بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین
کنفرانس مهندسی و فناوری
فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰

بررسی اثر فنیل‌تری‌متیل‌آمونیوم یدید بر مشخصه‌های فوتوولتایی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی بدون انتقال‌دهنده حفره

مهناز مظفری، عباس بهجت*، محمدعلی حداد و علی بنویدی

دانشکده فیزیک دانشگاه یزد، صفائیه، بلوار دانشگاه، یزد، صندوق پستی:۷۴۱-۸۹۱۹۵

and abenvidi@yazd.ac.ir ,mahaddad@yazd.ac.ir ,abehjat@yazd.ac.ir ,mahnaz.mozaffari@stu.yazd.ac.ir

چکیده - در این پژوهش سلول‌های خورشیدی پروسکایتی سه بعدی (D۳) و دوبعدی/سه‌بعدی (D/۳D۲) با استفاده از کاتیون جداکننده فنیل‌تری‌متیل‌آمونیوم ($C_9H_{14}N$) ساخته شدند. جهت بهینه‌سازی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی دوبعدی/سه‌بعدی، دماهای پخت مختلف ۱۰۰ °C، ۱۲۰ °C و ۱۵۰ °C برای تشکیل پروسکایت دوبعدی مورد بررسی قرار گرفت. مشخصه‌یابی فوتوولتایی سلول، از قبیل بازده تبدیل توان، ضریب پرشدگی، ولتاژ مدار باز، چگالی جریان مدار کوتاه انجام گرفت و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید تا دمای بهینه ۱۵۰ °C بدست آمد. سپس با توجه به طیف فوتولومینسانس مشاهده شد که انتقال بار در سلول خورشیدی پروسکایتی D/۳D۲ نسبت به سلول خورشیدی پروسکایتی D۳ بهتر می‌باشد که باعث بهبود عملکرد فوتوولتایی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی می‌شود.

کلید واژه- بازده تبدیل توان ، پروسکایت سه‌بعدی، پروسکایت دوبعدی/سه‌بعدی، سلول خورشیدی پروسکایتی.

Phenyltrimethylammonium iodide effects on photovoltaic properties of hole transport free perovskite solar cells

M. Mozaffari, A. Behjat*, M.A. Haddad, and A. Benvidi

Department of Physics, Yazd University, Yazd, Iran, PO Box ۸۹۱۹۵-۷۴۱
mahnaz.mozaffari@stu.yazd.ac.ir, abehjat@yazd.ac.ir, mahaddad@yazd.ac.ir, and abenvidi@yazd.ac.ir

Abstract- In this research, ۳D and ۲D/۳D perovskite solar cells fabricated through using Phenyltrimethylammonium iodide. After that, our efforts focused on further improvement in the performance of ۲D/۳D [illegible] solar cell such as the power conversion efficiency (PCE), Fill Factor (FF), Open Circuit Voltage (Voc) and Short Circuit Current (Jsc) were analyzed to obtain the optimum annealing temperature in ۱۵۰ °C. Then, according to

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]

the photoluminescence spectrum, it was observed that charge transfer in ۲D/۳D perovskite solar cells is better than ۳D perovskite solar cells, which improves the performance of perovskite solar cells.

Keywords: Power conversion efficiency, ۳D Perovskite, ۲D/۳D Perovskite, Perovskite Solar Cell.

