



# بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی پروسکایتی از طریق اصلاح لایه‌ی انتقال‌دهنده‌ی الکترون با پلی‌آنیلین

زهرا السادات میرباقری فیروزآباد<sup>۱</sup>، محمود برهانی زرنندی<sup>۱</sup>، مهدی شریفیان<sup>۱</sup>، زینب صفری<sup>۱</sup>، حجت امراللهی بیوکی<sup>۲</sup>

۱- گروه اتمی و مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

۲- گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

**چکیده:** در بین لایه‌های انتقال‌دهنده‌ی الکترون مختلف به کار برده شده در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی، تاکنون، دی‌اکسید تیتانیم  $TiO_2$  کارآمدترین لایه‌ی انتقال‌دهنده‌ی الکترون است. اما با ترکیب زیاد الکترون‌ها و حفره‌ها در لایه‌ی دی‌اکسید تیتانیم، مشکلی است که پژوهشگران با آن روبرو هستند. پژوهشگران با دپ کردن افزودنی‌های متفاوت مناسب در این لایه، در صدد رفع این مشکل برآمده‌اند. در این پژوهش، برای اصلاح این عیب، پلی‌آنیلین به پیش ماده‌ی لایه‌ی مزومتخلخل دی‌اکسید تیتانیم  $mp-TiO_2$  افزوده شد تا عملکرد سلول خورشیدی پروسکایتی متیل آمونیم بهبود یابد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دادند، ریخت-شناسی، بلورینگی و پوشش فیلم پروسکایت لایه‌نشانی شده بر بستر  $mp-TiO_2$  دوپ شده با پلی‌آنیلین با نسبت‌های حجمی ۲٪، ۴٪ و ۸٪ در مقایسه با فیلم پروسکایت لایه‌نشانی شده بر بستر  $mp-TiO_2$  خالص بهبود یافته است. با افزودن پلی‌آنیلین به لایه‌ی  $mp-TiO_2$  با نسبت‌های حجمی متفاوت، چگالی جریان مدار باز  $J_{sc}$  و فاکتور پرشوندگی  $FF$  افزایش یافتند. افزایش این پارامترها به دلیل کاهش بازترکیب بارها در سطح مشترک  $TiO_2$  / پروسکایت و همچنین، کاهش تله‌های بار است، که سبب بهبود عملکرد سلول می‌شود. سلول ساخته شده بر بستر  $mp-TiO_2$  اصلاح شده با نسبت حجمی ۴٪ از پلی‌آنیلین، بهترین ریخت‌شناسی، بلورینگی و عملکرد (۷۳٪) را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: سلول‌های خورشیدی پروسکایتی، لایه‌ی انتقال‌دهنده‌ی الکترون، پلی‌آنیلین، مزومتخلخل

\*mborhani@yazd.ac.ir

منابعی بسیار گران‌قیمت تبدیل خواهند شد. از اینرو تلاش برای یافتن جایگزین‌هایی مطمئن برای منابع تجدیدناپذیر انرژی شدت گرفت. انرژی تجدیدپذیر جایگزینی مناسب در تأمین انرژی مورد نیاز جوامع بشری است. انرژی‌هایی که محصول منابعی چون تابش خورشید یا وزش باد و دیگر منابع طبیعی عمدتاً در دسترس هستند. پس، اهمیت استفاده از انرژی نور خورشید که منبعی پاک، رایگان و نامحدود است، برای بشر آشکار شد. سلول‌های خورشیدی، با تبدیل مستقیم نور خورشید به انرژی الکتریکی، تجهیزات هستند که رسیدن به این هدف مهم، یعنی تبدیل انرژی تابشی خورشید به انرژی قابل استفاده را محقق می‌سازند. به تازگی، سلول‌های خورشیدی پروسکایتی که نسل سوم از

## ۱- مقدمه

انرژی، نیاز اول جهان و یکی از مناقشه‌انگیزترین نیازهای بشر در دوران مدرن بوده است. آن‌چنان که، نفت به عنوان سوخت نخست دنیا تمام قرن گذشته را متأثر کرد. بطوریکه، قرن بیستم به حق، «قرن نفت» نامیده شد. در زمانی که جهان بیشتر از هر وقت دیگری تشنه‌ی انرژی حاصل از منبع نفت بود، مجبور شد برای آن بهایی بسیار بیشتر از قبل بپردازد تا بسیاری از مصرف‌کنندگان عمده از خواب غفلت بیدار شده و دریابند که این منابع فسیلی نه تنها ابدی نیستند بلکه به واسطه افزایش تقاضا و کاهش طبیعی عرضه به دلیل تجدیدناپذیر بودن، به زودی به

سلول‌های خورشیدی فوتوولتائیک می‌باشند، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند. این نوع سلول‌های خورشیدی دارای ویژگی‌های برجسته‌ای از جمله: ساخت آسان، وزن سبک، قیمت مناسب، و بازده تبدیل توان بالا (که به بیش از ۲۵٪ رسیده) هستند [۱-۵]. از جمله، ساختارهایی که برای سلول‌های خورشیدی پروسکایتی مطرح شده، ساختارهای متخلخل و مسطح است [۶، ۷]. تاکنون بالاترین عملکرد ثبت شده سلول‌های خورشیدی پروسکایتی به سلول‌های دارای ساختار متخلخل اختصاص داده شده است [۸]. همچنین گزارش شده است که سلول‌های ساختار متخلخل پایداری بالاتری نسبت به سلول‌های ساختار مسطح دارند [۹]. تاکنون مواد متفاوتی به‌عنوان لایه‌ی انتقال دهنده الکترون با تابع کار [۱۰، ۱۱] و رسانایی‌های متفاوت (که منجر به فصل مشترک متفاوت شده [۱۲، ۱۳] و بنابراین، روی بازده استخراج الکترون در سطح مشترک بین لایه‌ی انتقال دهنده الکترون و پروسکایت تأثیر می‌گذارند)، استفاده شده‌اند.

در بین مواد متفاوتی که به‌عنوان لایه‌ی انتقال دهنده الکترون استفاده شده، دی‌اکسید تیتانیم ( $TiO_2$ ) به دلیل خصوصیت اپتوالکترونیکی مناسب [۶]، پایداری و سازگاری بالا با ساختار گاف سلول [۱۴] به‌طور وسیعی، در ساختار سلول‌های خورشیدی استفاده شده است. لازم به ذکر است که، تاکنون بالاترین عملکرد گزارش شده از سلول‌های خورشیدی پروسکایتی مربوط به ساختارهایی است که در آن‌ها از دی‌اکسید تیتانیم به‌عنوان لایه‌ی انتقال دهنده الکترون استفاده شده است [۱۵]. پژوهشگران، پژوهش‌های گسترده‌ی به لایه‌ی مزومتخلخل دی‌اکسید تیتانیم به‌عنوان یک انتقال دهنده الکترون مؤثر که نقشی اساسی در جمع‌آوری الکترون‌ها و انتقال فوتوالکترون‌های تولیدشده به زیرلایه‌ی FTO ایفا می‌کند، اختصاص داده‌اند [۱۶-۱۸].

