

بهبود چگالی جریان و افزایش کارایی سلول خورشیدی پلیمری P³HT:PCBM با استفاده از نانومیله اکسید روی

لیدا احمدخانی^۱ و ربابه عباسی^۲

۱. باشگاه پژوهشگران جوان، واحد ملکان، دانشگاه آزاد اسلامی، ملکان

۲. گروه فیزیک کاربردی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد، مهاباد

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۵/۳۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۳/۲۵)

چکیده

سلول‌های خورشیدی هیبریدی مواد آلی / معدنی با هدف تولید سلول‌های خورشیدی آلی (OPV) کم هزینه و همچنین به دست آوردن مزایای دیگر، از جمله تنظیم طیف جذبی، با استفاده از اجزای معدنی، بیشتر مورد توجه می‌باشند. زیرا، سلول‌های خورشیدی هیبریدی، پتانسیل لازم برای دستیابی به بازده تبدیل توان بالا (PCE) را دارند، اما بازده به دست آمده در حال حاضر کم می‌باشد. برای افزایش تبدیل توان از مواد معدنی به عنوان پذیرنده الکترون در سلول‌های خورشیدی هیبریدی استفاده می‌شود، مخصوصاً ساختار الکترونیک، در عملکرد دستگاه بسیار مهم می‌باشد. بنابراین در این مقاله، نانومیله اکسید روی با استفاده از استات روی دی هیدراته و پلی‌وینیل پیرولیدون (PVP) به عنوان ماده پیش‌ساز و پایدارکننده، سنتز شد. پودر حاصله در معرض هوا، در ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت کلسینه شد و با استفاده از طیف‌های پراش پرتوی ایکس، TEM و SEM مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، بعد از سنتز نانومیله اکسید روی و استفاده آن به عنوان بافر در سلول‌های خورشیدی پلیمری معکوس، باعث شد عملکرد دستگاه بهبود یابد؛ متوسط کارایی دستگاه، از جمله ولتاژ مدار باز، چگالی جریان اتصال کوتاه، عامل پرشدگی، و بازده تبدیل توان‌های اندازه‌گیری شده برای این سلول به ترتیب برابر با ۰/۶۰ ولت، ۸/۷۰ میلی آمپر برسانتی‌مترمربع، ۰/۵۸ و ۳/۰۱٪ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که ساختار نانومیله اکسید روی به طور مؤثری به عنوان انتقال دهنده الکترون برای سلول‌های خورشیدی پلیمری معکوس، به کار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: اکسید روی، نانومیله، سل - ژل، سلول خورشیدی پلیمری، فتوولتائیک آلی/معدنی

۱. مقدمه

در طول دهه‌های گذشته راه کارهای زیادی برای غلبه بر موانع فن‌آوری و مواد، به منظور توسعه سلول‌های خورشیدی آلی، با بهره‌وری خوب و هزینه قابل قبول در مقایسه با سلول‌های فتوولتائیک معدنی ارائه شده است. اصولاً سلول‌های خورشیدی

پلیمری با ساختار لایه فعال پلی (۳- هگزیل تیوفن): [۶،۶]- فنیل C₆₁- بوتیریک اسید متیل استر (P³HT:PCBM) که پلیمر P³HT به عنوان ماده الکترون دهنده و ریز مولکول PCBM به عنوان ماده پذیرنده الکترون، ساخته می‌شوند. اثر فتوولتائیک شامل تولید زوج الکترون- حفره مقید (اکسایتون)، تجزیه آنها

همچون شفافیت خوب در تمام محدوده نور مرئی، تحرک الکترونی نسبتاً بالا و هزینه کم می‌باشد [۱۲-۱۵]. علاوه بر این، لایه نازک اکسید روی به آسانی با استفاده از روش‌های زیادی در دمای نسبتاً پایین فرایندپذیر بوده، و کاملاً با بسترهای انعطاف‌پذیر سازگار است [۶، ۱۶-۱۹]. بنابراین اکسید روی تنها ماده، به عنوان لایه بافری کاتد که به طور وسیعی در سلول‌های خورشیدی پلیمری معکوس، که با استفاده از روش رول به رول ساخته شده، استفاده می‌شود [۲۰-۲۲]. اخیراً مطالعات زیادی بر روی سلول‌های خورشیدی پلیمری معکوس با نانوساختار اکسید روی صورت گرفته است [۲۳-۳۱]. با این وجود سلول‌های خورشیدی ساخته شده با نانومواد اکسید روی و ترکیب پلیمری P³HT:PCBM، بازدهی در حدود ۲٪ و در چند مورد ویژه به حدود ۴-۳٪ رسیده است [۲۷-۳۱].

