

بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی پروسکایتی متخلخل بدون لایه‌ی انتقال دهنده‌ی حفره با اصلاح لایه‌ی انتقال دهنده‌ی الکترون با C_{60}

ناصر دهقان^۱، عباس بهجت*^۲، حمید رضا زارع^۳

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

۲. گروه پژوهشی فوتونیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد

۳. گروه شیمی تجزیه، دانشکده شیمی، دانشگاه یزد

چکیده: در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی با اصلاح لایه‌ی انتقال دهنده‌ی الکترون می‌توان انتقال الکترون را بهبود بخشید. قبلاً در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی از C_{60} به عنوان لایه‌ی انتقال دهنده‌ی الکترون به تنهایی استفاده شده است اما از چندسازه آن به عنوان لایه انتقال دهنده الکترون در سلول‌های خورشیدی استفاده نشده است. در این تحقیق از کامپوزیت فولرن و تیتانیوم دی اکسید ($TiO_2 + C_{60}$) به عنوان لایه‌ی انتقال دهنده‌ی الکترون در سلول خورشیدی پروسکایتی بدون لایه‌ی انتقال دهنده‌ی حفره استفاده شده است. نتایج حاکی از این است که هر چند جذب با لایه جاذب سلول کاهش یافته است، اما نمودارهای الگوی پراش ایکس و فوتولومینسانس نشان می‌دهند بلورینگی پروسکایت بیشتر شده است که به دنبال آن انتقال بهتر الکترون‌ها را به همراه دارد. افزون-براین سطح لایه‌ی انتقال دهنده‌ی الکترون اصلاح شده است که این امر خود باعث بهبود در عملکرد سلول خورشیدی می‌شود. در این بررسی بازده سلول‌های خورشیدی پروسکایتی ساخته شده بدون انتقال دهنده حفره از ۸/۰۸ به ۹/۰۹ رسیده است.

واژگان کلیدی: سلول خورشیدی پروسکایتی، لایه‌ی انتقال دهنده الکترون، کامپوزیت $TiO_2 + C_{60}$

*abehjat@yazd.ac.ir

دارای توان بالقوه بزرگ برای تبدیل‌شدن به یک فناوری فتوولتائیک است.

سلول‌های خورشیدی پروسکایتی بدلیل خواص فیزیکی و الکترونیکی (طول پخش زیاد حامل‌ها، خاصیت بسیار خوب انتقال حامل‌های بار، امکان آماده‌سازی در دمای پایین، جذب نوری بالا، هزینه‌ی کم و ساخت آسان) خاصی که دارند در سال-های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱، ۲].

در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی نقش اصلی لایه‌ی انتقال دهنده‌ی الکترون، ایجاد تماس انتخابی الکترون با لایه جاذب نور، برای بهبود کارایی استخراج الکترون‌های تولید شده توسط نور و جلوگیری از مهاجرت حفره به الکترون مقابل به منظور افزایش حامل بار است. از این‌رو، یکی از قسمت‌های مهم در ساخت

۱- مقدمه

مصرف انرژی جهانی به دلیل صنعتی‌شدن سریع، شهرنشینی همراه با افزایش جمعیت، به طور مداوم در حال افزایش است. لذا منابع ارزان قیمت، تمیز و تجدیدپذیر انرژی برای بشریت با کاهش سوخت‌های فسیلی مورد نیاز است. فناوری فتوولتائیک وسیله‌ای عالی برای کاهش این مشکل است. تا قبل از به میدان آمدن سلول‌های خورشیدی پروسکایتی، دستگاه‌های فتوولتائیک آلی-معدنی با بازده بالا، کم هزینه و تولید در مقیاس بزرگ در دسترس نبودند. خوشبختانه، سلول‌های خورشیدی پروسکایتی یک تازه وارد بسیار کارآمد به خانواده سلول‌های خورشیدی،

پایین و حالت‌های تله‌ی الکترونی زیاد تاثیر منفی روی عملکرد سلول خورشیدی دارد. خواص الکتریکی و اپتیکی TiO_2 را می‌توان با روش‌های مختلف بهینه کرد، یکی از این راه‌ها ساخت چندسازه است. فولرن (C_{60}) بعنوان نیمه‌هادی نوع n دارای تحرک پذیری زیاد و طول عمر بالای حامل بار است که این موضوع باعث شده تا از این ماده در ساخت چندسازه ک استفاده شود [۱۰-۱۴].

