

بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و

فوتونیک ایران و چهاردهمین

کنفرانس مهندسی و فناوری

فوتونیک ایران،

دانشگاه شهید چمران اهواز،

خوزستان، ایران.

۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰



## بررسی اثر فنیل تری متیل آمونیوم یدید بر مشخصه های فوتوولتایی سلول های خورشیدی پروسکایتی بدون انتقال دهنده حفره

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

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

[and.abenvidi@yazd.ac.ir](mailto:and.abenvidi@yazd.ac.ir), [mahaddad@yazd.ac.ir](mailto:mahaddad@yazd.ac.ir), [abehjat@yazd.ac.ir](mailto:abehjat@yazd.ac.ir), [mahnaz.mozaffari@stu.yazd.ac.ir](mailto:mahnaz.mozaffari@stu.yazd.ac.ir)

چکیده - در این پژوهش سلول های خورشیدی پروسکایتی سه بعدی ( $D^3$ ) و دوبعدی/سه بعدی ( $D^2/D^3$ ) با استفاده از کاتیون جداکننده فنیل تری متیل آمونیوم ( $C_6H_4N$ ) ساخته شدند. جهت بهینه سازی سلول های خورشیدی پروسکایتی دوبعدی/سه بعدی، دماهای پخت مختلف  $100^\circ C$ ،  $120^\circ C$  و  $150^\circ C$  برای تشکیل پروسکایت دوبعدی مورد بررسی قرار گرفت. مشخصه یابی 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  $150^\circ C$  بدست آمد. سپس با توجه به طیف فوتولومینسانس مشاهده شد که انتقال بار در سلول خورشیدی پروسکایتی  $D^2/D^3$  نسبت به سلول خورشیدی پروسکایتی  $D^3$  بهتر می باشد که باعث بهبود عملکرد فوتوولتایی سلول های خورشیدی پروسکایتی می شود.

کلید واژه- بازده تبدیل توان، پروسکایت سه بعدی، پروسکایت دوبعدی/سه بعدی، 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](mailto:mahnaz.mozaffari@stu.yazd.ac.ir), [abehjat@yazd.ac.ir](mailto:abehjat@yazd.ac.ir), [mahaddad@yazd.ac.ir](mailto:mahaddad@yazd.ac.ir), and [abenvidi@yazd.ac.ir](mailto:abenvidi@yazd.ac.ir)

**Abstract-** In this research,  $D^3$  and  $D^2/D^3$  perovskite solar cells fabricated through using Phenyltrimethylammonium iodide. After that, our efforts focused on further improvement in the performance of  $D^2/D^3$  perovskite solar cells. The photovoltaic properties of the 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  $150^\circ C$ . Then, according to

the photoluminescence spectrum, it was observed that charge transfer in  ${}^2\text{D}/{}^3\text{D}$  perovskite solar cells is better than  ${}^3\text{D}$  perovskite solar cells, which improves the performance of perovskite solar cells.

Keywords: Power conversion efficiency,  ${}^3\text{D}$  Perovskite,  ${}^2\text{D}/{}^3\text{D}$  Perovskite, Perovskite Solar Cell.

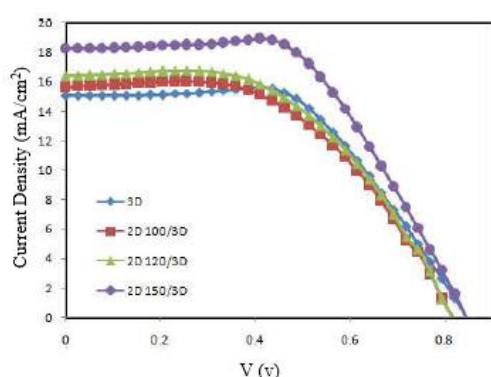
بنابراین پایداری سلول افزایش یابد. همچنین این لایه مرزی دوبعدی می تواند تزریق بار را از طریق تطابق بهتر سطح انرژی بهبود دهد. در این پژوهش سلول های خورشیدی پروسکایتی دوبعدی/ سه بعدی با استفاده از فنیل تری متیل آمونیوم یدید ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{NI}$ ) ساخته شد و مشخصه های فوتوولتایی آن مورد بررسی قرار گرفت.