در این کار پژوهشی ما ابتدا سنتز نانومیله‌های اکسید روی را با استفاده از طیف‌های FT-IR و پراش پرتوی ایکس و تصاویر الکترونی SEM و TEM و طیف فرابنفش-مرئی بررسی کرده و سپس سلول خورشیدی پلیمری با ساختار لایه فعال P³HT:PCBM/ZnO، به عنوان اولین گام به سمت تولید سلول‌های خورشیدی ترکیبی را مورد بررسی قرار می‌دهیم، در این حالت هیبرید P³HT/ZnO به عنوان یک دستگاه دهنده/پذیرنده عمل می‌کند، که ویژگی‌های این دستگاه را با استفاده از طیف فرابنفش-مرئی و منحنی چگالی جریان-ولتاژ (J-V) بررسی می‌کنیم.

۲. بخش تجربی

۲.۱. مواد

برای ساخت سلول خورشیدی هیبریدی پلیمر/نانومیله اکسید روی از پلیمرهای P³HT و PEDOT:PSS و ریز مولکول PCBM خریداری شده از شرکت سیگما آلدریچ و زیرلایه پوشیده شده با ITO از مرکز صنایع اپتیک اصفهان با مقاومت سطحی ۷۰ اهم بر سانتی‌متر مربع استفاده شد. همچنین برای سنتز نانومیله اکسید روی از مواد استات روی و پلی‌وینیل پیرولیدون استفاده شد.

به حامل‌های بار آزاد و جمع شدن هریک از حامل‌های بار در الکترودهای مربوط به آن است. در مواد معدنی، اکسایتون‌های تولید شده در اثر فوتون‌ها، بلافاصله به الکترون و حفره آزاد تبدیل می‌شوند در حالی که در مواد آلی، جذب فوتون سبب تولید زوج‌های الکترون-حفره با طول عمر متوسط بیشتر می‌شود. با تلفیق نانومواد به مواد پلیمری، می‌توان بازدهی را افزایش داد. نانومواد با ایجاد مسیرهای نفوذی به انتقال سریع‌تر الکترون کمک می‌کنند و به عنوان پلی بین مولکول‌های PCBM عمل می‌کنند.

از این رو سلول‌های خورشیدی هیبریدی پلیمر/نانومواد، سلول‌های خورشیدی هستند که دارای یک لایه گیرنده نوری متشکل از نانوذرات نیمه‌رسانای معدنی و پلیمرهای مزدوج رسانا می‌باشند [۱-۳]. سلول‌های خورشیدی هیبریدی پلیمر/نانوذرات دارای پتانسیل بسیار بالایی به منظور تأمین برق کم هزینه می‌باشند. در بین نانوذرات، اکسید روی با گاف انرژی گسترده‌ای در حدود ۳/۴ الکترون‌ولت در دمای اتاق، یکی از مهمترین نیمه‌رساناهای نوع n می‌باشد. ذرات اکسید روی خواصی مانند نیمه‌رسانایی، پیزوالکتریسیته و پیروالکتریسیته را از خود نشان می‌دهند [۴]. این خواص بی‌نظیر باعث می‌شود که ذرات اکسید روی یکی از غنی‌ترین مواد نانوساختاری باشند. بکارگیری نانوذرات اکسید روی در تولید مواد دیگر، می‌تواند استحکام آنها را افزایش داده و یا وزن آنها را کم کند، [۵] بنابراین نانوذرات اکسید روی در حوزه‌هایی مانند سلول‌های خورشیدی، دیودهای نوری آلی و حسگرهای گازی کاربرد دارند. همچنین، سلول‌های خورشیدی پلیمری ساخته شده با نانوساختارهای اکسید فلزی نوع n به عنوان الکتروود توجه ویژه‌ای را بخود جلب کرده است زیرا این ابزارها، پایداری و سازگاری بهتری را نشان داده‌اند [۶-۱۰]. اکسید روی به همراه پلیمرهای آلی به عنوان یک جایگزین مناسب برای الکتروود شفاف ITO (این‌دیم قلع اکسید) می‌باشد. این‌دیم قلع اکسید (ITO) یک اکسید رسانای شفاف است که معمولاً به عنوان یک الکتروود متعارف در لایه نازک و فتوولتائیک آلی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱]. نانومیله اکسید روی دارای خواصی

