مجله علمی – تحقیقی علوم انجنیری پوهنتون بغلان
د بغلان پوهنتون د انجنيري علومو علمي او څېړنيزه مجله
https://baghlan.edu.af -/ volume (1) , Issue (2), 2024, P (27-35)

بررسی اثر روش لایه‌نشانی پروسکایت $FAPbI_3$ بر ریخت شناسی لایه و کارایی(بازده) سلول خورشیدی

[1]پوهنیار عنایت الله عرفانی استاد دیپارتمنت ریاضی و فزیک پوهنحی انجینری پوهنتون بلخ
[2]پوهنیار محمد اسمعیل احساس استاد دیپارتمنت فزیک پوهنحی تعلیم وتربیه پوهنتون بلخ

Abstract

The aim of this research was to investigate the effect of the $FAPbI_3$ perovskite deposition method on the morphology of the layer and the performance of the solar cell. In the end, we concluded that the deposition method using various techniques such as spin coating and spin-dipping (one-step and two-step) has a significant impact on the morphology of the $FAPbI_3$ perovskite layer and also leads to an increase in the efficiency of the solar cell. $FAPbI_3$ perovskite has two phases: the black $FAPbI_3$-α phase and the yellow $FAPbI_3$-δ phase, with only the black phase being suitable for photovoltaic purposes. The growth of perovskite on the titanium dioxide (TiO_2) nanoparticle substrate plays a crucial role in the efficiency of the cell. Although XRD and I-V characterization indicate that the efficiency of the cell is higher in the two-step method, SEM images show that the perovskite layer in the one-step method has better morphology. The significant importance of this subject lies in the high efficiency of solar cells, their stability and durability, production costs, and performance under various environmental conditions.

Keywords: Perovskite solar cells, coating, Nanostructure, Morphology

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی تأثیر روش لایه‌نشانی پروسکایت $FAPbI_3$ بر ریخت‌شناسی لایه و کارایی سلول خورشیدی است. نتایج کار این است که روش لایه نشانی با استفاده از روش‌های مختلف مانند اسپین و اسپین- غوطه‌وری (یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای) تاثیر قابل توجهی بر ریخت‌شناسی لایه پروسکایت $FAPbI_3$ دارد و هم‌چنان منجر به افزایش بازده سلول خورشیدی می‌شود. پروسکایت $FAPbI_3$ دارای دو فاز α-$FAPbI_3$ سیاه‌رنگ و δ-$FAPbI_3$ زرد رنگ است که تنها فاز سیاه برای مقاصد فوتوولتایی مناسب می‌باشد. رشد پروسکایت بر روی زیر لایه نانو ذرات تیتانیوم‌دی‌اکسید (TiO_2) در کارایی سلول نقش بسزایی دارد. گرچه مشخصه‌یابی‌های XRD و I-V نشان می‌دهد که کارایی سلول در روش دو مرحله‌ای بیشتر است، اما تصاویر SEM نشان می‌دهد در روش تک‌مرحله‌ای لایه

پروسکایت از ریخت‌شناسی بهتری برخوردار است. اهمیت قابل توجه این موضوع عبارت از بازده بالای سلول خورشیدی، پایداری و دوام، هزینه‌های تولید و کارایی در شرایط مختلف محیطی است.

واژه‌های کلیدی: سلول‌های خورشیدی پروسکایتی، لایه نشانی، نانوساختاری، ریخت شناسی

۱- مقدمه

طول پخش زیاد حامل‌های بار، گاف انرژی قابل تنظیم، فاکتور تلورانس[1] مناسب از خواص منحصر به فرد پروسکایت ها می‌باشد .همین امر موجب شده تا در سال‌های اخیر اینگونه سلول‌ها مورد توجه ویژه‌ی پژوهشگران قرار گیرد و رشد قابل توجهی داشته باشند، به‌گونه‌ای که بازدهی آن‌ها در چند سال اخیر از حدود ۳٪ به ۲۴/۷٪ رسیده است. ساختارهای مورد استفاده در این سلول‌ها به ساختارهای مسطح و مزوپروس تقسیم‌بندی می‌شوند. در ساختار مزوپروس از نانو ذرات TiO_2 به عنوان یک چهارچوب و تسهیل‌کننده انتقال الکترون استفاده می‌شود. در این پژوهش با توجه به بزرگی شعاع یونی FA^+ سعی شد تا با دو روش لایه‌نشانی پروسکایت (اسپین و اسپین –غوطه‌وری) به بررسی کارایی و ریخت شناسی پروسکایت پرداخته شد (Yin, W. J et al, 2014).