از سال ۲۰۱۵ میلادی تاکنون، کارهای زیادی با استفاده از C_{60} به عنوان انتقال‌دهنده‌ی الکترون انجام شده است که بطور خلاصه در جدول زیر آورده شده است [۱۶]. لازم به ذکر است که در جدول زیر لایه‌ی انتقال‌دهنده‌ی حفره نیز استفاده شده است. ولی در این پژوهش این لایه استفاده نشده است.

جدول ۱: خلاصه‌ی از ساخت سلول خورشیدی با استفاده از فولرن به عنوان ETL در سلول خورشیدی [۱۶]

	FTO/ C_{60} /MAPbI ₃ /Spiro-OMeTAD/Ag	FTO/ C_{60} /MAPbI ₃ /Spiro-OMeTAD/Au	FTO/ C_{60} /MAPbI ₃ /Spiro-OMeTAD/Au	FTO/ C_{60} /MAPbI ₃ /Spiro-OMeTAD/Ag
V_{oc} (V)	1.04	1.08	0.99	1.04
J_{sc} (mA/cm ²)	19.93	18.88	15.4	19.1
FF	41.2	74.51	75	72.5
PCE	8.54	15.14	11.4	14.4

در این مقاله، با ساخت چندسازه $\text{TiO}_2/\text{C}_{60}$ به عنوان لایه‌ی انتقال دهنده الکترون، برای اولین بار این چندسازه در ساخت سلول‌های خورشیدی پروسکایتی با ساختار کلی $\text{FTO}/\text{cTiO}_2/\text{ETL}/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{Au}$ استفاده شد. سپس تاثیر به کارگیری آن در سلول بر روی پارامترهای سلول خورشیدی بررسی شد.

سلول‌های خورشیدی پروسکایتی لایه‌ی انتقال‌دهنده‌ی الکترون (ETL) است [۳]. با تابش نور به سلول جداسازی موثر حامل‌های تولید شده در لایه‌ی جاذب نور و انتقال آنها به لایه انتقال حامل‌ها پیش از باز ترکیب بسیار مهم است. لایه انتقال‌دهنده الکترون با تاثیرگذاری بر فرایند استخراج، حمل و نقل و بازترکیب حامل بار، بر عملکرد فتوولتائیک سلول‌های خورشیدی پروسکایتی تاثیر می‌گذارد. افزون بر این ساختار بلورین و خواص الکتریکی لایه، همچنین، نقص‌های موجود در فصل مشترک و آرایش تراز انرژی، تاثیر قابل توجهی بر عملکرد سلول ساخته‌شده نهایی دارد. بهبود تماس بین این لایه و الکتروود و اصلاح فصل مشترک بین این لایه و لایه پروسکایت نیز ضروری است.

معیارهایی برای انتخاب ETL وجود دارد که عبارتند از [۳-۹]:

- شفافیت اپتیکی خوب در ناحیه‌ی مرئی برای جمع‌آوری نور.
- تطابق تراز انرژی این لایه با لایه جاذب از یک طرف و با الکتروود از طرف دیگر به منظور انتقال بهتر الکترون و جلوگیری از بازترکیب.
- تحرک پذیری بالا به منظور انتقال بهتر حامل‌های بار و جمع‌آوری آنها.
- غیر فعال کردن نواحی تله‌ی سطحی، نواحی تله در سطح پروسکایت و مرز دانه‌ها که می‌توانند منجر به باز-ترکیب حامل‌ها شوند.
- ایجاد تماس سطحی خوب با سطح پروسکایت: نشان داده شده است که لایه زیرین پروسکایت تاثیر زیادی بر جهت‌گیری بلور پروسکایت، اندازه دانه و نقص دارد.
- پایداری شیمیایی مناسب و سازگاری شیمیایی با مواد پروسکایت.

تیتانیم دی اکسید (TiO_2) به دلیل سرعت تزریق سریع الکترون از پروسکایت به TiO_2 ، ساخت آسان، غیرسمی بودن و پایداری شیمیایی، رایج ترین لایه انتقال‌دهنده الکترون (ETL) مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی (PSC^2) است. اما TiO_2 بدلیل تحرک پذیری الکترون کم، رسانایی الکتریکی