۲.۲. دستگاه‌های استفاده شده

طیف FT-IR به صورت قرص با پودر KBr توسط دستگاه Shimadzu ۸۶۰۰ ساخت کشور ژاپن ثبت شد. تصاویر میکروسکوپی الکترونی عبوری (TEM) با دستگاه مدل Philips CM۱۰ TEM ساخت کشور آلمان ثبت شده‌اند. تصاویر میکروسکوپی الکترونی پوششی (SEM) با دستگاه ESEM S۴۱۶۰-Hitachi ساخت کشور آلمان ثبت شده‌اند. طیف‌های فرابنفش - مرئی با دستگاه Shimadzu UV۱۶۰۱ PC ساخت کشور ژاپن گرفته شدند. طیف پراش پرتوی ایکس با استفاده از دستگاه Bruker SMIEENS D ۵۰۰ ساخت کشور آلمان با $\lambda = 1.54$ و $\theta = 2-70$ Source: Cu-K α طول موج گرفته شدند.

منحنی‌های جریان- ولتاژ (J-V) در دستگاه شبیه‌ساز نور خورشیدی با لامپ زنون تحت AM ۱/۵ طیف خورشیدی با چگالی توان (100 mW/cm^2) اندازه‌گیری شد. این منحنی‌ها با دستگاه Luzchem Photoreactor مدل LZCSSR گرفته شدند. همچنین شدت نور با استفاده از سلول‌های خورشیدی سیلیکونی کالیبره شد.

۳.۲. سنتز نانومیله اکسید روی

برای سنتز نانومیله اکسید روی، ابتدا ۲/۱۹ گرم استات روی دی هیدراته $(\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ در ۵۰ میلی لیتر آب مقطر (غلظت محلول حاصله ۰/۲M) حل شد. تا زمان به دست آمدن یک محلول همگن محلول هم زده می‌شود. سپس محلول 3×10^{-4} مولار از پلی‌وینیل پیرولیدون به منظور سنتز نانومیله اکسید روی به محلول همگن استات روی قطره قطره اضافه شد. در نهایت، ۱/۶ گرم سود که در ۵۰ میلی لیتر آب مقطر (با غلظت ۰/۸M) حل شده بود به آرامی به محلول پیش ساز روی اصلاح شده با پلی‌وینیل پیرولیدون اضافه شد. رسوب سفید به دست آمده قبل از صاف کردن، با آب مقطر شستشو داده شد، و بعد از آن در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت در هوا کلسینه شده‌اند.