تلاش برای یافتن منابع انرژی تجدیدپذیر کارآمد و مقرون به صرفه، توسعه سلول‌های خورشیدی پروسکایتی (PSCs) را که در سال‌های اخیر پیشرفت چشمگیری داشته‌اند، به‌شدت تحت تأثیر قرار داده است. در میان مواد پروسکایتی مختلف، فرمامیدینیوم سرب یدید ($FAPbI_3$)به‌دلیل پایداری حرارتی برتر و باندگپ مناسب، به‌عنوان یک گزینه اصلی برای کاربردهای فوتوولتاییک با بازده بالا مطرح شده است. با این حال، دستیابی و حفظ فاز سیاه مطلوب ($FAPbI_3$-α) در مقابل فاز زرد غیر فوتوولتاییک ($FAPbI_3$-δ) برای عملکرد و پایداری PSC ها حیاتی است (Eperon et al, 2014).

مورفولوژی و بلورینگی لایه پروسکایت عوامل کلیدی مؤثر بر بازده PSC ها هستند. این ویژگی‌ها به شدت به روش‌های لایه‌نشانی مورد استفاده در فرآیند ساخت وابسته‌اند. تکنیک‌های مختلفی مانند اسپین کوتینگ و اسپین-دیپینگ (فرآیندهای تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای) برای بهینه‌سازی کیفیت لایه پروسکایت مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Snaith, 2013). انتخاب روش لایه‌نشانی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر رشد پروسکایت بر روی زیرلایه‌هایی مانند دی‌اکسید تیتانیوم(TiO_2) داشته باشد که به نوبه خود بر عملکرد کلی سلول خورشیدی تأثیر می‌گذارد (Mei et al, 2014).

[1] *Defect tolerance*

در این پژوهش، اثرات روش‌های مختلف لایه‌نشانی بر مورفولوژی و بازده لایه‌های پروسکایت $FAPbI_3$ مورد بررسی قرار می‌گیرد. با استفاده از تکنیک‌های جامع مشخصه‌یابی از جمله پراش پرتو ایکس (XRD)، اندازه‌گیری‌های جریان-ولتاژ (I-V)، و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، سعی داریم رابطه بین روش لایه‌نشانی، مورفولوژی لایه و عملکرد دستگاه را روشن کنیم. این تحقیق به منظور بهینه‌سازی تکنیک‌های ساخت و در نتیجه افزایش بازده و دوام سلول‌های خورشیدی پروسکایتی انجام شده است (Yang et al, 2017 ؛Saliba et al, 2016).

مسئله اصلی این تحقیق، بررسی و مقایسه تأثیر روش‌های مختلف لایه‌نشانی پروسکایت $FAPbI_3$ بر ریخت‌شناسی لایه و بازده سلول‌های خورشیدی است. این تحقیق به دنبال پاسخ به این سوال است که کدام روش لایه‌نشانی و تحت چه شرایطی می‌تواند بهترین کیفیت لایه پروسکایت و در نتیجه بالاترین بازده سلول‌های خورشیدی را فراهم کند. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به بهینه‌سازی فرآیندهای ساخت و توسعه سلول‌های خورشیدی با بازده بالاتر و هزینه‌های تولید پایین‌تر کمک کند. در دنیای امروز، نیاز به انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر به طور فزاینده‌ای افزایش یافته است. سلول‌های خورشیدی به عنوان یکی از پرکاربردترین فناوری‌های تولید انرژی تجدیدپذیر، توجه بسیاری از پژوهشگران و صنعتگران را به خود جلب کرده‌اند. در این میان، سلول‌های خورشیدی پروسکایتی به دلیل بازده بالای تبدیل انرژی، هزینه‌های تولید پایین و فرآیندهای ساخت ساده، به عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین گزینه‌ها برای جایگزینی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی مطرح شده‌اند. اهمیت و ضرورت این تحقیق به دلایل زیر است:

افزایش بازده سلول‌های خورشیدی: تحقیق در مورد روش‌های لایه‌نشانی و بهینه‌سازی شرایط فرآیندی می‌تواند بهبود قابل توجهی در بازده تبدیل انرژی سلول‌های خورشیدی ایجاد کند. این امر می‌تواند به کاهش هزینه‌های تولید و افزایش کاربرد سلول‌های خورشیدی در مقیاس وسیع کمک کند. پایداری و دوام بیشتر استفاده از روش‌های مناسب لایه‌نشانی می‌تواند به تثبیت فاز سیاه پروسکایت و کاهش تبدیل آن به فاز زرد کمک کند، که این امر منجر به افزایش پایداری و طول عمر سلول‌های خورشیدی می‌شود.

تحقیقات اخیر نیز به بررسی و بهبود روش‌های لایه‌نشانی برای تولید لایه‌های پروسکایت با کیفیت بالا پرداخته‌اند. برای مثال، تحقیقاتی توسط Kim و همکاران (۲۰۱۸) بر روی تکنیک‌های نوین لایه‌نشانی مانند لایه‌نشانی با روش چاپ جوهرافشان و نانوپوشش‌ها متمرکز شده است، که نشان

داده‌اند این روش‌ها می‌توانند بهبود قابل توجهی در یکنواختی و خواص اپتیکی لایه‌های پروسکایت ایجاد کنند. این پیشرفت‌ها به نوبه خود می‌تواند به افزایش کارایی و پایداری سلول‌های خورشیدی پروسکایتی منجر شود.

به علاوه، Zhang و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی دیگر به بررسی تأثیر شرایط محیطی و پارامترهای فرآیند بر کیفیت لایه‌های پروسکایت پرداختند. این مطالعه نشان داد که کنترول دقیق دما و رطوبت در طی فرآیند لایه‌نشانی می‌تواند تأثیر بسزایی بر مورفولوژی و پایداری لایه‌های پروسکایت داشته باشد و به بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی کمک کند.

یکی دیگر از جنبه‌های مورد بررسی در پژوهش‌های اخیر، استفاده از مواد افزودنی و اصلاح‌کننده‌ها برای بهبود ویژگی‌های لایه‌های پروسکایت است. تحقیقات انجام شده توسط Liu و همکاران (۲۰۲۰) نشان داده‌اند که افزودن ترکیبات خاص به محلول پروسکایت می‌تواند به بهبود ساختار بلوری و کاهش نقص‌های سطحی لایه‌ها منجر شود، که در نهایت به افزایش بازده و طول عمر سلول‌های خورشیدی کمک می‌کند.

در کل، پیشینه تحقیق در زمینه پروسکایت‌های $FAPbI_3$ و تأثیر روش‌های مختلف لایه‌نشانی بر ریخت‌شناسی و کارایی سلول‌های خورشیدی نشان می‌دهد که این حوزه به سرعت در حال پیشرفت است و تلاش‌های گسترده‌ای برای بهینه‌سازی فرآیندها و بهبود ویژگی‌های عملکردی سلول‌های خورشیدی در حال انجام است. این پیشرفت‌ها می‌توانند به تولید سلول‌های خورشیدی با بازده بالاتر، پایداری بیشتر و هزینه‌های تولید پایین‌تر منجر شوند.