۲- روش تهیه‌ی مواد

¹ Electron transport layer

² Perovskite solar cells

۲-۱- تهیه چندسازه TiO_2/C_{60} و محلول مزوپروس آن

برای تهیهی چندسازه TiO_2/C_{60} با استفاده از پودر TiO_2 (100 mg) و C_{60} (5 mg) از روش بیان شده در مقاله [۱۶] استفاده شده است. ابتدا محلول C_{60} در تولوئن آماده شد و بعد آب دوبار تقطیر اضافه کرده در آلتراسونیک قرار گرفت تا یک محلول زرد رنگ بدست آمد. محلول حاصل را در اتوکلاو ۱۰۰ میلی لیتر ریخته به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۱۸۰ درجه قرار داده و پس از سرد شدن با آب مقطر و اتانول شستشو داده شد. و سپس در آون خشک کردیم. پودر حاصل را در تولوئن حل کرده و اتیل سلولز و تریپینول به آن افزوده و سپس، محلول را همزده شد.

برای تهیهی متیل آمونیم یدید (CH_3NH_3I) و سرب یدید (PbI_2) از روش بیان شده در مقاله [۱۳] استفاده شده است. محلول پروسکایت حاوی ۴۶۱ میلی گرم سرب یدید (PbI_2)، ۱۵۹ میلی گرم متیل آمونیم یدید (MAI) در ۶۳۵ میکرولیتر DMF و ۷۱ میکرولیتر DMSO تهیه شد. محلول به مدت ۴۰ دقیقه همزده شد.

۳- روش ساخت سلول

شیشهی پوشش داده شده FTO^3 با حکاکی کردن با اسید هیدروکلریک و پودر روی الگوبرداری شدند و به طور متوالی با آب و صابون، آب مقطر، استون، اتانول و ایزوپروپانول به مدت ۱۵ دقیقه تمیز شدند. یک لایه از $cTiO_2^4$ به روش لایه نشانی چرخشی با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۶۰ ثانیه لایه-نشانی شد. تمام نمونه‌ها روی هیتر در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۰ دقیقه حرارت داده شدند و سپس در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه پخت داده شدند. $mTiO_2$ خالص به عنوان لایه انتقال‌دهنده الکترون مرجع و $mTiO_2$ دوپ شده با C_{60} به عنوان لایه انتقال‌دهنده دوم با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۶۰ ثانیه لایه‌نشانی و سپس، در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه پخت داده شدند. این دو را زیر لایه-های اول (ETL1) و دوم (ETL2) نام‌گذاری کردیم.

³ Fluorine doped tin oxide

⁴ Compact TiO_2

پروسکایت $CH_3NH_3PbI_3$ با استفاده از روش لایه‌نشانی چرخشی یک مرحله‌ای با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۳۰ ثانیه در هوای آزاد لایه‌نشانی شد. سپس کلروبنزن به عنوان ضدحلال در ثانیه‌ی ۲۵ام روی پروسکایت ریخته شد. سپس، نمونه‌ها در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه پخت داده شدند. در نهایت الکتروود طلا به روش کندوپاش لایه‌نشانی شد. تمام سلول‌ها در محفظه‌ای خشک در تاریکی نگهداری شدند. مشخصه‌یابی سلول‌های ساخته‌شده در دمای اتاق و رطوبت ۲۰ تا ۳۵ درصد انجام گرفت.

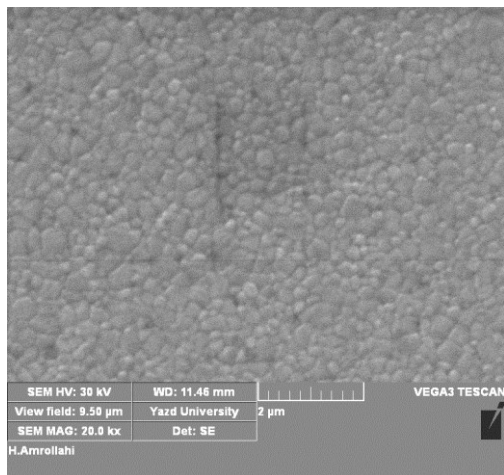
۴- دستگاه‌های اندازه‌گیری

خواص بلورشناسی لایه‌های پروسکایت با طیف‌سنج پراش پرتو ایکس (Bruker, D8 advance) ثبت شد. طیف جذب با طیف‌سنجی فرابنفش مرئی (Analytic Jena, Specord 250) در گستره طول موج ۲۰۰-۱۱۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری طیف فوتولومینسانس فیلم پروسکایت، از دستگاه Teifsanj, FLAR-2015 استفاده شد. برای اندازه‌گیری‌های جریان نوری-ولتاژ از دستگاه Keithley 2400 و شبیه‌ساز خورشیدی تحت استاندارد 1.5AM با توان ۱۰۰ میلی وات برسانتی مترمربع استفاده شد.