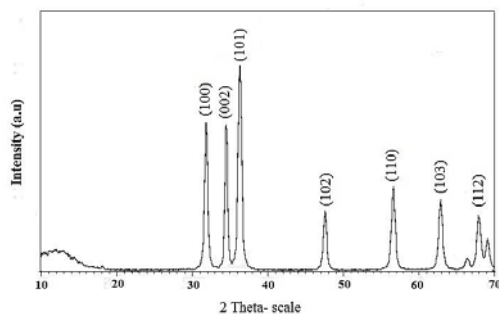
۴.۲. ساخت دستگاه سلول خورشیدی

ابتدا، نانومیله اکسید روی سنتز شده به محلول دی کلرومتان و پلی فنیل C₆₁- بوتیریک اسید متیل استر PCBM، با غلظت ۲۰mg/ml به روش پوشش دهی چرخشی با سرعت ۱۰۰۰ دور، به مدت ۳۰ ثانیه افزوده شد. بعد از آن نمونه‌ها در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ دقیقه قرار داده شد تا همه حلال موجود خشک گردد و در نتیجه هیبرید PCBM/ZnO تهیه شود. در مرحله بعد، محلول ارتودی کلروبنزن شامل مخلوط P3HT:PCBM حاوی ۲۰mg/ml پلی-۳- هگزیل تیوفن و ۱۶mg/ml پلیمر PCBM، با استفاده از پوشش دهی چرخشی بر روی لایه PCBM با سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۳۰ ثانیه پوشش داده شد. سپس نمونه‌ها به مدت یک دقیقه به منظور خودآرایی پلیمر P3HT، و تبخیر حلال باقیمانده و کمک به نفوذ نانومیله اکسید روی، در دمای ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. در مرحله سوم محلول رقیق PEDOT:PSS، با استفاده از روش پوشش دهی چرخشی بر روی لایه P3HT:PCBM به عنوان لایه انتقال حفره پوشش داده شد. بعد از آن دستگاه به مدت ۱۰ دقیقه در محیط نیتروژن حرارت داده شد. در نهایت یک لایه نازک ۱۰۰ نانومتری از فلز نقره بر بالای دستگاه تحت خلأ (5×10^{-6} تور) بازنشانی شد.

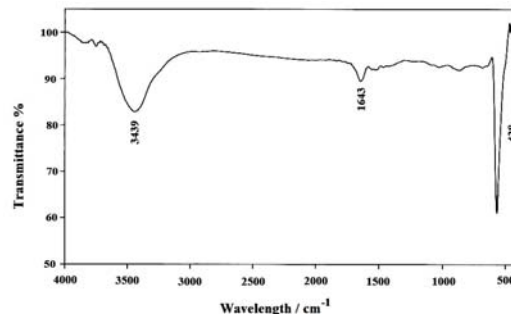
۳. نتایج و بحث

طیف FT-IR نانومیله اکسید روی در شکل ۱ نشان داده شده است همان طور که مشاهده می‌شود قله پهنی در ناحیه 3439 cm^{-1} مربوط به گروه‌های هیدروکسیل (OH) موجود بر روی نانومیله می‌باشد. بعد از کلسینه کردن نانومیله، یک قله جذبی در ناحیه 428 cm^{-1} دیده می‌شود که به ارتعاشات کششی ZnO نسبت داده می‌شود. ارتعاشات کششی متقارن و نامتقارن استات روی در ناحیه 1643 cm^{-1} به صورت قله ضعیفی نیز دیده می‌شود.

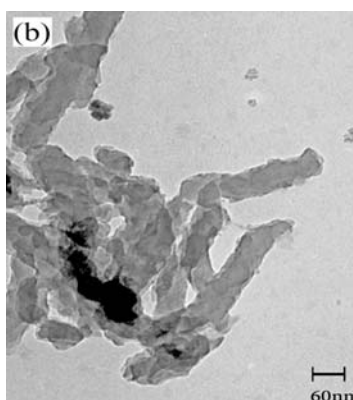
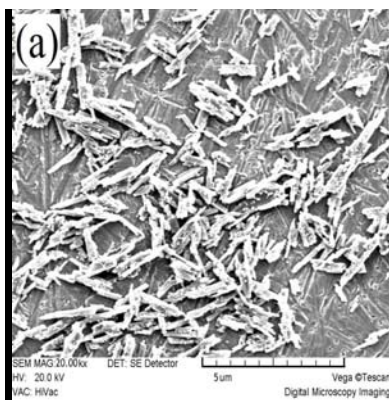
شکل ۲ طیف پراش پرتوی ایکس نانومیله اکسید روی را نشان می‌دهد. با توجه به قله با شدت بالا $2\theta = 37^\circ$ و مطابق معادله دبای شرر، اندازه بلورهای نانواکسید روی در محدوده



شکل ۲. الگوی پراش پرتوی ایکس برای نانوذره اکسید روی.



شکل ۱. طیف‌های FT-IR مربوط به نانومیله اکسید روی.



شکل ۳. تصویر SEM، (الف) و تصویر TEM، (ب) مربوط به نانومیله اکسید روی.