یکی از معایب لایه دی‌اکسید تیتانیم، بازترکیب زیاد الکترون و حفره در این لایه است [۸، ۱۹]. تحقیقات نشان است که، حضور دانسیته‌ی بالای تله‌های الکترونیکی عمیق زیر باند رسانش دی‌اکسید تیتانیم برای کاربردهای سلول‌های خورشیدی مضر است [۲۰-۲۲]. در واقع، این حالت‌های تله سبب بازترکیب بار و مانع از انتقال حامل‌های بار درون سلول خورشیدی می‌شود.

بطوریکه، این عوامل اثر مخربی روی ولتاژ مدار باز و جریان مدار کوتاه دارد [۲۳، ۲۴]. همچنین، دی‌اکسید تیتانیم پرتو فرابنفش را به‌طور عمده جذب می‌کند، اما کسر کمی از نور مرئی را جذب می‌کند که این مشکل به‌خاطر حضور تله‌های الکترونیکی است [۲۰، ۲۱]. این حالت‌های تله‌ی، به دلیل نقص غیراستوکیومتری در دی‌اکسید تیتانیم ایجاد می‌شود، که بر روی دو پارامتر اصلی عملکرد و پایداری سلول خورشیدی تأثیرگذار است [۲۱، ۲۲].

یکی از راهکارهای پیشنهادی، برای رفع این مشکل، بهبود انتقال بار دی‌اکسید تیتانیم با دوپ کردن افزودنی در دی‌اکسید تیتانیم است [۲۵-۲۷]. تاکنون اثر افزودنی‌های متفاوتی همچون گرافن [۲۸، ۲۹]، لیتیم [۳۰]، نیوبیم (Nb) [۳۱]، روتیم (Rb) [۱۹]، پلی‌آیلین [۸] و کبالت [۳۲] در لایه‌ی انتقال دهنده الکترون بررسی شده است.

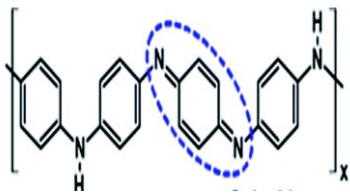
پژوهشگران در گزارشی نشان داده‌اند که، افزودن نمک لیتیم (Li-TFSI) در لایه مزومتخلخل دی‌اکسید تیتانیم منجر به پیشرفت قابل توجهی در بازده سلول و کاهش پسماند می‌شود [۳۳]. در گزارشی دیگر، پی بردند که مزومتخلخل دی‌اکسید تیتانیم دوپ شده با لیتیم انتقال الکترون‌ها را سریعتر کرده و سبب پیشرفت قابل توجهی در بازده سلول خورشیدی ساخته شده بر بستر این لایه می‌شود [۳۰]. اولین بار در سال ۲۰۱۸، کاتیون‌های کبالت درون مزومتخلخل دی‌اکسید تیتانیم دوپ شد. نتایج نشان داد، مزومتخلخل دی‌اکسید تیتانیم دوپ شده با کبالت سبب بهبود هدایت الکتریکی، کاهش مقاومت در برابر انتقال بار، کاهش تله‌های عمیق سطح و همچنین تابع کار منطبق شده‌ی مناسب‌تر (که امکان انتقال کارآمد الکترون‌ها درون مزومتخلخل دی‌اکسید تیتانیم فراهم می‌کند) می‌شود، که منجر به افزایش قابل توجهی در بازده میانگین از ۱۴/۹۲٪ تا ۱۸/۱۶٪، پسماند ناچیز و بهبود پایداری شده است [۳۲].

پژوهشگران در گزارشی دیگر نشان دادند که، با دوپ اکسید گرافن (RG) و اکسید گرافن کاهش یافته (RGO) در مزومتخلخل دی‌اکسید تیتانیم، عملکرد سلول خورشیدی بطور قابل توجهی بهبود یافت [۲۹، ۳۴-۳۶]. همچنین، عملکرد و پایداری سلول خورشیدی پروسکایت با دوپ کردن روتیم درون مزومتخلخل دی‌اکسید تیتانیم افزایش یافته است [۱۹]. پژوهشگران دانشگاه یزد به‌طور گسترده در این زمینه به تحقیق

از دستگاه شبیه‌ساز سلول خورشیدی Keithley ۲۴۰۰ با شدت نور استاندارد خورشید معادل AM 1.5G استفاده شده است. برای اندازه‌گیری طیف فوتولومینسانس فیلم‌های پروسکایت یک سیستم PL (طیف‌سنج FL-Ar-2015) به کار گرفته شد.

## ۲-۲- روش سنتز پلی‌انیلین

ساختار مولکولی پلی‌انیلین در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): ساختار مولکولی پلی‌انیلین.

برای سنتز این ماده، ابتدا با روش تقطیر، مونومر انیلین خالص تهیه شد. سپس، ارلن حاوی ۲ ML از انیلین و ۱۰ سی‌سی از HCL2ML در بشر حاوی یخ و تحت چرخش روی هم‌زن مغناطیسی بدون دما قرار گرفت. مخلوط ۴/۵ گرم آمونیوم پرسولفات و ۸۵۰ میلی‌گرم از  $CuCl_2 \cdot 4H_2O$  در ۲۵ سی‌سی از HCL2ML تحت چرخش روی هم‌زن مغناطیسی در دمای صفر درجه سانتیگراد حل شد. سپس، محلول حاوی آمونیوم پرسولفات را قطره قطره به محلول حاوی انیلین افزوده و به مدت ۲ ساعت تحت چرخش روی هم‌زن مغناطیسی بدون دما قرار گرفت. بعد ماده حاصل درون دستگاه گریزان چند دفعه با HCL و چند دفعه با آب چرخید و سپس، در آون ۱۲۰ درجه سانتیگراد خشک و بدین صورت پودر پلی‌انیلین تهیه شد. همچنین، افزودن  $CuCl_2$  به مواد، به احتمال سبب افزایش رسانایی پلی‌انیلین خواهد شد. تصویر SEM نانوکریستال‌های پلی‌انیلین در شکل (۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نانوکریستال‌های پلی‌انیلین به صورت ذرات کروی شکل متخلخل با اندازه میانگین قطر ۲۵۰nm، حاصل از روش هم رسوبی محلولی مشاهده شد.

پرداختند و در یکی از تحقیقات این دانشگاه، اکسید گرافن کاهش یافته و پلی‌انیلین را در مزومتخلخل دی‌اکسید تیتانیم دوپ کردند و به عنوان لایه‌ی انتقال دهنده الکترون استفاده کردند. افزودن این ترکیب درون لایه‌ی مزومتخلخل دی‌اکسید تیتانیم سبب بهبود پارامترهای جریان مدار کوتاه، فاکتور پرشوندگی، بازدهو پایداری سلول شد [۸].