۲- مواد و روش تحقیق

حمام فراصوت (اولتراسونیک): به منظور افزایش کیفیت لایه‌های نازک و داشتن چسبندگی مناسب مواد لایه‌نشانی شده به زیرلایه‌ها، باید نمونه‌ها عاری از هرگونه چربی، رسوبات و سایر آلودگی‌های فوق ریز باشند بدین جهت، برای تمیز نمودن زیرلایه‌ها از دستگاه حمام فراصوت استفاده می‌شود. این دستگاه با ایجاد امواج فراصوت، باعث می‌شود که هرگونه آلودگی هرچند ریز از سطح زیرلایه کنده شده و سطح بسیار تمیزی ایجاد گردد. دلیل این پدیده ایجاد امواج ضربه‌ای ناشی از خلأ عقب نشینی و موج فشار برگشتی از سطح می‌باشد. لذا با تولید و انهدام مرتب حباب‌های هوا درون مایع، عمل شستشو و تمیز نمودن سطح به‌خوبی انجام می‌گیرد. دستگاه همزن فراصوت مورد استفاده در شکل زیر نشان داده شده است

دستگاه همزن فراصوت(التراسونیک): به منظور افزایش کیفیت لایه‌های نازک و داشتن چسپندگی مناسب مواد لایه‌نشانی شده به زیرلایه‌ها، باید نمونه‌ها عاری از هرگونه چربی، رسوبات و

سایر آلودگی‌های فوق ریز باشند بدین جهت، برای تمیز نمودن زیرلایه‌ها از دستگاه همزن فراصوت استفاده می‌شود. این دستگاه با ایجاد امواج فراصوت، باعث می‌شود که هرگونه آلودگی هرچند ریز از سطح زیرلایه کنده شده و سطح بسیار تمیزی ایجاد گردد. دلیل این پدیده ایجاد امواج ضربه‌ای ناشی از خلأ عقب نشینی و موج فشار برگشتی از سطح می‌باشد. لذا با تولید و انهدام مرتب حباب‌های هوا درون مایع، عمل شستشو و تمیز نمودن سطح به‌خوبی انجام می‌گیرد.

کوره مکعبی: بر خلاف کوره افقی، این کوره محفظه‌ای مکعبی داشته و روند گرم شدن بدون شیب دمایی است. این کوره عموما برای پخت لایه‌ی سردکننده حفره که نیاز به برنامه دمایی خاصی ندارد مورد استفاده قرار گرفته است. سرعت سردشدن این کوره نسبتا پایین است و به‌عنوان یک سیستم بازپخت مناسب است.

کوره افقی: به منظور پخت نمونه در حرارت‌های بالا در حدود ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد از کوره افقی ساخت شرکت اکسایتون استفاده گردید. این کوره در سیستم کنترول دمایی قابلیت برنامه‌ریزی در ۹ مرحله و حداکثر دمای نهایی ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد را داراست.

آون الکتریکی دمای پایین: برای خشک کردن زیرلایه‌ها و وسایل آزمایش از کوره الکتریکی با دمای ۱۰۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد استفاده گردید. برای خشک کردن اولیه بعضی از لایه‌های لایه‌نشانی شده مانند لایه انتقال‌دهنده الکترون و همین‌طور سنتز برخی مواد نیز از آون استفاده می‌شود. آون مورد استفاده در پژوهش ساخت شرکت فن آوران سهند آذر مدل D250 بوده و حداکثر دمای آن ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد است.

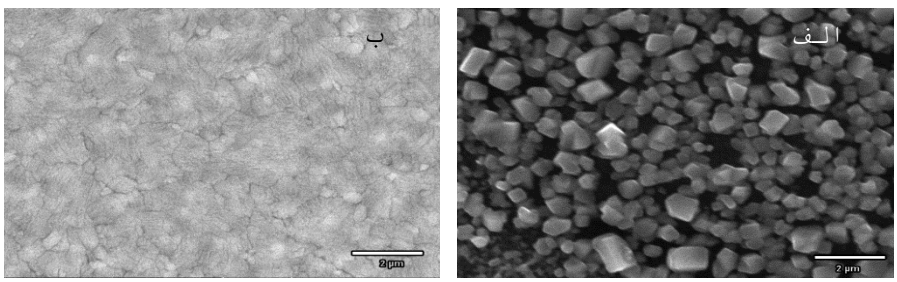
ترازوی دیجیتال: برای وزن کردن مواد، از ترازوی دیجیتال مدل HR-300 Series با دقت چهار رقم اعشار موجود در آزمایشگاه استفاده شد.