### روش ساخت سلول های خورشیدی پروسکایتی

جهت ساخت سلول های خورشیدی پروسکایتی، ابتدا بخشی از لایه ی FTO بر روی شیشه، با توجه به ساختار موردنظر به روش شیمیایی (پودر روی و  $\text{HCl}$ ) لایه برداری شد. مراحل شستشو زیرلایه ها به ترتیب، با آب و صابون، آب مقطر، استون، اتانول تحت اولتراسونیک انجام شد و به مدت ۲۰ دقیقه در دمای  $120^\circ\text{C}$  قرار گرفت تا خشک شود. لایه ی سدکننده ی الکترون، به روش چرخشی و با سرعت چرخش ۴۰۰۰ دور بر دقیقه لایه نشانی شد. این لایه مانع از بازترکیب الکترون-حفره در سلول می شود. بعد از خشک شدن لایه در دمای  $120^\circ\text{C}$ ، تا دمای  $500^\circ\text{C}$  و به مدت ۶۰ دقیقه پخت داده شد. لایه ی نانو ساختار تیتانیوم دی اکسید ( $\text{TiO}_2$ ) نیز به روش چرخشی و با سرعت چرخش ۴۰۰۰ دور بر دقیقه لایه نشانی شد. برای انجام این کار، خمیر تیتانیوم دی اکسید با اتانول رقیق شد. این لایه، وظیفه ی انتقال الکترون را به عهده دارد. این لایه نیز ابتدا در دمای  $120^\circ\text{C}$  خشک شد و در ادامه، به مدت ۶۰ دقیقه تا دمای  $500^\circ\text{C}$  پخت داده شد. سپس پروسکایت سه بعدی سه کاتیونی  $(\text{HC}(\text{NH}_2)_2/\text{CH}_3\text{NH}_2/\text{Cs})$  (FA/MA/Cs) با استفاده از روش رسوب متوالی لایه نشانی شد و به مدت ۱۵ دقیقه در دمای  $150^\circ\text{C}$  پخت داده شد. برای تشکیل پروسکایت دوبعدی/سه بعدی  $(\text{D}/{}^3\text{D})$ ،

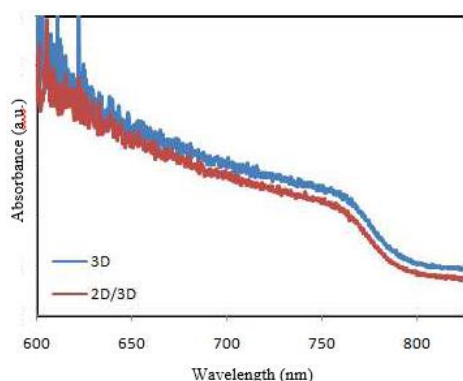
### مقدمه

در سال های اخیر تحقیقات در زمینه ساخت سلول های خورشیدی پروسکایتی به دلیل ویژگی های منحصر بفرد آن رشد چشم گیری یافته است. استفاده از پروسکایت در ساخت سلول های خورشیدی، اولین بار در سال ۲۰۰۹ میلادی توسط میاساکا گزارش شد. پروسکایت های آلی-معدنی با کاتیون های آلی مختلف سنتز می شود. این امر نشان می دهد که اندازه کاتیون آلی در گاف اپتیکی پروسکایت تاثیر می گذارد. از عوامل مؤثر در تخریب پروسکایت، رطوبت، واکنش شیمیایی، نور و دما می باشد [۱]. برای حل مشکل ناپایداری پروسکایت استراتژی های مختلفی از جمله: به کار بردن ترکیب هالید های مختلف. به طور مثال افزودن برم ( $\text{Br}$ ) در ترکیب پروسکایت به منظور افزایش پایداری رطوبتی سلول خورشیدی [۲]، استفاده از پروسکایت های سه - چهار کاتیونی [۳-۵]، اضافه کردن ماده به لایه ی انتقال دهنده ی حفره یا الکترون [۶]، کپسوله کردن سلول خورشیدی پروسکایتی [۷-۹] و سنتز پروسکایت های دارای ابعاد پایین (دو بعدی) به جای پروسکایت سه بعدی به کار برده شده است. بازده کم سلول های شامل لایه جاذب پروسکایت دوبعدی در مطالعات اولیه، محققین را به استفاده مواد پروسکایت دوبعدی در مرز مشترک لایه پروسکایت و لایه انتقال دهنده حفره رهنمون ساخته است. لازم است خاطر نشان کنیم که پروسکایت های دوبعدی نه تنها به عنوان لایه جاذب به کار می روند بلکه به عنوان لایه سرپوش بر روی پروسکایت سه بعدی ( ${}^2\text{D}/{}^3\text{D}$ ) و یا لایه های مرزی می توانند به کار برده شوند تا به عنوان یک سپر از لایه جاذب پروسکایتی در مقابل رطوبت محافظت کنند و