مقدمه

در سال‌های اخیر تحقیقات در زمینه ساخت سلول‌های خورشیدی پروسکایتی به دلیل ویژگی‌های منحصر بفرد آن رشد چشم‌گیری یافته است. استفاده از پروسکایت در ساخت سلول‌های خورشیدی، اولین بار در سال ۲۰۰۹ میلادی توسط میاساکا گزارش شد. پروسکایت‌های آلی-معدنی با کاتیون‌های آلی مختلف سنتز می‌شود. این امر نشان می‌دهد که اندازه کاتیون آلی در گاف اپتیکی پروسکایت تاثیر می‌گذارد. از عوامل مؤثر در تخریب پروسکایت، رطوبت، واکنش شیمیایی، نور و دما می‌باشد[۱]. برای حل مشکل ناپایداری پروسکایت استراتژی‌های مختلفی از جمله: به کاربردن ترکیب هالیدهای مختلف. به طور مثال افزودن برم (Br) در ترکیب پروسکایت به منظور افزایش پایداری رطوبتی سلول خورشیدی [۲] ، استفاده از پروسکایت های سه – چهار کاتیونی [۳-۵]، اضافه کردن ماده به لایه‌ی انتقال دهنده‌ی حفره یا الکترون [۶]، کپسوله کردن سلول خورشیدی پروسکایتی [۷-۹] و سنتز پروسکایت‌های دارای ابعاد پایین (دو بعدی) به جای پروسکایت سه بعدی به کار برده شده است. بازده کم سلول‌های شامل لایه جاذب پروسکایت دوبعدی در مطالعات اولیه، محققین را به استفاده مواد پروسکایت دوبعدی در مرز مشترک لایه پروسکایت و لایه انتقال‌دهنده حفره رهنمون ساخته است. لازم است خاطر نشان کنیم که پروسکایت‌های دوبعدی نه تنها به عنوان لایه جاذب به کار می‌روند بلکه به عنوان لایه سرپوش بر روی پروسکایت سه بعدی (۱۰۲) [D/۳D] و یا لایه‌های مرزی می‌توانند به کار برده شوند تا به عنوان یک سپر از لایه جاذب پروسکایتی در مقابل رطوبت محافظت کنند و بنابراین پایداری سلول افزایش یابد. همچنین این لایه مرزی دوبعدی می تواند تزریق بار را از طریق تطابق بهتر سطح انرژی بهبود دهد. در این پژوهش سلول‌های خورشیدی پروسکایتی دوبعدی/ سه‌بعدی با استفاده از فنیل‌تری‌متیل‌آمونیوم‌یدید ($C_۹H_{۱۴}NI$) ساخته شد و مشخصه‌های فوتوولتایی آن مورد بررسی قرار گرفت.

روش ساخت سلول‌های خورشیدی پروسکایتی

جهت ساخت سلول‌های خورشیدی پروسکایتی، ابتدا بخشی از لایه‌ی FTO بر روی شیشه، با توجه به ساختار موردنظر به روش شیمیایی (پودر روی و HCl) لایه‌برداری شد. مراحل شستشو زیرلایه‌ها به ترتیب، با آب و صابون، آب مقطر، استون، اتانول تحت اولتراسونیک انجام شد و به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۲۰ C° قرار گرفت تا خشک شود. لایه‌ی سدکننده‌ی الکترون، به روش چرخشی و با سرعت چرخش ۴۰۰۰ دور بر دقیقه لایه‌نشانی شد. این لایه مانع از بازترکیب الکترون- حفره در سلول می‌شود. بعد از خشک-شدن لایه در دمای ۱۲۰ C°، تا دمای ۵۰۰ C° و به مدت ۶۰ دقیقه پخت داده شد. لایه‌ی نانو ساختار تیتانیوم‌دی‌اکسید ($TiO_۲$) نیز به روش چرخشی و با سرعت چرخش ۴۰۰۰ دور بر دقیقه لایه‌نشانی شد. برای انجام این کار، خمیر تیتانیوم‌دی‌اکسید با اتانول رقیق شد. این لایه، وظیفه‌ی انتقال الکترون را به عهده دارد. این لایه نیز ابتدا در دمای ۱۲۰ C° خشک شد و در ادامه، به مدت ۶۰ دقیقه تا دمای ۵۰۰ C° پخت داده شد. سپس پروسکایت سه‌بعدی سه کاتیونی (FA/MA/Cs) ($HC(NH_۲)_۲/CH_۳NH_۳/Cs$) با استفاده از روش رسوب متوالی لایه نشانی شد و به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۱۵۰ C° پخت داده شد. برای تشکیل پروسکایت دوبعدی/سه‌بعدی (D/۳D۲)،

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]

محلول‌فنیل‌تری‌متیل‌آمونیوم‌یدید با غلظت mg/ml۰/۱ در ایزوپروپانول به روش چرخشی بر روی پروسکایت سه‌بعدی لایه‌نشانی شد. سپس در دماهای مختلف پخت داده شد. در آخرین مرحله، ۶۰ نانومتر طلا توسط دستگاه کندوپاش به عنوان الکترود مقابل لایه‌نشانی شد.