۵- نتایج و بحث

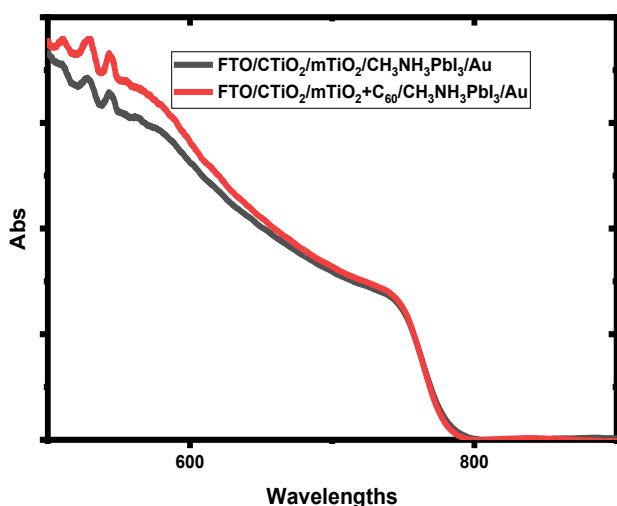
۵-۱- الگوی پراش ایکس

شکل ۱، الگوهای XRD پروسکایت رشد داده شده روی دو نوع زیرلایه را نشان می‌دهد. این دو نمونه ساختار بلورین مشابهی دارند. پیک‌های پراش پرتو ایکس ساختار بلورین تتراگونال را برای پروسکایت نشان می‌دهد که با نتایج گزارش شده مطابقت دارد. شدت بیشتر و پهنای کمتر قله‌ها برای پروسکایت رشد یافته در ETL2 نشان‌دهنده بلورینگی بهتر و همچنین، اندازه ذرات پروسکایت بزرگ‌تر است که برای اصلاح لایه‌های پروسکایت بدون حفره‌ها مفید است. این به این دلیل است که انتقال بار شتاب می‌گیرد و باز ترکیب الکترون-حفره کاهش می‌یابد.



شکل ۳: تصویر SEM پروسکایت لایه‌نشانی شده روی زیر لایه‌ی ETL2

۳-۵- تجزیه و تحلیل طیف فوتولومینسانس



شکل ۵: طیف جذب دو نمونه سلول خورشیدی با زیر لایه‌های متفاوت

شکل ۴، طیف فوتولومینسانس هر دو نمونه سلول خورشیدی را نشان می‌دهد. چنانکه مشاهده می‌شود در نمونه‌ی ساخته شده با زیر لایه ETL2 شدت طیف PL دارای کاهش می‌باشد. این کاهش شدت نشان‌دهنده‌ی اصلاح خواص کریستالی پروسکایت است که خود باعث انتقال بهتر الکترون و جلوگیری از بازترکیب الکترون حفره و در نتیجه باعث بهبود عملکرد سلول خورشیدی می‌شود [۱۲]. قله PL در طول موج ۷۷۶/۷ نانومتر است که خیلی به لبه‌ی جذب در شکل ۳ نزدیک است.

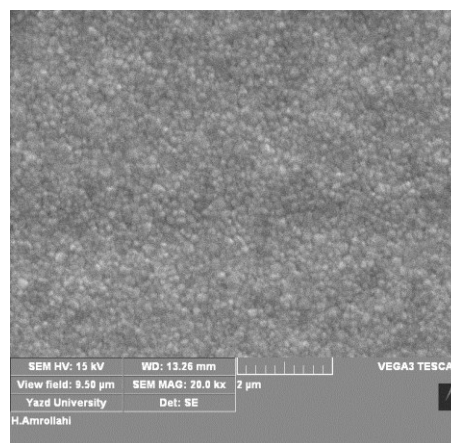
وجود پیک PbI_2 را می‌توان به واکنش ناقص PbI_2 با $CH_3NH_3I_3$ یا تخریب پروسکایت با هوا در طول فرایند لایه‌نشانی و زیر لایه نسبت داد [۱۲]. مقدار PbI_2 باقیمانده را می‌توان با استفاده از فرمول زیر محاسبه کرد [۱۱]:

$$C_{PbI_2} (\%) = \frac{I_{PbI_2}}{I_{PbI_2} + I_{Perovskite}} \times 100$$

در این فرمول، I مساحت قله مربوط به PbI_2 و قله با شاخص میلر (۱۱۰) است. این مقدار برای نمونه با ETL1، ۱۲٪ و برای نمونه با ETL2، ۰.۶٪ محاسبه شد. این تفاوت را می‌توان به تاثیر زیر لایه نسبت داد.