شکل ۱: نمودار چگالی جریان\_ولتاژ مربوط به دماهای پخت مختلف.

با توجه به طیف جذب از سطح پروسکایت‌های  $D^3$  و  $D^3/D^2$  بهینه در شکل ۲ مشاهده می‌شود که پروسکایت‌های  $D^3$  و  $D^3/D^2$  تقریباً جذب یکسانی دارند. در طیف پروسکایت  $D^3/D^2$  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  $D^3$  و  $D^3/D^2$  بهینه.

با توجه به طیف فوتولومینسانس از سطح سلول‌های خورشیدی پروسکایتی  $D^3$  و  $D^3/D^2$  بهینه در شکل ۳ مشاهده می‌شود که پیک سلول خورشیدی پروسکایتی  $D^3/D^2$  مقدار اندکی به سمت طول موج‌های کوچک‌تر شیفت پیدا کرده است که این در توافق با طیف جذب می‌باشد. همچنین سلول خورشیدی پروسکایتی  $D^3/D^2$

محلول فنیل تری‌متیل‌آمونیم‌یدید با غلظت  $10^{-5}$  mg/ml 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 الکتروود مقابل لایه‌نشانی شد.

## نتایج و داده‌ها

در این پژوهش دماهای پخت مختلف  $100^\circ\text{C}$ ،  $120^\circ\text{C}$  و  $150^\circ\text{C}$  برای تشکیل پروسکایت دوبعدی مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات فوتوولتایی سلول‌های خورشیدی تحت تابش نور با توان  $100$  میلی‌وات بر سانتی‌متر مربع ( $AM_{1.5}$ ) 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.

|                                   | $3D$  | $2D/3D$ ۱۰۰/۳۰ | $2D/3D$ ۱۲۰/۳۰ | $2D/3D$ ۱۵۰/۳۰ |
|-----------------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|
| $(J_{sc}(\text{mA}/\text{cm}^2))$ | ۱۵,۰۵ | ۱۵,۶۵          | ۱۶,۳۸          | ۱۸,۲۴          |
| $(V_{oc}(\text{V}))$              | 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  $D^3/D^2$  با دمای پخت  $150^\circ\text{C}$  بهترین عملکرد را داشته است. بنابراین در این پژوهش دمای  $150^\circ\text{C}$  به عنوان بهترین دمای پخت برای تشکیل پروسکایت  $D^3/D^2$  انتخاب می‌شود.