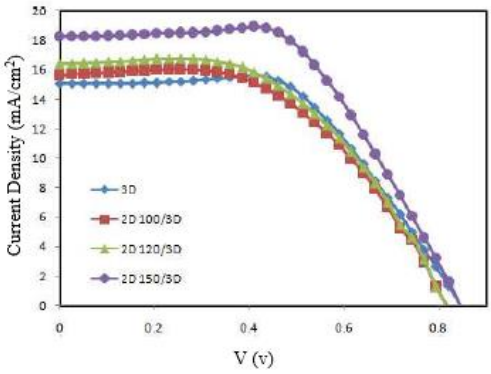
نتایج و داده‌ها

در این پژوهش دماهای پخت مختلف ۱۰۰ °C، ۱۲۰ °C و ۱۵۰ °C برای تشکیل پروسکایت دوبعدی مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات فوتوولتایی سلول‌های خورشیدی تحت تابش نور با توان ۱۰۰ میلی‌وات بر سانتی‌مترمربع (AM۱،۵) اندازه‌گیری شد. مشخصه‌های فوتوولتایی از قبیل چگالی جریان مدار کوتاه، ولتاژ مدار باز، ضریب پرشدگی و بازده تبدیل توان را می‌توان در جدول ۱ مشاهده کرد. همچنین منحنی چگالی جریان-ولتاژ سلول‌های ساخته شده را می‌توان در شکل ۱ مشاهده کرد.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای J_{sc}، V_{oc}، FF و PCE در دماهای پخت مختلف.

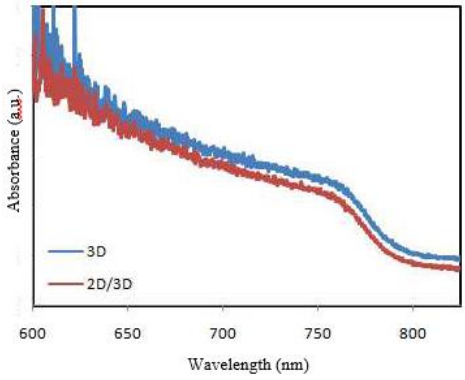
	۳D	۲D ۱۰۰/۳D	۲D ۱۲۰/۳D	۲D ۱۵۰/۳D
J_{sc}(mA/cm^{۲})	۱۵،۰۵	۱۵،۶۵	۱۶،۳۸	۱۸،۲۴
V_{oc}(v)	۰،۸۳	۰،۸۱	۰،۸۱	۰،۸۳
FF(٪)	۵۸	۵۳	۵۳	۵۸
PCE(٪)	۷،۲۹	۶،۷۲	۷،۰۳	۸،۸۴

شکل ۱ نشان می‌دهد که سلول‌های D/۳D۲ با دمای پخت ۱۵۰ °C بهترین عملکرد را داشته است. بنابراین در این پژوهش دمای ۱۵۰ °C به عنوان بهترین دمای پخت برای تشکیل پروسکایت D/۳D۲ انتخاب می‌شود.



شکل ۱: نمودار چگالی‌جریان_ولتاژ مربوط به دماهای پخت مختلف.