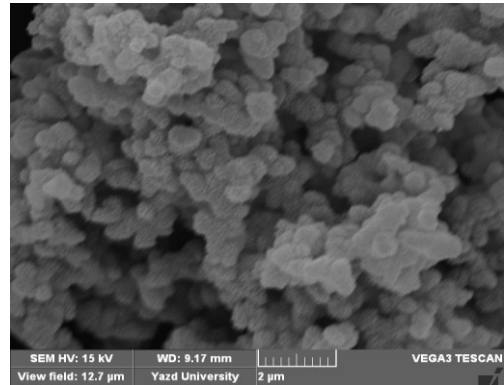
در این پژوهش، ابتدا پلی‌انیلین سنتز شد. سپس نسبت‌های حجمی متفاوت (۲٪، ۴٪ و ۸٪) از پلی‌انیلین سنتز شده، به عنوان افزودنی در محلول مزومتخلخل دی‌اکسید تیتانیم دوپ شدند. سلول‌های خورشیدی پروسکایتی با پوشش چرخشی  $MAPbI_3$  بر لایه‌ی انتقال‌دهنده‌ی الکترون مزومتخلخل  $mP - TiO_2$  خالص و اصلاح شده با نسبت‌های حجمی متفاوت ۲٪، ۴٪ و ۸٪ از پلی‌انیلین ساخته و به ترتیب به عنوان Ref.،  $PANI - 2\%$ ،  $PANI - 4\%$  و  $PANI - 8\%$  برچسب زده شدند. در ادامه، ریخت‌شناسی، کریستالوگرافی، خواص اپتیکی لایه‌های پروسکایت و عملکرد سلول‌های خورشیدی پروسکایتی ساخته شده بر روی بستر  $mP - TiO_2$  خالص و سلول‌های خورشیدی پروسکایتی ساخته شده بر بستر  $mP - TiO_2$  اصلاح شده با پلی‌انیلین با نسبت‌های حجمی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- بخش تجربی

### ۲-۱- مواد و تجهیزات مورد استفاده

حلال‌های استون، ان دی اتیل فرماید (DMF)، هیدروکلریک اسید (HCL)، اتانول (۹۸٪)  $(C_2H_5OH)$ ، ایزوپروپانول  $(CH_3CH(OH)CH_3)$  و کلروبنزن از شرکت مرک خریداری شدند. پودر زینک، خمیر  $TiO_2$ ، سرب یدید  $(PbI_2)$ ، شیشه رسانای شفاف (FTO) و متیل‌آمونیوم‌یدید  $(CH_3NH_3I)$  از شرکت شریف سولار تهیه شد.

برای مطالعه و بررسی سطح پوشش و ریخت‌شناسی پروسکایت ایجاد شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی CarlCrossbeam Zeiss Auriga40 استفاده شد. برای ارزیابی عملکرد فتوولتائیکی، ارزیابی مشخصه‌های ولتاژ-جریان جهت تعیین بازده سلول و اندازه‌گیری جریان مدار کوتاه و ولتاژ مدار باز



شکل (۲): تصویر SEM نانوکریستال‌های پلی‌انیلین سنتز شده به روش محلولی در دمای محیط.

نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد در کوره افقی پخت شدند (لایه  $\text{TiO}_2$  - mP خالص). برای تهیه‌ی محلول پلی‌انیلین، ۲۰ میلی‌گرم پودر پلی‌انیلین سنتز شده در ۵ سی سی کلروبنزن به مدت ۲۴ ساعت تحت چرخش روی هم‌زن مغناطیسی بدون دما حل شد. ترکیب ۲٪، ۴٪ و ۸٪ حجمی از محلول پلی‌انیلین با محلول مزومتخلخل دی‌اکسید تیتانیم ( $\text{TiO}_2$ ) تهیه و این ترکیب‌ها نیز با همان روش محلول مزومتخلخل  $\text{TiO}_2$  لایه‌نشانی شدند (لایه  $\text{TiO}_2$  - mP اصلاح شده با پلی‌انیلین). در مرحله‌ی بعدی، برای لایه‌نشانی لایه‌ی جاذب پروسکایت با روش دوم مرحله‌ای غوطه‌وری، ابتدا در مرحله نخست، محلول سرب یدید ( $\text{PbI}_2$ ) با روش لایه‌نشانی چرخشی با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۶۰ ثانیه لایه‌نشانی و به مدت ۲۰ دقیقه بر هیتر ۷۰ درجه سانتیگراد حرارت‌دهی انجام شد. در مرحله دوم برای رشد لایه‌ی جاذب پروسکایت، نمونه‌های لایه‌نشانی شده با  $\text{PbI}_2$  برای تشکیل پروسکایت متیل آمونیم ( $\text{MAPbI}_3$ ) در محلول MAI به مدت ۵ دقیقه غوطه‌ور و سپس، نمونه‌ها ۲۰ دقیقه در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شدند. در نهایت، نمونه‌ها با لایه‌ی طلا به ضخامت حدود ۶۰ نانومتر با دستگاه کندوپاش (اسپاترینگ) لایه‌نشانی شدند.

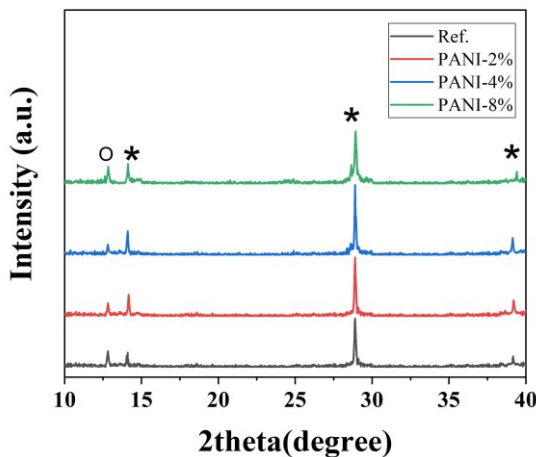
### ۳- نتایج و بحث

شکل (۳) نمودار شدت PL فیلم‌های پروسکایت لایه‌نشانی شده بر روی بستر  $\text{TiO}_2$  - mP خالص و فیلم‌های پروسکایت لایه‌نشانی شده بر بستر  $\text{TiO}_2$  - mP اصلاح شده با پلی‌انیلین با نسبت‌های حجمی متفاوت ۲٪، ۴٪ و ۸٪ بر حسب طول موج را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، شدت PL با افزایش درصد پلی‌انیلین در زیرلایه  $\text{TiO}_2$  - mP تا نسبت حجمی ۴٪ کاهش می‌یابد که این کاهش شدت PL به خاطر بهبود انتقال بار در سطح مشترک  $\text{TiO}_2$  / پروسکایت است. در واقع با افزایش درصد پلی‌انیلین در زیرلایه  $\text{TiO}_2$  - mP تا ۴٪ باز ترکیب الکترون-حفره کاهش می‌یابد که این به نوبه خود سبب بهبود انتقال بار و در نتیجه کاهش شدت PL می‌شود. اما، وقتی درصد پلی‌انیلین از ۴٪ به ۸٪ افزایش می‌یابد شدت PL افزایش می‌یابد، که این افزایش شدت PL به دلیل وجود پلی‌انیلین اضافی در لایه مزومتخلخل دی‌اکسید تیتانیم است که