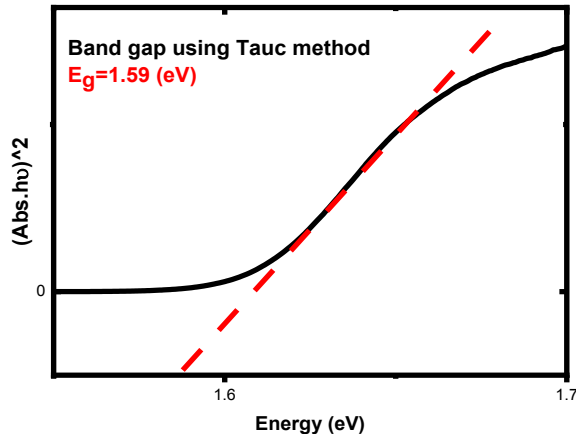
۲-۵- تجزیه و تحلیل تصاویر میکروسکوپ روبشی (SEM)

شکل‌های ۲ و ۳، تصاویر حاصل از میکروسکوپ روبشی (SEM) را نشان می‌دهد. بطور وضوح افزایش سایز ذرات هنگامی که نمونه با زیر لایه ETL2 ساخته شده دیده می‌شود که با نتیجه‌ی حاصل از الگوی پراش ایکس موافقت دارد



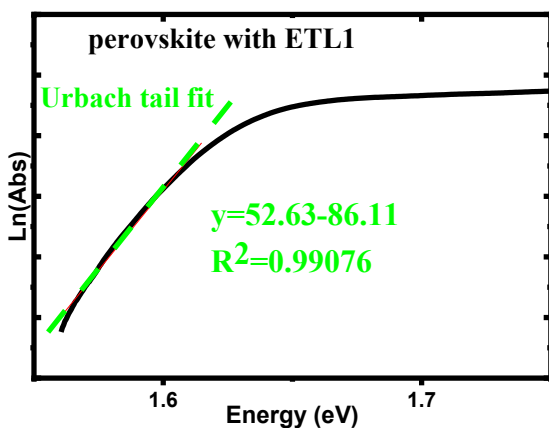
شکل ۲: تصویر SEM پروسکایت لایه‌نشانی شده بر روی زیر لایه‌ی ETL1

در شکل ۶ با استفاده از طیف جذب نمودار Tauc رسم شده [۱۸] و گاف انرژی پروسکایت بدست آمده (۱/۵۹ eV) معادل با طول موج ۷۷۹/۹ نانومتر) که با مقادیر گزارش شده تئوری (۱/۵۵) همخوانی دارد [۱].

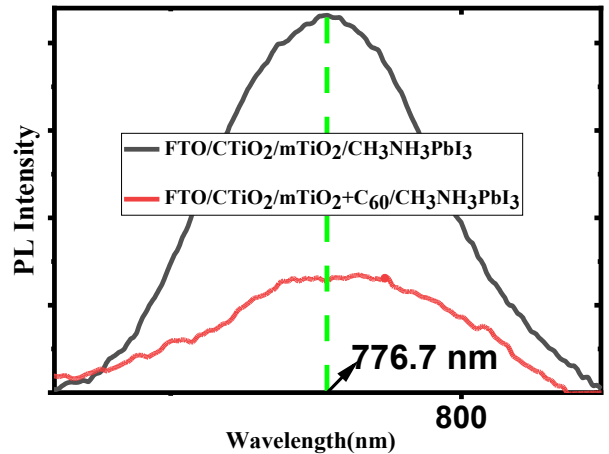


شکل ۶: نمودار Tauc با استفاده از طیف جذب

معکوس شیب نمودار $\ln(Abs)$ بر حسب انرژی در نزدیکی گاف انرژی، معیاری از انرژی اروباخ است. چنانچه در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود این شیب برای پروسکایت که روی زیرلایه ETL2 لایه‌نشانی شده است کمتر است. انرژی اروباخ کمتر نشان‌دهنده‌ی نقص کمتر و در نتیجه باز ترکیب کمتر می‌شود. این خود باعث جمع‌آوری جریان نوری بیشتر و بهبود عملکرد سلول خورشیدی می‌شود [۶].