با توجه به طیف جذب از سطح پروسکایت‌های D۳ و D/۳D۲ بهینه در شکل ۲ مشاهده می‌شود که پروسکایت‌های D۳ و D/۳D۲ تقریبا جذب یکسانی دارند. در طیف پروسکایت D/۳D۲ لبه جذب مقدار اندکی به سمت طول موج‌های کوچک‌تر شیفت پیدا کرده است که این می‌تواند نشان‌دهنده تشکیل پروسکایت دوبعدی باشد، بدلیل اینکه پروسکایت‌های دوبعدی گاف انرژی بزرگ‌تری دارند[۱۰].

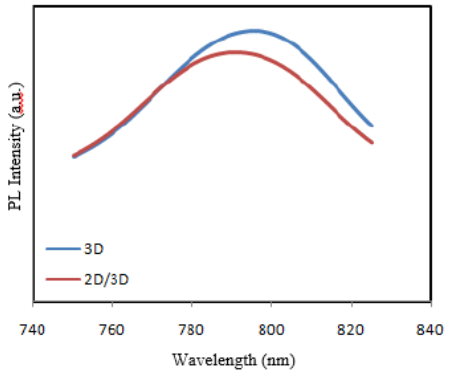


شکل ۲: طیف جذب از سطح پروسکایت‌های D۳ و D/۳D۲ بهینه.

با توجه به طیف فوتولومینسانس از سطح سلول‌های خورشیدی پروسکایتی D۳ و D/۳D۲ بهینه در شکل ۳ مشاهده می‌شود که پیک سلول خورشیدی پروسکایتی D/۳D۲ مقدار اندکی به سمت طول موج‌های کوچک‌تر شیفت پیدا کرده است که این در توافق با طیف جذب می‌باشد. همچنین سلول خورشیدی پروسکایتی D/۳D۲

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]

پیک کوتاه‌تری نسبت به سلول خورشیدی پروسکایت D۳ دارد، که این نشان‌دهنده انتقال بار بهتر در سلول خورشیدی پروسکایتی D/۳D۲ می‌باشد. انتقال بار بهتر باعث افزایش چگالی جریان و در نهایت افزایش بازده سلول‌های خورشیدی پروسکایتی D/۳D۲ بهینه نسبت به سلول‌های خورشیدی پروسکایتی D۳ شده است. با توجه به اینکه دمای پخت برای تشکیل پروسکایت دو بعدی بر روی پروسکایت سه بعدی $CH_۳NH_۳PbI_۳$، ۱۰۰ C° گزارش شده است[۱۱]. در این پژوهش، دمای بهینه پخت برای تشکیل همان پروسکایت دوبعدی بر روی پروسکایت سه‌بعدی سه‌کاتیونی ۱۵۰ C° بدست آمده است.



شکل ۳: طیف فوتولومینسانس از سطح سلول‌های خورشیدی پروسکایتی D۳ و D/۳D۲ بهینه.

نتیجه‌گیری

با توجه به مشخصه‌یابی‌های فوتوولتایی، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دمای پخت در دمای ۱۵۰ C° شرایط برای تشکیل لایه‌ی پروسکایت D/۳D۲ مناسب‌تری فراهم می‌شود. با توجه به طیف فوتولومینسانس انتقال بار در سلول خورشیدی پروسکایتی D/۳D۲ نسبت به سلول خورشیدی پروسکایتی D۳ بهتر می‌باشد که احتمال دارد تزریق بار از طریق تطابق بهتر سطح انرژی بهبود یافته است. در نتیجه فنیل‌تری‌متیل‌آمونیوم‌یدید باعث بهبود عملکرد فوتوولتایی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی شده است.

سپاسگزاری

از اعضای محترم گروه پژوهشی فوتونیک دانشگاه یزد که در انجام این آزمایشات به ما یاری رساندند، تشکر و قدردانی فراوانی می‌شود.