جهت ساخت سلول‌های خورشیدی پروسکایتی، ابتدا بخشی از لایه‌ی FTO بر روی شیشه، با توجه به ساختار مورد نظر به روش شیمیایی (پودر روی و HCl) لایه‌برداری شد. پس از شستشو زیر لایه‌ها، تیتانیوم‌ایزوپروکسید به روش چرخشی و با سرعت چرخش ۴۰۰۰ دور بر دقیقه بر روی زیرلایه لایه‌نشانی شد. بعد از خشک‌شدن لایه در دمای ۱۲۰° سانتیگراد، تا دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۶۰ دقیقه پخت داده شد. لایه‌ی نانو ساختار تیتانیوم‌دی‌اکسید ($Ti O_2$) نیز به روش چرخشی و با سرعت چرخش ۴۰۰۰ دور بر دقیقه لایه‌نشانی شد. این لایه به مدت ۶۰ دقیقه تا دمای ۵۰۰°C پخت داده شد. لایه‌ی پروسکایت با دو روش لایه نشانی تک مرحله‌ای اسپین (Spin) و دو مرحله‌ای اسپین-غوطه‌وری (Spin-dip) لایه‌نشانی شد. در روش تک مرحله‌ای از نسبت حجمی ۱:۹ دی‌متیل-فرمامید (DMF) و دی‌متیل‌سولفید (DMSO) به‌عنوان حلال استفاده گردید. همچنین محلول پروسکایت با حل‌کردن پیش ماده‌های PbI_2 , $CH(NH_2)_2I$ (FAI) و با نسبت‌های مولی ۱:۱:۱ در

DMSO به دست آمد. در نهایت از آنتی‌سالونت[1] جهت اصلاح سطح و آینه‌ای‌شدن فیلم پروسکایت استفاده شد. فیلم آماده‌شده به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۰۰° پخت داده شد. برای روش دو مرحله‌ای اسپین-غوطه وری محلول زرد رنگ یک مولار سرب‌یدید در دی‌متیل فرمامید، به روش چرخشی و با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه، لایه‌نشانی شد. زیر لایه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۷۰° سانتیگراد قرار گرفت و در مرحله‌ی دوم‌لایه‌نشانی، درون محلول $HC(NH_2)_2I$ با غلظت ۱۰ mg/ml در ایزوپروپانول با دمای ۸۰° سانتیگراد غوطه‌ور شد. در این مرحله پروسکایت $HC(NH_2)_2PbI_3$ تشکیل می‌شود. سپس زیر لایه‌ها در دمای ۱۷۰° سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه خشک شد. در آخرین مرحله، ۶۰ نانومتر طلا توسط دستگاه کندوپاش به عنوان الکترود مقابل لایه‌نشانی شد (Lee MM et al, 2012).

۴- یافته ها

در ابتدا از سطح نمونه های ساخته شده SEM گرفته شد. تصاویر SEM در شکل 1-2 نشان می‌دهد پروسکایت تک مرحله‌ای بلورهای بزرگتر، بهم پیچیده‌تر بی‌شکل و سطح یکنواخت‌تری دارد اما پروسکایت ساخته شده به روش دو مرحله‌ای دارای ظاهر مکعبی و ریخت شناسی سطح سه بعدی دارد.(تصاویر توسط دستگاه SEM گرفته شده)