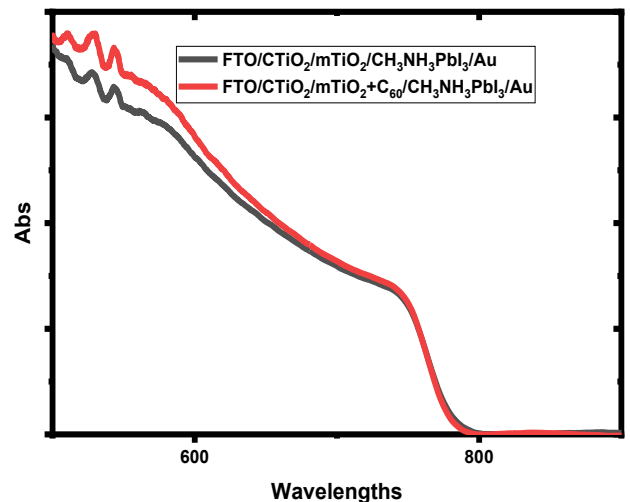


شکل ۷: نمودار اروباخ پروسکایت با انتقال دهنده‌ی الکترون ETL1



شکل ۴: طیف PL دو نمونه پروسکایت رشد داده شده بر روی دو زیرلایه ETL1 و ETL2

۴-۵- تجزیه و تحلیل طیف جذب



شکل ۵: طیف جذب دو نمونه سلول خورشیدی با زیرلایه‌های متفاوت

شکل ۵، طیف جذب هر دو نمونه سلول خورشیدی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ناحیه مرئی افزایش جذب وجود دارد که این امر بدلیل حضور C_{60} در نمونه هست نه جذب بیشتر در لایه‌ی پروسکایت [۱۷]. هر چند جذب خالص با لایه‌ی پروسکایت به عنوان لایه‌ی تولیدکننده الکترون و حفره کاهش یافته است. اما عملکرد سلول بهتر شده است و پس می‌توان گفت عملکرد بهتر سلول بدلیل انتقال بهتر الکترون‌ها است.

۵-۵- نمودار چگالی جریان - ولتاژ

جدول ۲: پارامترهای فوتوولتاییک سلولهای خورشیدی ساخته شده با زیرلایه ETL1. مقادیر میانگین برای ۵ سلول است.

	ETL1 (MTiO ₂)	
	میانگین	بهترین از نظر بازده
V_{oc} (V)	0.88±0.03	0.91
J_{cs} (mA/cm²)	14.81±0.36	14.69
FF	0.62±0.03	0.60
PCE	8.02±0.05	8.08

جدول ۳: پارامترهای فوتوولتاییک سلولهای خورشیدی ساخته شده با زیرلایه ETL2. مقادیر میانگین برای ۵ سلول است.

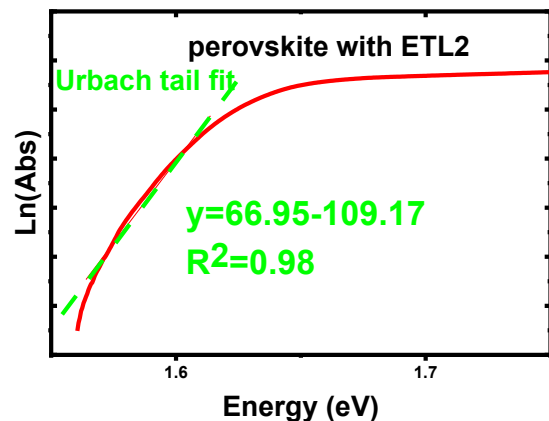
	ETL2 (MTiO ₂ +C ₆₀)	
	میانگین	بهترین از نظر بازده
V_{oc} (V)	0.9±0.034	0.94
J_{cs} (mA/cm²)	15.32±0.315	15.6
FF	0.65±0.025	0.62
PCE	9±0.071	9.09

با توجه به جدولهای ۲ و ۳، بهبود بازده و چگالی جریان سلول خورشیدی با زیر لایه دوم را می‌توان به دانه‌های پروسکایت بزرگ با نقص‌های کمتر، پراکندگی کمتر مرز دانه‌ها و بلورینگی بهتر پروسکایت، نسبت داد. وجود دانه‌های درشت ممکن است باعث بهبود بازده استخراج بار شود و به طور قابل توجهی از اتلاف باز ترکیب بار در مرز دانه جلوگیری کند.

