, “Renewable energy and sustainable development: a crucial review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 4, no. 2, pp. 157–175, 2000.

[9] A. F. Zobaa and R. C. Bansal, *Handbook of renewable energy technology*. World Scientific, 2011.

[10] I. Bostan, A. V Gheorghe, V. Dulgheru, I. Sobor, V. Bostan, and A. Sochirean, *Resilient Energy Systems: Renewables: Wind, Solar, Hydro*, vol. 19. Springer Science & Business Media, 2012.

[11] M. S. Guney, “Solar power and application methods,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 776–785, 2016.

[12] Wna, “Renewable Energy and Electricity | Sustainable Energy | Renewable Energy.” 2013.

[13] G.-C. PICIU and C.-L. TRICĂ, “A POSSIBLE CLASSIFICATION OF RENEWABLE RESOURCES IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT.”

[14] M. A. Green, “Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond,” *Phys. E Low-dimensional Syst. Nanostructures*, vol. 14, no. 1, pp. 65–70, 2002.

[15] “http://www.differencebetween.com/difference-between-photoelectric-effect-and-vs-photovoltaic-effect” .

[16] V. V Tyagi, N. A. A. Rahim, N. A. Rahim, A. Jeyraj, and L. Selvaraj, “Progress in solar PV technology: Research and achievement,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 20, pp. 443–461, 2013.

[17] A. M. Bagher, M. M. A. Vahid, and M. Mohsen, “Types of Solar Cells and Application,” *Sci. Publ. Gr.*, vol. 3, no. 5, p. 94, 2015.

[18] J. Y. Kim, K. Lee, N. E. Coates, D. Moses, T.-Q. Nguyen, M. Dante, and A. J. Heeger, “Efficient tandem polymer solar cells fabricated by all-solution processing,” *Science (80-.).*, vol. 317, no. 5835, pp. 222–225, 2007.

[19] F. C. Krebs, “Fabrication and processing of polymer solar cells: a review of printing and coating techniques,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 93, no. 4, pp. 394–412, 2009.

[20] N. Espinosa, M. Hösel, D. Angmo, and F. C. Krebs, “Solar cells with one-day energy payback for the factories of the future,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 5, p. 5117, 2012.

[21] H. H. Khaligh, “Silver Nanowire Transparent Electrodes: Fabrication, Characterization, and Device Integration,” *Univ. Waterloo*, 2013.

[22] D. S. Hecht, L. Hu, and G. Irvin, “Emerging transparent electrodes based on thin films of carbon nanotubes, graphene, and metallic nanostructures,” *Adv. Mater.*, vol. 23, no. 13, pp. 1482–1513, 2011.

[23] M. S. Fuhrer, J. Nygård, L. Shih, M. Forero, Y.-G. Yoon, H. J. Choi, J. Ihm, S. G. Louie, A. Zettl, and P. L. McEuen, “Crossed nanotube junctions,” *Science (80-.).*, vol. 288, no. 5465, pp. 494–497, 2000.

[24] B. Dan, G. C. Irvin, and M. Pasquali, “Continuous and scalable fabrication of transparent conducting carbon nanotube films,” *ACS Nano*, vol. 3, no. 4, pp. 835–843, 2009.

[25] A. N. Obraztsov, “Chemical vapour deposition: making graphene on a large scale,” *Nat. Nanotechnol.*, vol. 4, no. 4, pp. 212–213, 2009.

nanowire networks embedded in indium tin oxide nanoparticle matrices," *Nano Res.*, vol. 5, no. 11, pp. 805–814, 2012.

[47] C. Preston, Y. Xu, X. Han, J. N. Munday, and L. Hu, "Optical haze of transparent and conductive silver nanowire films," *Nano Res.*, vol. 6, no. 7, pp. 461–468, 2013.

[48] T. Chih-Hung, H. Sui-Ying, H. Tsung-Wei, T. Yu-Tang, C. Yan-Fang, Y. H. Jhang, L. Hsieh, W. Chung-Chih, C. Yen-Shan, and C. Chieh-Wei, "Influences of textures in fluorine-doped tin oxide on characteristics of dye-sensitized solar cells," *Org. Electron.*, vol. 12, no. 12, pp. 2003–2011, 2011.