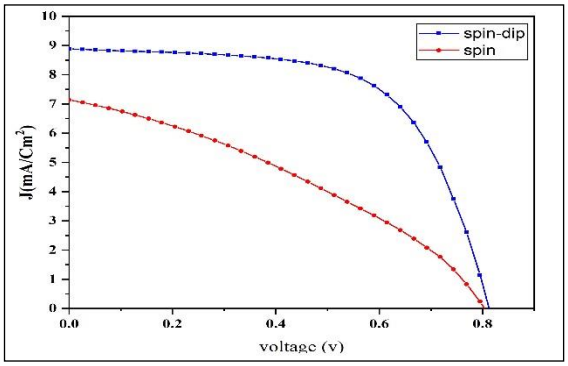
شکل ۱: تصاویر SEM از سطح پروسکایت الف : روش اسپین -غوطه وری ب) روش اسپین

با توجه به تصاویر SEM و ساختار مورد استفاده (مزوپروس بدون انتقال‌دهنده حفره) انتظار بر این است که نمونه تک مرحله‌ای از کارایی بهتری برخوردار باشد. برای بررسی مشخصات فوتوولتایی، از نمونه ها تحت تابش AM1.5، I-V گرفته شد. شکل ۲ منحنی ولتاژ-جریان نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود علی‌رغم انتظار، نمونه ساخته شده به روش دو مرحله‌کارایی بهتری برخوردار بوده است.(گراف در برنامه اورجین ترسیم شده).

[1] *anti-solvent*

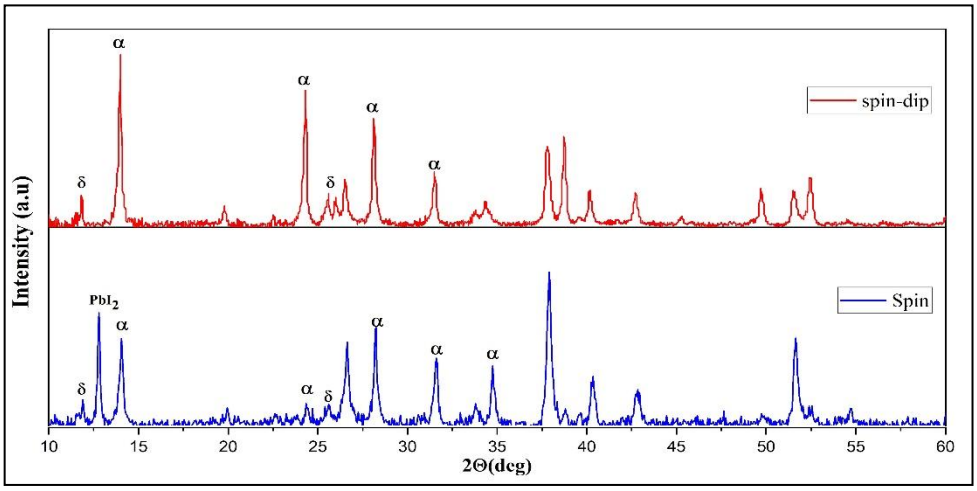
جدول ۱: مشخصات فوتوولتایی نمونه ها به دو روش مختلف

روش	V_{oc}	J_{cs}	FF (%)	(%) Eff
دو مرحله‌ای	۰/۸۱	۸/۸۹	۶۲/۷	۴/۵
تک مرحله‌ای	۰/۸۱	۷/۱۴	۳۵/۰	۲/۰



شکل ۲: منحنی ولتاژجریان نمونه‌ها ساخته شده به دوروش روش مختلف

برای بررسی علت این اختلاف از نمونه‌ها آزمون پراش اشعه X (XRD) گرفته شد. با توجه به شکل۳ مشاهده می‌شود که در هر دو نمونه مقدار فاز زرد δ-$FAPbI_3$ موجود می‌باشد. اما نمونه ساخته شده در روش تک مرحله‌ای علاوه بر فاز زرد مقداری PbI_2 باقی‌مانده این امرسبب کاهش کارایی سلول شده است. همچنین شدت پیک های فاز سیاه پروسکایت α-$FAPbI_3$ در روش دو مرحله‌ای بیشتر است که این امر می‌تواند اختلاف کارایی دو روش را توجیه نماید.