### ۳-۲- روش ساخت سلول

به منظور ساخت سلول، از FTO به عنوان زیرلایه استفاده شد. از آنجاییکه سلول‌های خورشیدی لایه نازک و نانو ساختار، نسبت به آلودگی‌های سطحی زیرلایه، بسیار حساس هستند، زیرلایه‌ها در چندین مرحله شستشو داده می‌شوند. ابتدا شیشه‌های FTO با آب و صابون شستشو داده شدند. سپس، با محلول آب دو بار تقطیر، استون و اتانول به مدت ۱۵ دقیقه به ترتیب، هر کدام در حمام فراصوت شستشو داده شدند. در نهایت، زیرلایه‌ها با جریان گاز  $\text{N}_2$  خشک شدند. مرحله بعدی، لایه‌نشانی لایه سد کننده حفره است که این لایه، وظیفه ممانعت از عبور حفره‌های تولید شده در لایه پروسکایت را بر عهده دارد. محلول سدکننده‌ی حفره ( $b - \text{TiO}_2$ ) با استفاده از دستگاه اسپین کوت (لایه‌نشانی چرخشی) با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۶۰ ثانیه لایه‌نشانی شد. سپس لایه‌ها، ابتدا به مدت ۲۰ دقیقه در آن تحت دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد و در نهایت به مدت ۱ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد در کوره مکعبی پخت داده شدند. مرحله‌ی بعدی، لایه‌نشانی لایه‌ی انتقال‌دهنده‌ی الکترون مزومتخلخل است که پروسکایت درون این لایه متخلخل نفوذ کرده و باعث افزایش نسبت سطح به حجم آن و در نتیجه افزایش جذب نور و به دنبال آن تولید الکترون-حفره می‌شود و الکترون‌ها را به سمت الکتروود آند هدایت می‌کند. به منظور لایه‌نشانی لایه‌ی مزومتخلخل، محلول خمیر تیتانیم با اتانول رقیق شده با روش لایه‌نشانی چرخشی با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۶۰ ثانیه لایه‌نشانی شد و به مدت ۲۰ دقیقه در آن تحت دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد. سپس،

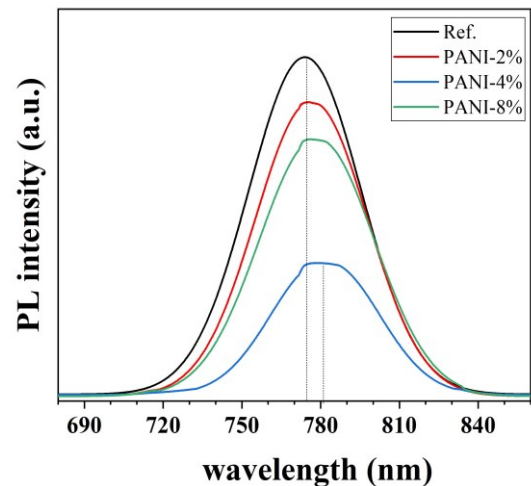
پروسکایت نشان دهنده افزایش بلورینگی پروسکایت است. اما با افزایش درصد پلی آنیلین از ۴٪ به ۸٪، شدت این پیکها کمی کاهش می یابد.



شکل (۴): الگوهای XRD فیلمهای پروسکایت لایه نشانی شده بر روی بستر  $mP - TiO_2$  خالص و اصلاح شده با پلی آنیلین با نسبت های حجمی متفاوت ۲٪، ۴٪ و ۸٪

شکل (۵)، تصاویر SEM فیلمهای پروسکایت لایه نشانی شده بر روی بستر  $mP - TiO_2$  خالص و فیلمهای پروسکایت لایه نشانی شده بر بستر  $mP - TiO_2$  اصلاح شده با پلی آنیلین با نسبت های حجمی متفاوت ۲٪، ۴٪ و ۸٪ را نشان می دهد. همانگونه که از شکل (۵) مشاهده می شود، در فیلم پروسکایت لایه مزومتخلخل  $TiO_2$  خالص (۵-الف)، حفره هایی در فیلم پروسکایت وجود دارد که این حفره ها مانند مرکز تله های حامل های بار عمل می کنند و باز ترکیب بار در لایه پروسکایت را افزایش می دهند [۴۰، ۴۱]. همانطور که در تصاویر SEM شکل (۵-ب) و شکل (۵-ج) نشان داده شده است، افزودن پلی آنیلین به مزومتخلخل  $TiO_2$ ، باعث شده که فیلمهای پروسکایت لایه نشانی شده بر روی بستر  $mP - TiO_2$  حاوی ۲٪ و ۴٪ از افزودنی پلی آنیلین، نقایص کمتری نسبت به فیلمهای پروسکایت لایه نشانی شده بر روی بستر  $mP - TiO_2$  خالص داشته باشند. افزودن پلی آنیلین به لایه مزومتخلخل  $TiO_2$  حفره ها را از بین می برد و سطح فشرده تری به وجود می آورد. با افزودن پلی آنیلین به لایه مزومتخلخل  $TiO_2$  از حالت خالص به نسبت حجمی ۲٪ پلی آنیلین و از نسبت حجمی ۲٪ پلی آنیلین به نسبت حجمی ۴٪

باعث کاهش در بلورینگی فیلم پروسکایت می شود [۳۷، ۳۸]. همچنین وقتی پلی آنیلین به زیر لایه  $mP - TiO_2$  افزوده می شود، پیک PL از ۷۷۴ nm به ۷۸۱ nm تغییر می کند. در واقع در اثر دوپ کردن این افزودنی در لایه مزومتخلخل دی اکسید تیتانیوم، شیفیت به سمت طول موج قرمز را داریم، که سبب افزایش فوتوجریان می شود [۳۹].

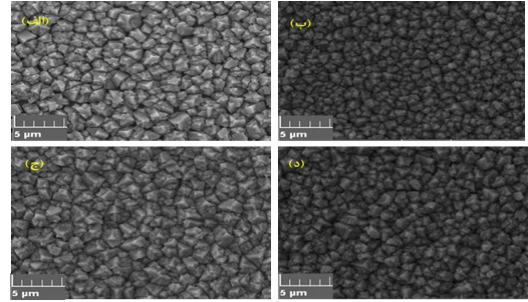


شکل (۳): نمودار طیف PL فیلمهای پروسکایت لایه نشانی شده بر روی بستر  $mP - TiO_2$  خالص و اصلاح شده با پلی آنیلین با نسبت های حجمی متفاوت ۲٪، ۴٪ و ۸٪ بر حسب طول موج.

در ادامه، برای بررسی اثر اصلاح زیر لایه  $mP - TiO_2$  روی بلورینگی لایه پروسکایت، تکنیک پراش پرتو X به کار گرفته شد. نمودار XRD فیلمهای پروسکایت لایه نشانی شده بر روی بستر  $mP - TiO_2$  خالص و فیلمهای پروسکایت لایه نشانی شده بر بستر  $mP - TiO_2$  اصلاح شده با پلی آنیلین با نسبت های حجمی متفاوت ۲٪، ۴٪ و ۸٪ در شکل (۴) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل (۴) مشاهده می شود، با افزایش درصد پلی آنیلین در زیر لایه  $mP - TiO_2$  از حالت خالص تا ۴٪، پیک ۱۲/۸ که مربوط به  $PbI_2$  است، به طور جزئی سرکوب می شود. اما وقتی درصد پلی آنیلین از ۴٪ به ۸٪، افزایش می یابد شدت این پیک کمی افزایش می یابد که نشان دهنده تجزیه جزئی  $PbI_2$  است. پیکهای پروسکایت در ۲۸، ۳۹ و ۱۴/۱ واقع شده اند. با افزایش درصد پلی آنیلین در زیر لایه  $mP - TiO_2$  از حالت خالص به نسبت حجمی ۲٪ پلی آنیلین و از ۲٪ به ۴٪ شدت پیکهای پروسکایت که مربوط به کریستال  $MAPbI_3$  است، افزایش می یابد. این افزایش در شدت پیکهای