[49] S. Sorel, P. E. Lyons, S. De, J. C. Dickerson, and J. N. Coleman, "The dependence of the optoelectrical properties of silver nanowire networks on nanowire length and diameter," *Nanotechnology*, vol. 23, no. 18, p. 185201, 2012.

[50] X. Zeng, Q. Zhang, R. Yu, and C. Lu, "A new transparent conductor: silver nanowire film buried at the surface of a transparent polymer," *Adv. Mater.*, vol. 22, no. 40, pp. 4484–4488, 2010.

[51] C. Celle, C. Mayousse, E. Moreau, H. Basti, A. Carella, and J.-P. Simonato, "Highly flexible transparent film heaters based on random networks of silver nanowires," *Nano Res.*, vol. 5, no. 6, pp. 427–433, 2012.

[52] E. C. Garnett, W. Cai, J. J. Cha, F. Mahmood, S. T. Connor, M. G. Christoforo, Y. Cui, M. D. McGehee, and M. L. Brongersma, "Self-limited plasmonic welding of silver nanowire junctions," *Nat. Mater.*, vol. 11, no. 3, pp. 241–249, 2012.

[53] G. Haacke, "New figure of merit for transparent conductors," *J. Appl. Phys.*, vol. 47, no. 9, pp. 4086–4089, 1976.

[54] J.-Y. Lee, S. T. Connor, Y. Cui, and P. Peumans, "Solution-processed metal nanowire mesh transparent electrodes," *Nano Lett.*, vol. 8, no. 2, pp. 689–692, 2008.

[55] L. Yang, T. Zhang, H. Zhou, S. C. Price, B. J. Wiley, and W. You, "Solution-processed flexible polymer solar cells with silver nanowire electrodes," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 3, no. 10, pp. 4075–4084, 2011.

[56] W. Gaynor, G. F. Burkhard, M. D. McGehee, and P. Peumans, "Smooth nanowire/polymer composite transparent electrodes," *Adv. Mater.*, vol. 23, no. 26, pp. 2905–2910, 2011.

[57] D. Leem, A. Edwards, M. Faist, J. Nelson, D. D. C. Bradley, and J. C. de Mello, "Efficient organic solar cells with solution-processed silver nanowire electrodes," *Adv. Mater.*, vol. 23, no. 38, pp. 4371–4375, 2011.

[58] J. Ajuria, I. Ugarte, W. Cambarau, I. Etxebarria, R. Tena-Zaera, and R. Pacios, "Insights on the working principles of flexible and efficient ITO-free organic solar cells based on solution processed Ag nanowire electrodes," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 102, pp. 148–152, 2012.

[59] M. Song, D. S. You, K. Lim, S. Park, S. Jung, C. S. Kim, D. H. Kim, D. G. Kim, J. K. Kim, J. Park, Y. C. Kang, J. Heo, S. H. Jin, J. H. Park, and J. W. Kang, "Highly efficient and bendable organic solar cells with solution-processed silver nanowire electrodes," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 23, no. 34, pp. 4177–4184, 2013.

[26] X. Wang, L. Zhi, and K. Müllen, "Transparent, conductive graphene electrodes for dye-sensitized solar cells," *Nano Lett.*, vol. 8, no. 1, pp. 323–327, 2008.

[27] W. Hong, Y. Xu, G. Lu, C. Li, and G. Shi, "Transparent graphene/PEDOT–PSS composite films as counter electrodes of dye-sensitized solar cells," *Electrochem. commun.*, vol. 10, no. 10, pp. 1555–1558, 2008.

[28] J. Zou, H.-L. Yip, S. K. Hau, and A. K.-Y. Jen, "Metal grid/conducting polymer hybrid transparent electrode for inverted polymer solar cells," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, no. 20, p. 203301, 2010.

[29] T. Tokuno, M. Nogi, M. Karakawa, J. Jiu, T. T. Nge, Y. Aso, and K. Suganuma, "Fabrication of silver nanowire transparent electrodes at room temperature," *Nano Res.*, vol. 4, no. 12, pp. 1215–1222, 2011.