مورفولوژی و اندازه ذرات نمونه اکسید روی سنتز شده با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی TEM و SEM مورد بررسی قرار گرفت. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ذرات به صورت میله مانند هستند که رشد نانوساختارها را در امتداد یک جهت خاص نشان می‌دهد. همچنین، اندازه ذرات در محدوده نانومتری بوده و شکل ذرات به صورت میله‌ای است که دلیل این رشد نانوذرات، دما و زمان کلسینه شدن نانوذرات اکسیدروی می‌باشد. طبق معادله دمای شرر با استفاده از طیف پراش پرتوی ایکس اندازه نانوذرات به طور متوسط به صورت کروی فرض شده و میانگین اندازه ذرات ۴۰-۵۰ نانومتر تخمین زده شد در تصویر TEM اندازه ذرات به صورت میله‌ای بوده که بلندی آنها در حدود ۱۰۰ نانومتر و عرض نانومیله اکسید روی ۴۰ نانومتر است.

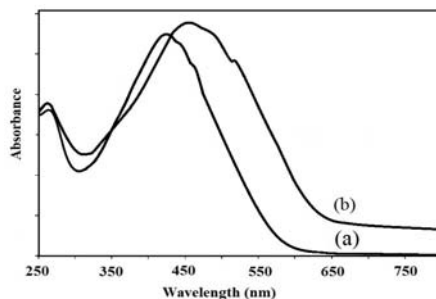
همچنین خواص نوری نانومیله اکسید روی با استفاده از طیف سنجی فرابنفش- مرئی مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۴

۴۰-۵۰ نانومتری به دست می‌آید، که تقریباً با تصاویر نشان داده شده از TEM مطابقت دارد.

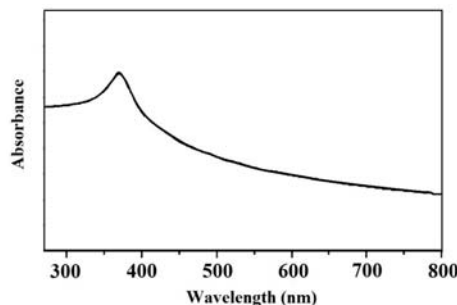
$$D = \frac{\lambda}{\beta \cos \theta}$$

در این معادله D قطر ذرات بر حسب نانومتر، λ طول موج پرتوی ایکس بر حسب آنگستروم، و θ زاویه پراکندگی و β پهنای طیف در نصف ارتفاع قله بیشینه (FWHM) بر حسب رادیان است.

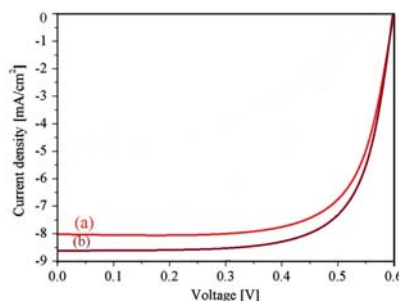
همان طور که از طیف پراش پرتوی ایکس مشخص است قله‌های با شدت بیشتر، نشان از بلورینگی بالای نانومیله اکسید روی است. علاوه بر این، شدت قله (۰۰۲) اوج پراش میله‌های اکسید روی است که نشان می‌دهد که میله دارای جهت گیری ترجیحی در جهت محور c است، همچنین نتایج حاصل از طیف پراش پرتوی ایکس این نانومیله سنتز شده مطابق با طیف پراش پرتوی ایکس نانواکسید روی متعارف است.



شکل ۵. طیف فرابنفش - مرئی مربوط به (الف) P³HT:PCBM (ب) هیبرید P³HT:PCBM/ZnO.



شکل ۴. طیف جذبی فرابنفش - مرئی نانومیله اکسید روی.



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) منحنی جریان - ولتاژ (الف) P³HT:PCBM (ب) P³HT:PCBM/ZnO.

جدول ۱. مشخصات و عملکرد سلول خورشیدی پلیمری با حضور و بدون نانواکسید روی.