مرجع‌ها

۱. Dualeh, A., et al., *Effect of annealing temperature on film morphology of organic–inorganic hybrid pervoskite solid-state solar cells.* Advanced Functional Materials, ۲۰۱٤. ۲٤(۲۱): p. ۳۲۵۰-۳۲۵۸.
۲. Noh, J.H., et al., *Chemical management for colorful, efficient, and stable inorganic–organic hybrid nanostructured solar cells.* Nano letters, ۲۰۱۳. ۱۳(٤): p. ۱۷٦٤-۱۷٦۹.
۳. Ono, L.K., E.J. Juarez-Perez, and Y. Qi, *Progress on perovskite materials and solar cells with mixed cations and halide anions.* ACS applied materials & interfaces, ۲۰۱۷. ۹(۳٦): p. ۳۰۱۹۷-۳۰۲٤٦.
٤. Saliba, M., et al., *Incorporation of rubidium cations into perovskite solar cells improves photovoltaic performance.* Science, ۲۰۱٦. ۳٥٤(٦۳۰۹): p. ۲۰٦-۲۰۹.
٥. Saliba, M., et al., *Cesium-containing triple cation perovskite solar cells: improved stability, reproducibility and high efficiency.* Energy & environmental science, ۲۰۱٦. ۹(٦): p. ۱۹۸۹-۱۹۹۷.
٦. Habisreutinger, S.N., et al., *Research Update: Strategies for improving the stability of perovskite solar cells.* APL Materials, ۲۰۱٦. ٤(۹): p. ۰۹۱٥۰۳.
۷. Guarnera, S., et al., *Improving the long-term stability of perovskite solar cells with a porous Al2O3 buffer layer.* The journal of physical chemistry letters, ۲۰۱٥. ٦(۳): p. ٤۳۲-٤۳۷.
۸. Kim, H., et al., *Enhanced stability of MAPbI 3 perovskite solar cells using poly (p-chloro-xylylene) encapsulation.* Scientific reports, ۲۰۱۹. ۹(۱): p. ۱-٦.
۹. Uddin, A., et al., *Encapsulation of organic and perovskite solar cells: a review.* Coatings, ۲۰۱۹. ۹(۲): p. ٦٥.
۱۰. Zhang, F., et al., *Advances in two-dimensional organic–inorganic hybrid perovskites.* Energy & Environmental Science, ۲۰۲۰. ۱۳(٤): p. ۱۱٥٤-۱۱۸٦.
۱۱. Wang, X., et al., *Steric Mixed-Cation 2D Perovskite as a Methylammonium Locker to Stabilize MAPbI3.* Angewandte Chemie, ۲۰۲۰. ۱۳۲(٤): p. ۱٤۸٥-۱٤۸۹.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]

با سلام و احترام
استاد ارجمند، جناب آقای دکتر ملک فر،
دبیر محترم کمیته علمی کنفرانس اپتیک و فوتونیک

ضمن سپاس از حضرتعالی و پیشنهادات داوران محترم، بدینوسیله توضیحات زیر پیرو سوالات و پیشنهادات داوران ارائه می‌گردد:

۱- نویسنده مسئول مشخص گردد.
پاسخ و توضیح: نکته اشاره شده توسط داور محترم، مشخص گردیده است.
۲- چکیده انگلیسی کامل شود.
پاسخ و توضیح: چکیده اشاره شده توسط داور محترم، کامل شده است.

۳- اشکالات نگارشی طبق فایل ضمیمه برطرف گردد.
پاسخ و توضیح: فایلی ارسال نشده بود. طبق فرمت مقالات فارسی در سایت کنفرانس تصحیح شده است.

۴- فرمول شیمیایی مواد اولیه ذکر شود.
پاسخ و توضیح: نکته اشاره شده توسط داور محترم، ذکر شده است.

۵- مراجع معتبر در بخش نتایج و بحث استفاده گردد و نتیجه با کارهای دیگران مقایسه شود.
پاسخ و توضیح: نکته اشاره شده توسط داور محترم، اضافه شده است.

امیدواریم نسخه بازنگری شده با تصحیحات پیشنهادی داوران محترم، مورد پذیرش در کنفرانس قرار گیرد.

نویسندگان مقاله.
مهناز مظفری، عباس بهجت، محمدعلی حداد، علی بنویدی

با تشکر.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]