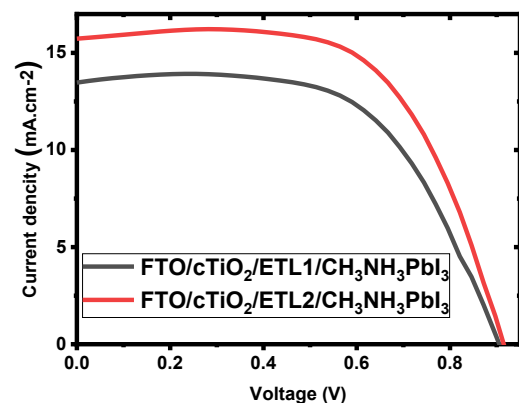
۴- نتیجه گیری

با توجه به داده‌های به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت با اصلاح لایه‌ی انتقال دهنده‌ی الکترون TiO₂ با C₆₀ می‌توان بلورینگی و نقص‌های لایه پروسکایت را کاهش داد. این موضوع خود باعث کاهش باز ترکیب و افزایش سرعت انتقال الکترون می‌شود و در نتیجه عملکرد سلول خورشیدی بهتر می‌شود.

شکل ۹، نمودار چگالی جریان بر حسب ولتاژ را برای دو نمونه از سلول خورشیدی را نشان می‌دهد. چگالی جریان اتصال کوتاه (J_{sc})، ولتاژ مدار باز (V_{oc})، فاکتور گنجایش (FF) و بازده تبدیل توان (PCE) هر دو نمونه سلول ساخته شده، در جدول‌های ۲ و ۳ خلاصه شده است. برای سلول خورشیدی با لایه‌ی انتقال دهنده‌ی الکترون ETL1 با بیشترین بازده مقادیر $J_{sc} = 14.69 (mA.cm^{-2})$ ، $V_{oc} = 0.91(V)$ ، $FF = 0.60$ و $PCE = 8.0\%$ برای سلول خورشیدی با لایه‌ی انتقال دهنده‌ی الکترون ETL2 با بیشترین بازده مقادیر، $J_{sc} = 15.6 (mA.cm^{-2})$ ، $V_{oc} = 0.94(V)$ ، $FF = 0.65$ و $PCE = 9.0\%$ بدست آمده است.



شکل ۸: نمودار اروباخ پروسکایت با انتقال دهنده‌ی الکترون ETL2



شکل ۹: نمودارهای چگالی جریان - ولتاژ

properties of pin perovskite solar cells,” APL MATERIALS, 5, 076102, 2017.

[10] A. Peter Amalathas, L. Landová, B. Conrad and J. Holovský, “Concentration-Dependent Impact of Alkali Li Metal Doped Mesoporous TiO₂ Electron Transport Layer on the Performance of CH₃NH₃PbI₃ Perovskite Solar Cells,” J. Phys. Chem. C, 123, 19376-19384, 2019.

[12] A. Saleem, N. Ullah, K. Khursheed, T. Iqbal, S. A. Shah, M. Asjad, N. Sarwar, M. Saleem and M. J. J. o. E. M. Arshad, “Graphene oxide–TiO₂ nanocomposite films for electron transport applications,” Journal of Electronic Materials, 47, 3749-3756, 2018.

[13] N. Dehghan, A. Behjat, H. Zare, H. Mohseni and M. J. O. M. Dehghanipour, “Modification of electron-transport layers with mixed RGO/C₆₀ additive to boost the performance and stability of perovskite solar cells: A comparative study,” Optical Materials, 119, 111313, 2021.

[14] S. K. Pathak, A. Abate, P. Ruckdeschel, B. Roose, K. C. Gödel, Y. Vaynzof, A. Santhala, S. I. Watanabe, D. J. Hollman and N. J. A. F. M. Noel, “Performance and stability enhancement of dye-sensitized and perovskite solar cells by Al doping of TiO₂,” Adv. Funct. Mater., 24, 6046-6055, 2014.

[15] A. Peter Amalathas, L. Landová, B. Conrad and J. J. T. J. o. P. C. C. Holovský, “Concentration-dependent impact of alkali Li metal doped mesoporous TiO₂ electron transport layer on the performance of CH₃NH₃PbI₃ perovskite solar cells,” J. Phys. Chem. C, 123, 19376-19384, 2019.

[16] C. Xu, Y. Zhang, P. Luo, J. Sun, H. Wang, Y.-W. Lu, F. Ding, C. Zhang and J. J. A. A. E. M. Hu, “Comparative Study on TiO₂ and C₆₀ Electron Transport Layers for Efficient Perovskite Solar Cells,” ACS Appl. Energy Mater., 4, 5543-5553, 2021.