نوع سلول خورشیدی	Voc (V)	Jcs (mA/cm ²)	FF	PCE%
P ³ HT:PCBM	۰٫۶۱	۸٫۰۱	۰٫۵۵	۲٫۷۲
P ³ HT:PCBM/ZnO	۰٫۶۰	۸٫۷۰	۰٫۵۸	۳٫۰۱

بر این، طیف جذبی کامپوزیت ساختار خاص و ویژه پلیمر را نیز نشان می‌دهد. که باعث بهبود ساختار پلیمر شده است. پلیمر P³HT:PCBM حداکثر جذبی در طول موج ۴۴۵ نانومتر را نشان می‌دهد، اختلاط نانومیله اکسید روی در پلیمر P³HT:PCBM باعث بهتر شدن طیف جذبی نانوکامپوزیت می‌شود. از جمله افزایش در شدت جذب و ظهور شانه در ناحیه ۵۲۰ و ۴۸۰ نانومتر، که با جابه‌جایی حداکثر جذب، به سمت ناحیه قرمز (۵۳۳ نانومتر) همراه است.

جمله منحنی چگالی جریان - ولتاژ (J-V) دستگاه سلول خورشیدی، در حضور نانومیله اکسید روی و بدون حضور اکسید روی، در شکل ۶ نشان داده شده است. در جدول ۱ مشخصات و نحوه عملکرد سلول خورشیدی بیان شده است.

طیف فرابنفش - مرئی نانومیله اکسید روی را نشان می‌دهد همان طور که مشاهده می‌شود این نانومیله حداکثر جذب قوی زیر ۴۰۰ نانومتر را نشان می‌دهد. این طیف جذبی نشان می‌دهد که جذب نانومیله اکسید روی در ناحیه مرئی کم بوده که مشخصه نانواکسید روی است.

شکل ۵ نیز، طیف فرابنفش - مرئی پلیمرهای P³HT:PCBM و P³HT:PCBM/ZnO را به عنوان لایه فعال نشان می‌دهد. مقایسه این دو طیف (الف و ب)، بهبود جذبی نانوکامپوزیت P³HT:PCBM/ZnO را نسبت به P³HT:PCBM نشان می‌دهد. در طیف فرابنفش - مرئی پلیمر P³HT:PCBM در ناحیه مرئی و نانومیله اکسید روی جذبی در ناحیه فرورسرخ را نشان می‌دهد. در نتیجه، محدوده جذبی کامپوزیت کمی پهن‌تر شده است. علاوه

همان طور که در منحنی چگالی جریان-ولتاژ مشاهده می‌شود با حضور نانومیله اکسید روی، این دستگاه Voc یا ولتاژ مدارباز در حدود 0.60 V و ولت و چگالی جریان Jcs در حدود 8.70 mA/cm^2 و عامل فعالیت این دستگاه 0.58 می‌باشد. اما با توجه به نمودار، بدون حضور نانومیله اکسید روی، Voc دستگاه در حدود 0.61 V و ولت و Jcs در حدود 8.01 mA/cm^2 و عامل فعالیت دستگاه 0.55 می‌باشد. بنابراین از مقایسه ولتاژ و جریان‌های به دست آمده مشاهده می‌شود که حضور نانومیله اکسید روی باعث افزایش چگالی جریان اتصال کوتاه و عامل فعالیت می‌شوند. از طرفی با استفاده از نانومیله اکسید روی چگالی جریان اتصال کوتاه از مقدار 8.01 میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع به مقدار 8.70 افزایش پیدا کرده است که نشان دهنده 1.07 برابر شدن جریان است. این افزایش چگالی جریان به انتقال الکترونی مؤثر از طریق نانومواد نسبت داده می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

به طور خلاصه در این کار پژوهشی، نانومیله ZnO در محلول آبی و با استفاده از دی‌هیدرات استات روی و پلی‌وینیل پیرولیدون به عنوان پیش ماده و پایدار کننده، با موفقیت سنتز شد. اندازه متوسط دانه با استفاده از طیف پراش پرتوی ایکس در حدود $50-40$ نانومتر و با استفاده از تصویر TEM در حدود