هستند). بر طبق جدول مقدار میانگین  $J_{sc}$  سلول ساخته شده بر بستر لایه  $mp - TiO_2$  اصلاح شده با نسبت حجمی ۴٪ از افزودنی پلی‌آنیلین ( $13/82 \text{ mA/cm}^2$ )، افزایش قابل ملاحظه‌ای نسبت به مقدار میانگین  $J_{sc}$  سلول ساخته شده بر بستر لایه  $mp - TiO_2$  خالص ( $9/53 \text{ mA/cm}^2$ ) نشان می‌دهد. که این افزایش مقدار میانگین  $J_{sc}$  را می‌توان به رسانایی بهتر لایه  $mp - TiO_2$  اصلاح شده با افزودن پلی‌آنیلین (رسانایی بهتر احتمالاً ناشی از افزودن  $CuCl_2$  به مواد، در مرحله‌ی سنتز پلی‌آنیلین می‌باشد) و با ترکیب کمتر الکترون-حفره، که سبب بهبود انتقال بار لایه انتقال‌دهنده‌ی الکترون می‌شوند نسبت داد. همچنین، طبق جدول، مقدار میانگین  $PCE$  سلول ساخته شده بر بستر لایه  $mp - TiO_2$  اصلاح شده با نسبت حجمی ۴٪ از افزودنی پلی‌آنیلین (۶/۹۱)، افزایش چشمگیری نسبت به مقدار میانگین  $PCE$  سلول ساخته شده بر بستر لایه  $mp - TiO_2$  خالص (۴/۶۲) نشان داد.

پلی‌آنیلین، سطح فشرده‌تری به وجود می‌آید و سایز کریستال نیز افزایش می‌یابد. اما با افزایش درصد پلی‌آنیلین از ۴٪ به ۸٪، سایز کریستال کمی کاهش می‌یابد که این نتایج با نتایج PL و XRD سازگاری دارد.



شکل (۵): تصاویر SEM فیلم‌های پروسکایت لایه‌نشانی شده بر روی بستر  $mp - TiO_2$  خالص (الف) و فیلم‌های پروسکایت لایه‌نشانی شده بر روی بستر  $mp - TiO_2$  اصلاح شده با پلی‌آنیلین با نسبت‌های حجمی متفاوت ۲٪ (ب)، ۴٪ (ج) و ۸٪ (د).

بررسی اثر افزودن پلی‌آنیلین به پیش ماده‌ی  $mp - TiO_2$  بر عملکرد سلول خورشیدی و پارامترهای فوتولتائیکی ( $J_{sc}$ : چگالی جریان مدار کوتاه،  $V_{oc}$ : ولتاژ مدار باز،  $FF$ : عامل پرشدگی و  $PCE$ : بازده تبدیل توان) با استفاده از دستگاه Keithley2400 و شبیه‌ساز خورشیدی AM 1.5G استخراج شد. لازم به ذکر است که بازده تبدیل توان سلول خورشیدی به سه پارامتر فوتولتائیکی ( $J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF$ ) وابسته است. معادلات (۱) و (۲) وابستگی بازده تبدیل توان سلول به این پارامترهای فوتولتائیکی را نشان می‌دهند. در این روابط،  $V_{max}$ ،  $J_{max}$  و  $P_{in}$  به ترتیب ولتاژ ماکزیمم، چگالی جریان ماکزیمم و توان نور هستند.

$$FF = \frac{V_{max} \times J_{max}}{V_{oc} \times J_{sc}} \quad (1)$$

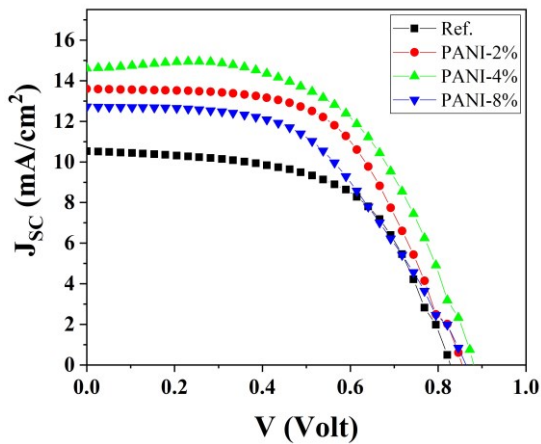
$$PCE = \frac{V_{oc} \times J_{sc} \times FF}{P_{in}} \quad (2)$$

جدول (۱): پارامترهای فوتولتائیک آماری سلول ساخته شده بر بستر لایه  $mp - TiO_2$  خالص و سلول‌های ساخته شده بر بستر لایه  $mp - TiO_2$  با نسبت‌های حجمی متفاوت ۲٪، ۴٪ و ۸٪ از افزودنی پلی‌آنیلین در زیر لایه  $mp - TiO_2$

		FF	$V_{oc}$	$J_{sc}$	PCE
mp-TiO <sub>2</sub>	(%)	(V)	(mA/cm <sup>2</sup> )	(%)	
Ref.	میانگین	۵۶/۰۵	۰/۸۱۲	۹/۵۳	۴/۶۲
	بهترین	۵۶/۳۱	۰/۸۳۴	۱۰/۵۲	۵/۰۹
PANI-2%	میانگین	۵۶/۶۷	۰/۸۴۲	۱۲/۴۸	۶/۱۱
	بهترین	۵۷/۲۳	۰/۸۵۳	۱۳/۵۹	۶/۶۵
PANI-4%	میانگین	۵۸/۰۹	۰/۸۶۸	۱۳/۸۲	۶/۹۱
	بهترین	۵۸/۴۲	۰/۸۸۴	۱۴/۶۱	۷/۳۱
PANI-8%	میانگین	۵۶/۳۹	۰/۸۳۸	۱۱/۸۸	۵/۳۰
	بهترین	۵۶/۹۱	۰/۸۴۹	۱۲/۷۲	۵/۶۷

همچنین، پارامترهای فوتولتائیک آماری:  $J_{sc}$ ،  $V_{oc}$ ،  $FF$  و  $PCE$  سلول ساخته شده بر بستر لایه مزومتخلخل  $TiO_2$  خالص و سلول‌های ساخته شده بر بستر لایه  $mp - TiO_2$  با نسبت‌های حجمی متفاوت ۲٪، ۴٪ و ۸٪ از افزودنی پلی‌آنیلین در زیر لایه  $mp - TiO_2$  در شکل (۶) نشان داده شده است. همانگونه که

میانگین و بهترین نتایج پارامترهای فوتولتائیک آماری از سلول‌های ساخته شده بر بستر لایه  $mp - TiO_2$  خالص و سلول‌های ساخته شده بر بستر لایه  $mp - TiO_2$  با نسبت‌های حجمی متفاوت ۲٪، ۴٪ و ۸٪ از افزودنی پلی‌آنیلین، در جدول (۱) بیان شده است (لازم به ذکر است که در این پژوهش ساختار سلول‌های خورشیدی پروسکایتی بدون لایه انتقال‌دهنده حفره