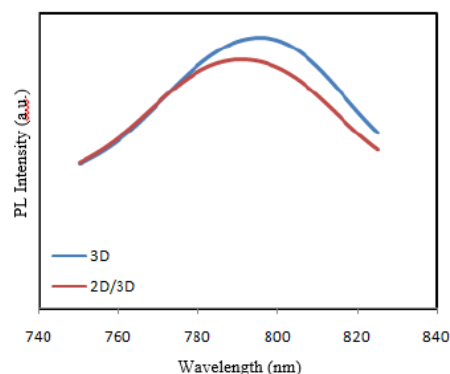
## سیاسگزاری

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

## مرجع‌ها

1. Dualeh, A., et al., *Effect of annealing temperature on film morphology of organic-inorganic hybrid perovskite solid-state solar cells*. *Advanced Functional Materials*, ۲۰۱۴. ۲۴(۲۱): p. ۳۲۵۰-۳۲۵۸.
2. Noh, J.H., et al., *Chemical management for colorful, efficient, and stable inorganic-organic hybrid nanostructured solar cells*. *Nano letters*, ۲۰۱۳. ۱۳(۴): p. ۱۷۶۴-۱۷۶۹.
3. 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(۳۶): p. ۳۰۱۹۷-۳۰۲۴۶.
4. Saliba, M., et al., *Incorporation of rubidium cations into perovskite solar cells improves photovoltaic performance*. *Science*, ۲۰۱۶. ۳۵۴(۶۳۰۹): p. ۲۰۶-۲۰۹.
5. Saliba, M., et al., *Cesium-containing triple cation perovskite solar cells: improved stability, reproducibility and high efficiency*. *Energy & environmental science*, ۲۰۱۶. ۹(۶): p. ۱۹۸۹-۱۹۹۷.
6. Habisreutinger, S.N., et al., *Research Update: Strategies for improving the stability of perovskite solar cells*. *APL Materials*, ۲۰۱۶. ۴(۹): p. ۰۹۱۰۰۳.
7. Guarnera, S., et al., *Improving the long-term stability of perovskite solar cells with a porous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> buffer layer*. *The journal of physical chemistry letters*, ۲۰۱۵. ۶(۳): p. ۴۳۲-۴۳۷.
8. Kim, H., et al., *Enhanced stability of MAPbI<sub>3</sub> perovskite solar cells using poly (p-chloroxylylene) encapsulation*. *Scientific reports*, ۲۰۱۹. ۹(۱): p. ۱-۶.
9. Uddin, A., et al., *Encapsulation of organic and perovskite solar cells: a review*. *Coatings*, ۲۰۱۹. ۹(۲): p. ۶۵.
10. Zhang, F., et al., *Advances in two-dimensional organic-inorganic hybrid perovskites*. *Energy & Environmental Science*, ۲۰۲۰. ۱۳(۴): p. ۱۱۵۴-۱۱۸۶.
11. Wang, X., et al., *Steric Mixed-Cation 2D Perovskite as a Methylammonium Locker to Stabilize MAPbI<sub>3</sub>*. *Angewandte Chemie*, ۲۰۲۰. ۱۳۲(۴): p. ۱۴۸۵-۱۴۸۹.

پیک کوتاه‌تری نسبت به سلول خورشیدی پروسکایت D<sup>۳</sup> دارد، که این نشان‌دهنده انتقال بار بهتر در سلول خورشیدی پروسکایتی D<sup>۳</sup>/۳D<sup>۲</sup> می‌باشد. انتقال بار بهتر باعث افزایش چگالی جریان و در نهایت افزایش بازده سلول‌های خورشیدی پروسکایتی D<sup>۳</sup>/۳D<sup>۲</sup> بهینه نسبت به سلول‌های خورشیدی پروسکایتی D<sup>۳</sup> شده است. با توجه به اینکه دمای پخت برای تشکیل پروسکایت دو بعدی بر روی پروسکایت سه بعدی CH<sub>۳</sub>NH<sub>۳</sub>PbI<sub>۳</sub> ۱۰۰ °C گزارش شده است [۱۱]. در این پژوهش، دمای بهینه پخت برای تشکیل همان پروسکایت دوبعدی بر روی پروسکایت سه بعدی سه کاتیونی ۱۵۰ °C بدست آمده است.



شکل ۳: طیف فوتولومینسانس از سطح سلول‌های خورشیدی پروسکایتی D<sup>۳</sup> و D<sup>۳</sup>/۳D<sup>۲</sup> 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<sup>۳</sup>/۳D<sup>۲</sup> مناسب‌تری فراهم می‌شود. با توجه به طیف فوتولومینسانس انتقال بار در سلول خورشیدی پروسکایتی D<sup>۳</sup>/۳D<sup>۲</sup> نسبت به سلول خورشیدی پروسکایتی D<sup>۳</sup> بهتر می‌باشد که احتمال دارد تزریق بار از طریق تطابق بهتر سطح انرژی بهبود یافته است. در نتیجه فنیل‌تری‌متیل‌آمونیم‌یدید باعث بهبود عملکرد فوتوولتایی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی شده است.

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.