[30] J. van de Groep, P. Spinelli, and A. Polman, "Transparent conducting silver nanowire networks," *Nano Lett.*, vol. 12, no. 6, pp. 3138–3144, 2012.

[31] L. Hu, H. S. Kim, J.-Y. Lee, P. Peumans, and Y. Cui, "Scalable coating and properties of transparent, flexible, silver nanowire electrodes," *ACS Nano*, vol. 4, no. 5, pp. 2955–2963, 2010.

[32] C. Li, Y. Chen, Y. Wang, Z. Iqbal, M. Chhowalla, and S. Mitra, "A fullerene–single wall carbon nanotube complex for polymer bulk heterojunction photovoltaic cells," *J. Mater. Chem.*, vol. 17, no. 23, pp. 2406–2411, 2007.

[33] Y.-Y. Choi, S. J. Kang, H.-K. Kim, W. M. Choi, and S.-I. Na, "Multilayer graphene films as transparent electrodes for organic photovoltaic devices," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 96, pp. 281–285, 2012.

[34] D. Ginley, H. Hosono, and D. C. Paine, *Handbook of transparent conductors*. Springer Science & Business Media, 2010.

[35] Z. Chen, K. Yang, and J. Wang, "Preparation of indium tin oxide films by vacuum evaporation," *Thin Solid Films*, vol. 162, pp. 305–313, 1988.

[36] Y.-S. Kim, Y.-C. Park, S. G. Ansari, B.-S. Lee, and H.-S. Shin, "Effect of substrate temperature on the bonded states of indium tin oxide thin films deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition," *Thin Solid Films*, vol. 426, no. 1, pp. 124–131, 2003.

[37] Y. Gao, G. Zhao, Z. Duan, and Y. Ren, "Preparation of ITO films using a spray pyrolysis solution containing an acetylacetone chelating agent," *Mater. Sci.*, vol. 32, no. 1, pp. 66–70, 2014.

[38] Y. Han, D. Kim, J.-S. Cho, S.-K. Koh, and Y. S. Song, "Tin-doped indium oxide (ITO) film deposition by ion beam sputtering," *Sol. energy Mater. Sol. cells*, vol. 65, no. 1, pp. 211–218, 2001.

[39] A. R. Madaria, A. Kumar, F. N. Ishikawa, and C. Zhou, "Uniform, highly conductive, and patterned transparent films of a percolating silver nanowire network on rigid and flexible substrates using a dry transfer technique," *Nano Res.*, vol. 3, no. 8, pp. 564–573, 2010.

[40] M. Manceau, D. Angmo, M. Jørgensen, and F. C. Krebs, "ITO-free flexible polymer solar cells: from small model devices to roll-to-roll processed large modules," *Org. Electron.*, vol. 12, no. 4, pp. 566–574, 2011.

[41] D. Angmo and F. C. Krebs, "Flexible ITO-free polymer solar cells," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 129, no. 1, pp. 1–14, 2013.

[42] P. B. Catrysse and S. Fan, "Nanopatterned metallic films for use as transparent conductive electrodes in optoelectronic devices," *Nano Lett.*, vol. 10, no. 8, pp. 2944–2949, 2010.

[43] B. E. Hardin, W. Gaynor, I.-K. Ding, S.-B. Rim, P. Peumans, and M. D. McGehee, "Laminating solution-processed silver nanowire mesh electrodes onto solid-state dye-sensitized solar cells," *Org. Electron.*, vol. 12, no. 6, pp. 875–879, 2011.

[44] C. Sachse, L. Müller-Meskamp, L. Bormann, Y. H. Kim, F. Lehnert, A. Philipp, B. Beyer, and K. Leo, "Transparent, dip-coated silver nanowire electrodes for small molecule organic solar cells," *Org. Electron.*, vol. 14, no. 1, pp. 143–148, 2013.

[45] C.-H. Liu and X. Yu, "Silver nanowire-based transparent, flexible, and conductive thin film," *Nanoscale Res. Lett*, vol. 6, no. 1, p. 75, 2011.

[46] C.-H. Chung, T.-B. Song, B. Bob, R. Zhu, and Y. Yang, "Solution-processed flexible transparent conductors composed of silver