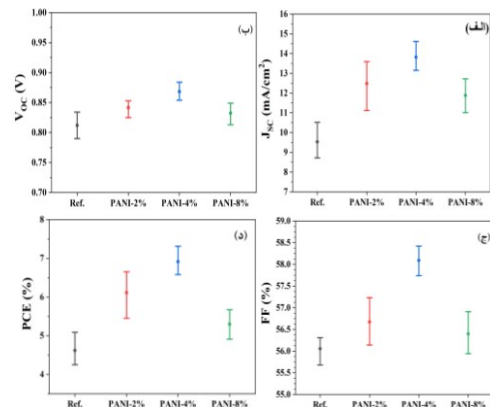
شکل (۷): نمودار چگالی جریان-ولتاژ سلول ساخته شده بر بستر لایه  $mp - TiO_2$  خالص و سلول‌های ساخته شده بر بستر  $mp - TiO_2$  با نسبت‌های حجمی متفاوت ۲٪، ۴٪ و ۸٪ از افزودنی پلی‌انیلین.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برای اصلاح مشکل بازترکیب زیاد الکترون‌ها و حفره‌ها در لایه‌ی انتقال‌دهنده‌ی الکترون مزومتخلخل دی‌اکسید تیتانیم و بهبود عملکرد سلول خورشیدی پروسکایتی مربوطه، پلی‌انیلین با نسبت‌های حجمی متفاوت به پیش‌ماده‌ی لایه‌ی انتقال‌دهنده‌ی الکترون مزومتخلخل دی‌اکسید تیتانیم افزوده شد و اثر افزودن پلی‌انیلین به لایه‌ی  $mp - TiO_2$  بر مورفولوژی نانوذرات، بلورینگی لایه پروسکایت و پارامترهای فتوولتائیکی مؤثر بر بازده سلول خورشیدی ساخته شده بر بستر لایه‌ی اصلاح شده، بررسی شد. نتایج نشان دادند که سلول خورشیدی ساخته شده بر بستر لایه‌ی  $mp - TiO_2$  اصلاح شده، فیلم پروسکایت فشرده‌تر و بلورینگی بیشتری دارد. همچنین مشاهده شد که افزودن پلی‌انیلین به زیرلایه  $mp - TiO_2$  می‌تواند سبب شیفت به سمت طول موج قرمز شود، که افزایش فوتوجریان را نشان می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که با افزودن پلی‌انیلین به زیرلایه  $mp - TiO_2$ ، بازترکیب الکترون-حفره کاهش می‌یابد. در نتیجه رسانایی لایه‌ی  $mp - TiO_2$  بهتر می‌شود، که این عوامل خود سبب بهبود انتقال بار و در نتیجه بهبود پارامترهای فتوولتائیکی می‌شوند. همانطور که نتایج فتوولتائیک نشان دادند افزودن پلی‌انیلین به لایه‌ی  $mp - TiO_2$  با نسبت‌های حجمی متفاوت، سبب بهبود چگالی جریان مدار باز ( $J_{sc}$ )، فاکتور پرشوندگی (FF) و بازده (PCE) سلول خورشیدی پروسکایتی مربوطه می‌شود. سلول خورشیدی پروسکایتی ساخته شده بر

مشاهده می‌شود، با افزایش درصد افزودنی پلی‌انیلین از ۰٪ به ۲٪ و از ۲٪ به ۴٪،  $J_{sc}$ ، FF و PCE افزایش می‌یابند. اما با افزایش درصد افزودنی پلی‌انیلین تا ۴٪ ولتاژ مدار باز ( $V_{oc}$ ) کمی افزایش یافت ولی تغییر چندانی نداشت. با افزودن پلی‌انیلین به زیرلایه  $mp - TiO_2$ ، بازترکیب الکترون-حفره کاهش می‌یابد و رسانایی لایه‌ی  $mp - TiO_2$  بهتر می‌شود، که این عوامل خود سبب بهبود انتقال بار و در نتیجه بهبود پارامترهای فتوولتائیکی می‌شوند. اما با افزایش درصد پلی‌انیلین از ۴٪ به ۸٪، تمام پارامترهای فتوولتائیکی کمی کاهش می‌یابند.

سلول خورشیدی پروسکایتی ساخته شده بر بستر  $mp - TiO_2$  اصلاح شده با نسبت حجمی ۴٪ از افزودنی پلی‌انیلین، بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. بنابراین، طبق مشاهدات، افزودن نسبت حجمی ۴٪ از پلی‌انیلین به‌عنوان نسبت افزودنی بهینه پیشنهاد می‌شود.



شکل (۶): پارامترهای فتوولتائیک آماری ( $J_{sc}$  الف)، ( $V_{oc}$  ب)، ( $FF$  ج) و ( $PCE$  د) سلول ساخته شده بر بستر لایه  $mp - TiO_2$  خالص و سلول‌های ساخته شده بر بستر لایه  $mp - TiO_2$  با نسبت‌های حجمی متفاوت ۲٪، ۴٪ و ۸٪ از افزودنی پلی‌انیلین.

شکل (۷)، نمودارهای چگالی جریان-ولتاژ سلول ساخته شده بر بستر لایه  $mp - TiO_2$  خالص و سلول‌های ساخته شده بر بستر لایه مزومتخلخل  $TiO_2$  با نسبت‌های حجمی متفاوت ۲٪، ۴٪ و ۸٪ از افزودنی پلی‌انیلین در زیرلایه  $mp - TiO_2$  را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آنست که، افزودن نسبت حجمی ۴٪ از پلی‌انیلین به پیش‌ماده‌ی  $mp - TiO_2$  سبب بهبود رسانندگی و بازترکیب کمتر الکترون-حفره و همچنین بهبود انتقال بار لایه انتقال‌دهنده‌ی الکترون و در نتیجه بهبود چگالی جریان مدار کوتاه ( $J_{sc}$ ) می‌شود [۴۲].

A. Behjat, "Enhancement of the photovoltaic performance and the stability of perovskite solar cells via the modification of electron transport layers with reduced graphene oxide/polyaniline composite," *Solar Energy*, 213, 59-66, 2021.

[9] K. Yao, F. Li, Q. He, X. Wang, Y. Jiang, H. Huang, and A. K.-Y. Jen, "A copper-doped nickel oxide bilayer for enhancing efficiency and stability of hysteresis-free inverted mesoporous perovskite solar cells," *Nano Energy*, 40, 155-162, 2017.

[10] H. Zhou, Q. Chen, G. Li, S. Luo, T.-b. Song, H.-S. Duan, Z. Hong, J. You, Y. Liu, and Y. Yang, "Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells," *Science*, 345, 542-546, 2014.

[11] X. Li, W. Ye, X. Zhou, F. Huang, and D. Zhong, "Increased efficiency for perovskite photovoltaics based on aluminum-doped zinc oxide transparent electrodes via surface modification," *The Journal of Physical Chemistry C*, 121, 10282-10288, 2017.

[12] J. Peng, T. Duong, X. Zhou, H. Shen, Y. Wu, H. K. Mulmudi, Y. Wan, D. Zhong, J. Li, and T. Tsuzuki, "Efficient indium-doped TiOx electron transport layers for high-performance perovskite solar cells and perovskite-silicon tandems," *Advanced Energy Materials*, 7, 1601768, 2017.