شکل ۳: نقش پراش XRD به دو روش مختلف

۵- نتیجه گیری

با توجه به بررسی اثر روش لایه‌نشانی پروسکایت $FAPbI_3$ بر ریخت‌شناسی لایه و کارایی (بازده) سلول خورشیدی در این پژوهش، می‌توان به شکل ذیل نتیجه‌گیری کرد. روش لایه‌نشانی با استفاده از روش‌های مختلف مانند اسپین کوتینگ، پاشش الکترواستاتیکی و تبخیر بخار، تأثیر قابل توجهی بر ریخت‌شناسی لایه پروسکایت $FAPbI_3$ دارد. این روش‌ها می‌توانند بهبودهای قابل توجهی در نظم و همواری لایه‌های پروسکایت ایجاد کنند.

ریخت‌شناسی بهتر لایه پروسکایت $FAPbI_3$ منجر به افزایش بازده سلول خورشیدی می‌شود. با افزایش نظم و یکنواختی در ساختار لایه‌های پروسکایت، اثرات غیرمطلوبی مانند خطاهای ریخت‌شناسی و شکست ساختاری کاهش می‌یابند که منجر به افزایش بازده سلول خورشیدی می‌شود. روش لایه‌نشانی پروسکایت $FAPbI_3$ می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کارایی سلول خورشیدی داشته باشد. با استفاده از روش‌های بهینه لایه‌نشانی، می‌توان بهبودهای قابل توجهی در بازده سلول خورشیدی حاصل کرد.

بلورها در روش تک‌مرحله‌ای بزرگتر و بهم پیچیده‌تر و هم سطح می‌باشند. پیش‌بینی می‌شود در صورت عدم استفاده از انتقال‌دهنده حفره در ساختار سلول، ریخت‌شناسی نمونه تک‌مرحله‌ای برای اتصال بهتر طلا و پروسکایت مناسب‌تر باشد. اما با توجه به مکانیزم مالیکولی لایه‌نشانی تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای می‌توان گفت در روش تک‌مرحله‌ای با توجه به تشکیل سریع پروسکایت در لایه‌های

بالایی مزوپروس و عدم نفوذ آنتی‌سالونت به لایه‌های میانی و مزوپروس، تشکیل پروسکایت $FAPbI_3$ بر روی نانو ذرات TiO_2 در مقایسه با روش دو مرحله‌ای از کیفیت مناسبی برخوردار نمی‌باشد.

۶- منابع

[1] Yin, W. J., Shi, T., & Yan, Y. (2014). Unique properties of halide perovskites as possible origins of the superior solar cell performance. Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.), *26*(27), 4653-4658.
[2] Lee MM, Teuscher J, Miyasaka T, Murakami TN, Snaith HJ. Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites. Science. 2;338(6107):643-647, 2012.
[3] Eperon, G. E., et al. (2014). "Formamidinium lead trihalide: a broadly tunable perovskite for efficient planar heterojunction solar cells." Energy & Environmental Science, 7, 982–988.
[4] Snaith, H. J. (2013). "Perovskites: the emergence of a new era for low-cost, high-efficiency solar cells." The Journal of Physical Chemistry Letters, 4, 3623–3630.
[5] Mei, A., et al. (2014). "A hole-conductor–free, fully printable mesoscopic perovskite solar cell with high stability." Science, 345, 295–298.
[6] Saliba, M., et al. (2016). "Incorporation of rubidium cations into perovskite solar cells improves photovoltaic performance." Science, 354, 206–209.
[7] Yang, W. S., et al. (2017). "Iodide management in formamidinium-lead-halide–based perovskite layers for efficient solar cells." Science, 356, 1376–1379.
[8] Kim, H. S., et al. (2018). "High-efficiency perovskite solar cells via improved light management." Advanced Functional Materials, 28(19), 1800142.
[9] Zhang, Y., et al. (2019). "Influence of environmental factors on the stability of perovskite solar cells: A review." Renewable and Sustainable Energy Reviews, 101, 163-178.
[10] Liu, Y., et al. (2020). "Additive engineering for high-performance perovskite solar cells." Energy & Environmental Science, 13, 1191–1210.