[1] H. Peng, C. Lan, S. Chen, P. Fan, G. Liang, H. J. S. Lan and C. Technology, “N, N - dimethylformamide vapor effect on microstructural and optical properties of CH₃NH₃PbI₃ film during solvent annealing,” 359, 162-168, 2019.

[2] C. Ji, C. Liang, H. Zhang, M. Sun, F. Sun, Q. Song, X. Zhang, D. Li, F. You and Z. J. O. E. He, “C₆₀-assisted crystal engineering for perovskite solar cells with enhanced efficiency and stability,” Organic Electronics, 63, 276-282, 2018.

[3] G. Yang, H. Tao, P. Qin, W. Ke and G. J. J. o. M. C. A. Fang, “Recent progress in electron transport layers for efficient perovskite solar cells,” Journal of Materials Chemistry A, 4, 3970-3990, 2016.

[4] D. Zhou, T. Zhou, Y. Tian, X. Zhu and Y. J. J. o. N. Tu, “Perovskite-based solar cells: materials, methods, and future perspectives,” Journal of Nanomaterials, 2018, 8148072-8148087, 2018.

[5] T. Chen, J. Xie, P. J. A. E. Gao and S. Research, “Ultraviolet Photocatalytic Degradation of Perovskite Solar Cells: Progress, Challenges, and Strategies,” Adv. Energy Sustainability Res., 3, 2100218-2100239, 2022.

[6] N.-G. Park, T. Miyasaka and M. J. C. Grätzel, Switzerland :Springer, “Organic-inorganic halide perovskite photovoltaics,” Springer International Publishing Switzerland, 2016.

[7] E. Nouri, M. R. Mohammadi and P. J. C. C. Lianos, “Inverted perovskite solar cells based on lithium-functionalized graphene oxide as an electron-transporting layer,” Chem. Commun., 53, 1630-1633, 2017.

[8] S. Shao and M. A. J. A. M. I. Loi, “The role of the interfaces in perovskite solar cells,” Adv. Mater. Interfaces, 7, 1901469-1901500, 2020.

[9] F. Galatopoulos, A. Savva, I. T. Papadas and S. A. J. A. M. Choulis, “The effect of hole transporting layer in charge accumulation

[17] T. Gakhar, Y. Rosenwaks and A. HAZRA, "Fullerene (C₆₀) Functionalized TiO₂ Nanotubes for Enhanced Sensing of Formaldehyde", Sensors and Actuators B, 364, 131892.2022.

[18] K.-i. Katsumata, N. Matsushita and K. J. I. J. o .P. Okada, "Preparation of TiO₂-fullerene composites and their photocatalytic activity under visible light," International Journal of Photoenergy, 2012, 256096-256106, 2012.

[19] H. Zheng, W. Wu, H. Xu, F. Zheng, G. Liu, X. Pan and Q. J. A. F. M. Chen, "Self-Additive Low-Dimensional Ruddlesden–Popper Perovskite by the Incorporation of Glycine Hydrochloride for High-Performance and Stable Solar Cells," Adv. Funct. Mater. 30, 2000034-2000044, 2020.



Improved performance of hole-transport-free porous perovskite solar cells by modifying the electron transporting layer using C₆₀

N.Dehgan^{1,2}, A. Behjat^{1,2,*}, H.R. Zare^{2,3}

1. Atomic and Molecular Department, Faculty of Physics, Yazd University, Yazd

2. Photonics Research Group, Faculty of Physics, Yazd University, Yazd

3. Department of Analytical Chemistry, Faculty of Chemistry, Yazd University

Abstract: In perovskite solar cells, electron transfer can be improved by modifying the electron transporting layer. Previously, in perovskite solar cells, only C₆₀ has been used as the electron transfer layer, but not its composite. In this research, the composite of TiO₂ and C₆₀ was used as an electron transporting layer in hole-transport-free perovskite solar cells. The results indicate that despite the decrease in absorption by the absorbent layer of the cell, the pattern of X-ray diffraction and photoluminescence show increase in crystallinity of perovskite layer. This results in better electron transfer. In addition, the surface of the electron transporting layer has been modified, which improves the performance of the solar cell. The efficiency of the fabricated perovskite solar cells was increased from 8.08 to 9.09.

Keywords: Perovskite solar cells, Electron transporting layer, TiO₂+C₆₀ Composite