[13] H. Tan, A. Jain, O. Voznyy, X. Lan, F. P. G. De Arquer, J. Z. Fan, R. Quintero-Bermudez, M. Yuan, B. Zhang, and Y. Zhao, "Efficient and stable solution-processed planar perovskite solar cells via contact passivation," *Science*, 355, 722-726, 2017.

[14] Y. Miao, P. Du, Z. Wang, Q. Chen, and M. Eslamian, "Ultrasonic vibration imposed on nanoparticle-based ZnO film improves the performance of the ensuing perovskite solar cell," *Materials Research Express*, 5, 026404, 2018.

[15] W. S. Yang, B.-W. Park, E. H. Jung, N. J. Jeon, Y. C. Kim, D. U. Lee, S. S. Shin, J. Seo, E. K. Kim, and J. H. Noh, "Iodide management in formamidinium-lead-halide-based perovskite layers for efficient solar cells," *Science*, 356, 1376-1379, 2017.

[16] L. Chen, H. Cao, S. Wang, Y. Luo, T. Tao, J. Sun, and M. Zhang, "Efficient air-stable perovskite solar cells with a (FAI)<sub>0.46</sub>(MAI)<sub>0.40</sub>(MABr)<sub>0.14</sub>(PbI<sub>2</sub>)<sub>0.86</sub>(PbBr<sub>2</sub>)<sub>0.14</sub> active layer fabricated via a vacuum flash-

بستر  $\text{TiO}_2$  - mP اصلاح شده با نسبت حجمی ۴٪ از افزودنی پلی‌آنیلین، بهترین مورفولوژی، بلورینگی و عملکرد را نشان می‌دهد. بنابراین، طبق نتایج، افزودن نسبت حجمی ۴٪ از پلی‌آنیلین به‌عنوان نسبت افزودنی بهینه پیشنهاد می‌شود.

## مراجع

[1] S. Moghadamzadeh, I. M. Hossain, M. Jakoby, B. A. Nejjand, D. Rueda-Delgado, J. A. Schwenzler, S. Gharibzadeh, T. Abzieher, M. R. Khan and A. A. Haghighirad, "Spontaneous enhancement of the stable power conversion efficiency in perovskite solar cells," *Journal of Materials Chemistry A*, 8, 670-682, 2020.

[2] L. Zhou, Z. Lin, Z. Ning, T. Li, X. Guo, J. Ma, J. Su, C. Zhang, J. Zhang and S. Liu, "Highly efficient and stable planar perovskite solar cells with modulated diffusion passivation toward high power conversion efficiency and ultrahigh fill factor," *Solar RRL*, 3, 1900293, 2019.

[3] J.-P. Correa-Baena, A. Abate, M. Saliba, W. Tress, T. J. Jacobsson, M. Grätzel, and A. Hagfeldt, "The rapid evolution of highly efficient perovskite solar cells," *Energy & Environmental Science*, 10, 710-727, 2017.

[4] Z. Safari, M. B. Zarandi, and M. R. Nateghi, "Improved environmental stability of HTM free perovskite solar cells by a modified deposition route," *Chemical Papers*, 73, 2667-2678, 2019.

[5] F. Sahli, J. Werner, B. A. Kamino, M. Bräuninger, R. Monnard, B. Paviet-Salomon, L. Barraud, L. Ding, J. J. D. Leon and D. Sacchetto, "Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency," *Nature materials*, 17, 820-826, 2018.

[6] M. Kim, I. w. Choi, S. J. Choi, J. W. Song, S.-I. Mo, J.-H. An, Y. Jo, S. Ahn, S. K. Ahn and G.-H. Kim, "Enhanced electrical properties of Li-salts doped mesoporous TiO<sub>2</sub> in perovskite solar cells," *Joule*, 5, 659-672, 2021.

[7] X. Liu, J. Jiang, F. Wang, Y. Xiao, I. D. Sharp and Y. Li, "High photovoltage inverted planar heterojunction perovskite solar cells with all-inorganic selective contact layers," *ACS applied materials & interfaces*, 11, 46894-46901, 2019.

[8] H. Mohseni, M. Dehghanipour, N. Dehghan, F. Tamaddon, M. Ahmadi, M. Sabet, and



- cells via Nb/Ta-doped TiO<sub>2</sub> mesoporous layers " *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 9038-9044, 2019.
- [26] M. Afzali, A. Mostafavi and T. Shamspur, M. Afzali, A. Mostafavi and T. Shamspur, *Organic Electronics*, 2020, **86**, 105907. "Performance enhancement of perovskite solar cells by rhenium doping in nano-TiO<sub>2</sub> compact layer," *Organic Electronics*, 86, 105907, 2020.
- [27] A. Baktash, O. Amiri and M. Saadat, "High efficient perovskite solar cells base on niobium doped TiO<sub>2</sub> as a buffer layer," *Journal of Nanostructures*, 10, 119-127, 2020.
- [28] F. Biccari, F. Gabelloni, E. Burzi, M. Gurioli, S. Pescetelli, A. Agresti, A. E. Del Rio Castillo, A. Ansaldo, E. Kymakis, and F. Bonaccorso, "Graphene- based electron transport layers in perovskite solar cells: a step- up for an efficient carrier collection," *Advanced Energy Materials*, 7, 1701349, 2017.
- [29] G. S. Han, Y. H. Song, Y. U. Jin, J.-W. Lee, N.-G. Park, B. K. Kang, J.-K. Lee, I. S. Cho, D. H. Yoon, and H. S. Jung, "Reduced graphene oxide/mesoporous TiO<sub>2</sub> nanocomposite based perovskite solar cells," *ACS applied materials & interfaces*, 7, 23521-23526, 2015.
- [30] F. Giordano, A. Abate, J. P. C. Baena, M. Saliba, T. Matsui, S. H. Im, S. M. Zakeeruddin, M. K. Nazeeruddin, A. Hagfeldt, and M. Graetzel, "Enhanced electronic properties in mesoporous TiO<sub>2</sub> via lithium doping for high-efficiency perovskite solar cells," *Nature communications*, 7, 1-6, 2016.
- [31] X. Yin, Y. Guo, Z. Xue, P. Xu, M. He, and B. Liu, "Performance enhancement of perovskite-sensitized mesoscopic solar cells using Nb-doped TiO<sub>2</sub> compact layer," *Nano Research*, 8, 1997-2003, 2015.
- [32] S. Sidhik, A. Cerdan Pasaran, D. Esparza, T. Lopez Luke, R. Carriles, and E. De la Rosa, "Improving the optoelectronic properties of mesoporous TiO<sub>2</sub> by cobalt doping for high-performance hysteresis-free perovskite solar cells," *ACS applied materials & interfaces*, 10, 3571-3580, 2018.
- [33] J. H. Heo, M. S. You, M. H. Chang, W. Yin, T. K. Ahn, S.-J. Lee, S.-J. Sung, D. H. Kim, and S. H. Im, "Hysteresis-less mesoscopic CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> perovskite hybrid solar cells by assisted method under RH> 50%," *RSC advances*, 2019.
- [17] M. Zhang, W. Zhou, W. Hu, B. Li, Q. Qiao and S. Yang, "Modifying mesoporous TiO<sub>2</sub> by ammonium sulfonate boosts performance of perovskite solar cells," *ACS applied materials & interfaces*, 12, 12696-12705, 2020.
- [18] W. Ye, J. Xiang, F. Huang, and D. Zhong, "Towards large-area perovskite solar cells: the influence of compact and mesoporous TiO<sub>2</sub> electron transport layers," *Materials Research Express*, 5, 085506, 2018.
- [19] R. D. Chavan, P. Yadav, A. Nimbalkar, S. P. Bhoite, P. N. Bhosale, and C. K. Hong, "Ruthenium doped mesoporous titanium dioxide for highly efficient, hysteresis-free and stable perovskite solar cells," *Solar Energy*, 186, 156-165, 2019.
- [20] M. Yu, H. Sun, X. Huang, Y. Yan and W. Zhang, "In situ-formed and low-temperature-deposited Nb:TiO<sub>2</sub> compact-mesoporous layer for hysteresis-less perovskite solar cells with high performance," *Nanoscale research letters*, 15, 1-8, 2020.
- [21] Y. Tamaki, K. Hara, R. Katoh, M. Tachiya, and A. Furube, "Femtosecond visible-to-IR spectroscopy of TiO<sub>2</sub> nanocrystalline films: elucidation of the electron mobility before deep trapping," *The Journal of Physical Chemistry C*, 113, 11741-11746, 2009.
- [22] Q. Zhang, V. n. Celorrio, K. Bradley, F. Eisner, D. Cherns, W. Yan, and D. J. Fermín, "Density of deep trap states in oriented TiO<sub>2</sub> nanotube arrays," *The Journal of Physical Chemistry C*, 118, 18207-18213, 2014.
- [23] S. K. Pathak, A. Abate, P. Ruckdeschel, B. Roose, K. C. Gödel, Y. Vaynzof, A. Santhala, S. I. Watanabe, D. J. Hollman, and N. Noel, "Performance and stability enhancement of dye- sensitized and perovskite solar cells by Al doping of TiO<sub>2</sub>," *Advanced Functional Materials*, 24, 6046-6055, 2014.
- [24] B. Roose, K. C. Gödel, S. Pathak, A. Sadhanala, J. P. C. Baena, B. D. Wilts, H. J. Snaith, U. Wiesner, M. Grätzel, and U. Steiner, "Enhanced efficiency and stability of perovskite solar cells through Nd- doping of mesostructured TiO<sub>2</sub>," *Advanced Energy Materials*, 6, 1501868, 2016.
- [25] M. Li, Y. Zhao, L. Zhu, J. Song and Y. Qiang, "Performance enhancement of perovskite solar