مراجع

1. B R Saunders and M L Turner, *Adv. Colloids. Interface Sci.* **138** (2008) 1.
2. Y Zhou, M Eck, and M Kruger, *Energy Environ. Sci* **3** (2010) 1851.
3. N C Greenham, in C Brabec, V Dyakonov, and U Scherf (Eds.), "Organic Photovoltaics; Materials Device Physics and Manufacturing Technologies", Wiley-VCH, Weinheim (2008).
4. V Thangadurai and P Kopp, *J. Power Sources* **168** (2007) 2.
5. T Tuken, B Yazici, and M Erbil, *Material Chemistry and Physics* **99** (2006) 459.
6. M S White, D C Olson, S E Shaheen, N Ko pida kis, and D S Ginley, *Applied Physics Letters* **89** (2006) 143517.
7. F Zhang, X Xu, W Tang, J Zhang, Z Zhuo, J Wang, J Wang, Z Xu, and Y Wang, *Solar Energy Materials*
8. W Cai, X Gong, and Y Cao, *J. Solar Energy Materials and Solar Cells* **94** (2010) 114.
9. S K Hau, H L Yip, and A K Y Jen, *Polymer Reviews* **50** (2010) 474.
10. Y Sun, J H. Seo, C J Takacs, J Seifert, and A J Heeger, *J. Advanced Materials* **23** (2011) 1679.
11. J Nelson, *Mater. Today* **14**, 10 (2011) 462.
12. Y W Heo, D P Norton, L C Tien, Y Kwon, B S Kang, F Ren, S J Pearton, and J R LaRoche, *Materials Science and Engineering R: Reports* **47** (2004) 1.
13. J W Kang, Y J Kang, S Jung, M Song, D G Kim, C SuKim, and S H Kim, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **103** (2012) 76.
14. D C Lim, W H Shim, K D Kim, H O Seo, J H Lim, Y Jeong, Y D Kim, and K H Lee, *Solar Energy*

and Solar Cells **95** (2011) 1785.

24. Y Hames, Z Alpaslan, A Kösemen, S E San, and Y Yerli, *J. Solar Energy* **84** (2010) 426.
25. M Wang, Y Li, H Huang, E D Peterson, W Nie, W Zhou, W Zeng, W uang, G Fang, N Sun, X Zhao, and D L Carroll, *J. Applied Physics Letters* **98** (2011) 103305.
26. Z Hu, J Zhang, Y Liu, Z Hao, X Zhang, and Y Zhao, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **95** (2011) 2126.
27. K Takanezawa, K Tajima, and K Hashimoto, *J. Applied Physics Letters* **93** (2008) 63308.
28. C Y Chou, J S Huang, C H Wu, C Y Lee, and C F Lin, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **93** (2009) 1608.
29. J S Huang, C Y Chou, and C F Lin, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **94** (2010) 182.
30. J Ajuria, I Etxebarria, E Azaceta, R Tena-Zaera, N Fernandez-Montcada, E Palomares, and R Pacios *J. Physical Chemistry Chemical Physics* **13** (2011) 20871.
31. Y M Sung, F C Hsu, C T Chen, W F Su, and Y F Chen, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **98** (2012) 103.
15. J Huang, Z Yin, and Q Zheng, *Energy & Environmental Science* **4** (2011) 3861.
16. M A Ibrahim, H Y Wei, M H Tsai, K C Ho, J J Shyue, and C W Chu, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **108** (2013) 156.
17. T Y Chu, S W Tsang, J Zhou, P G Verly, J Lu, S Beaupré, M Leclerc, and Y Tao, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **96** (2012) 155.
18. F C Krebs, J Fyenbo, and M Jorgensen, *J. Materials Chemistry* **20** (2010) 89941.
19. R Søndergaard, M Helgesen, M Jørgensen, and F C Krebs, *J. Advanced Energy Materials* **1** (2011) 68.
20. F C Krebs, S A Gevorgyan, and J Alstrup, *J. Materials Chemistry* **19** (2009) 5442.
21. F C Krebs, T D Nielsen, J Fyenbo, M Wadstrom, and M S Pedersen, *Energy & Environmental Science* **3** (2010) 512.
22. R R Søndergaard, M Hösel, and F C Krebs, *J. Polymer Science Part B: Polymer Physics* **51** (2013) 16.
23. R Thitima, C Patcharee, S Takashi, and Y Susumu, *Solid- State Electronics* **53** (2009) 176.