"Achieving high-performance planar perovskite solar cell with Nb-doped TiO<sub>2</sub> compact layer by enhanced electron injection and efficient charge extraction," *Journal of Materials Chemistry A*, 4, 5647-5653, 2016.

introduction of Li-treated TiO<sub>2</sub> electrode," *Nano Energy*, 15, 530-539, 2015.

[34] T. Umeyama, D. Matano, J. Baek, S. Gupta, S. Ito, V. Subramanian, and H. Imahori, "Boosting of the performance of perovskite solar cells through systematic introduction of reduced graphene oxide in TiO<sub>2</sub> layers," *Chemistry Letters*, 44, 1410-1412, 2015.

[35] Q. Luo, Y. Zhang, C. Liu, J. Li, N. Wang, and H. Lin, "Iodide-reduced graphene oxide with dopant-free spiro-OMeTAD for ambient stable and high-efficiency perovskite solar cells," *Journal of Materials Chemistry A*, 3, 15996-16004, 2015.

[36] A. Agresti, S. Pescetelli, A. L. Palma, A. E. Del Rio Castillo, D. Konios, G. Kakavelakis, S. Raza, L. Cinà, E. Kymakis, and F. Bonaccorso, "Graphene interface engineering for perovskite solar modules: 12.6% power conversion efficiency over 50 cm<sup>2</sup> active area," *ACS Energy Letters*, 2, 279-287, 2017.

[37] H. Zheng, X. Xu, S. Xu, G. Liu, S. Chen, X. Zhang, T. Chen, and X. Pan, "The multiple effects of polyaniline additive to improve the efficiency and stability of perovskite solar cells," *Journal of Materials Chemistry C*, 7, 4441-4448, 2019.

[38] H. Zheng, L. Zhu, L. Hu, S. Yang, S. Chen, A. Alsaedi, T. Hayat, Y. Huang, X. Pan, and S. Dai, "Promoting perovskite crystal growth to achieve highly efficient and stable solar cells by introducing acetamide as an additive," *Journal of Materials Chemistry A*, 6, 9930-9937, 2018.

[39] Z. Tang, S. Uchida, T. Bessho, T. Kinoshita, H. Wang, F. Awai, R. Jono, M. M. Maitani, J. Nakazaki, and T. Kubo, "Modulations of various alkali metal cations on organometal halide perovskites and their influence on photovoltaic performance," *Nano Energy*, 45, 184-192, 2018.

[40] H. Uratani and K. Yamashita, "Charge carrier trapping at surface defects of perovskite solar cell absorbers: a first-principles study," *The journal of physical chemistry letters*, 8, 742-746, 2017.

[41] J.-W. Lee, S.-H. Bae, N. De Marco, Y.-T. Hsieh, Z. Dai, and Y. Yang, "The role of grain boundaries in perovskite solar cells," *Materials today energy*, 7, 149-160, 2018.

[42] B.-X. Chen, H.-S. Rao, W.-G. Li, Y.-F. Xu, H.-Y. Chen, D.-B. Kuang, and C.-Y. Su,



# Enhancement of the performance of perovskite solar cells via the modification of electron transport layers with polyaniline

Z Mirbagheri Firrozazab<sup>1</sup>, M. Borhani Zarandi<sup>1</sup>, M Sharifian<sup>1</sup>, H. Amrollahi Bioki<sup>2</sup>

1-Department of Physics, Faculty of Science, Yazd University, Yazd. Iran

2-Department of Physics, Tarbiat Modares University, Tehran

**Abstract:** Among the various electron transport layers used in perovskite solar cells, titanium oxide ( $\text{TiO}_2$ ) is by far the most efficient electron transfer layer. But the high recombination of electrons and holes in the titanium oxide layer is a problem that researchers face. Researchers have tried to solve this problem by doping various additives in this layer. In this study, for modification this defect, polyaniline was added to the precursor of the titanium oxide mesoporous layer ( $\text{mP} - \text{TiO}_2$ ) to improve the performance of the perovskite methyl ammonium solar cell. Scanning electron microscopy images showed the morphology, crystallinity, and coverage of the perovskite film deposited on the  $\text{mP} - \text{TiO}_2$  substrate doped with polyaniline at volume ratios of 2%, 4%, and 8% compared with the perovskite film deposited on Pure  $\text{mP} - \text{TiO}_2$  substrate have improved. By adding polyaniline to the  $\text{mP} - \text{TiO}_2$  layer with different volume ratios, open circuit current density ( $J_{sc}$ ) and charge factor (FF) were increased. The increase in these parameters is due to the reduction of recombination at the  $\text{TiO}_2$  / perovskite interface as well as reduction of charge traps, which improve cell performance. Cells made on the modified  $\text{mP} - \text{TiO}_2$  substrate with a volume ratio of 4% polyaniline show the best morphology, crystallinity and performance (7.31%).

**Keywords:** Perovskite solar cells, electron transport layer, polyaniline, mesoporous