

سلول‌های خورشیدی پروسکایتی

فاطمه اسماعیل زاده کلنتری^۱، نفیسه شریفی^۲

^۱پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه کاشان

^۲دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان

چکیده

یکی از انواع سلول‌های خورشیدی که اخیراً به دلیل خواص متمایزی مانند بازده تبدیل بالا، ساخت آسان و هزینه‌ی پایین مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته، سلول‌های خورشیدی پروسکایتی است. این نوع سلول‌های خورشیدی توانستند بعد از معرفی در سال ۲۰۰۹ با بازدهی ۳/۸٪، به بازدهی ۲۲/۱٪ در سال ۲۰۱۶ دست یابند. در این مقاله ما به معرفی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی هالید آلی-فلزی، اجزای سازنده‌ی آن و بررسی معایب و مزایای این نوع سلول می‌پردازیم و در ادامه، تحقیقاتی که اخیراً در این زمینه انجام شده است را مرور می‌کنیم.

واژه‌های کلیدی: سلول‌های خورشیدی پروسکایتی، پروسکایت، TiO_2

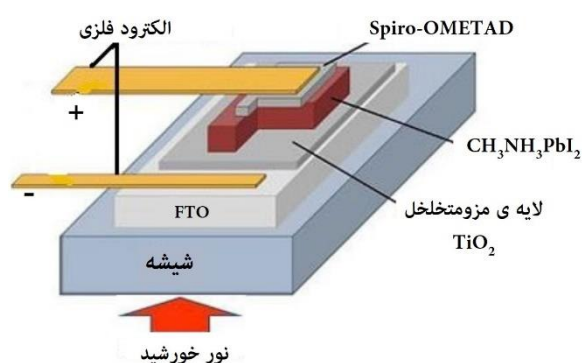
ایمیل نویسنده مسئول : sharifi@kashanu.ac.ir

۱- مقدمه

۲- ساختار و عملکرد PSCs

۲-۱- ساختار PSCs

همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، PSCs از بخش‌های مختلف تشکیل شده است [1] که برای به‌دست آوردن یک سلول با بازدهی و پایداری بالا، مواد هر بخش، باید خواص نوری و الکتریکی مناسبی داشته باشد. در ادامه هر یک از اجزا به‌طور مختصر معرفی می‌شود.



شکل ۱. طرح‌واره PSCs

۲-۱-۱- شیشه رسانای شفاف^۲

در PSCs، معمولاً از شیشه پوشش داده شده با یک لایه‌ی نازک اکسیدی شفاف و رسانا (TCO) به‌عنوان زیرلایه^۱ استفاده می‌شود

امروزه بحران انرژی و آلودگی هوا، دو چالش مهم جهانی محسوب می‌شوند. استفاده از انرژی خورشید به‌عنوان یک منبع انرژی پاک و تجدیدپذیر و تبدیل آن به جریان الکتریکی، راه‌حلی برای این دو چالش است. هدف محققان توسعه‌ی سیستمی است که بتواند انرژی خورشید را با یک روش ساخت ساده، آسان و کم-هزینه به جریان الکتریکی تبدیل کند. سلول‌های خورشیدی را براساس فناوری ساخت، به سه دسته‌ی نسل اول، نسل دوم و نسل سوم تقسیم می‌کنند. فناوری نسل اول، بر پایه‌ی ویفرهای سیلیکونی با ساختار بلوری یا چندبلوری بنا شده است. بالاترین بازده ثبت شده ۲۵/۶٪ است [1]. اغلب سلول‌های موجود در بازار از این نوع هستند. فناوری نسل دوم، شامل سلول‌های خورشیدی لایه نازک مانند سیلیکون‌های آمورف، کادمیوم تلورید (Cd-Te) و مس-ایندیم-گالیم-سلناید (CIGS) می‌باشد. بهترین بازده ثبت شده ۲۱٪/۷ برای سلول خورشیدی CIGS است. نسل سوم سلول‌های خورشیدی بر پایه‌ی نانوساختارها هستند که عبارت‌اند از: سلول‌های خورشیدی آلی، رنگدانه‌ای، پلیمری، نقطه کوانتومی، پروسکایتی^۱ (PSCs) و مبتنی بر کریستال‌های مایع [1]. در این مقاله ما به بررسی ساختار و عملکرد PSCs می‌پردازیم و تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده است را مرور می‌کنیم.

^۱ Perovskite Solar Cells (PSCs)

^۲ Transparent Conductive Oxide (TCO)

[5]. پیش‌ماده‌های متداول برای ساخت پروسکایت، سرب یدید (PbI_2) و نمک متیل‌آمونیم‌یدید (CH_3NH_3I) است [1]. ابتدا سرب‌یدید در حلال دی‌متیل‌فرماید (DMF) و با استفاده از روش لایه‌نشانی چرخشی روی زیرلایه، لایه‌نشانی می‌شود. **Error! Reference source not found.** (الف) و بعد در محلول متیل‌آمونیم‌یدید در ایزوپروپانول به روش لایه‌نشانی غوطه‌وری (**Error! Reference source not found.** ب) یا چرخشی لایه‌نشانی می‌شود [6].

۳-۱-۲- لایه‌ی انتقال دهنده‌ی حفره

لایه‌ی بعدی که روی اجزای گفته شده قرار می‌گیرد HTL است که بایستی تراز انرژی بالاترین اوربیتال مولکولی دارای الکترون HOMO^{۱۴} مربوط به ماده‌ی انتقال دهنده حفره، HTM^{۱۵} با انرژی نوار ظرفیت^{۱۶} پروسکایت تطابق داشته باشد. تحرک‌پذیری مناسب برای حفره و پایداری حرارتی و فوتوشیمیایی نیز از دیگر ویژگی‌های HTM است. ضخامت HTL را ۱۰۰-۲۰۰ nm انتخاب می‌کنند تا مانع تماس مستقیم پروسکایت و الکتروده فلزی بشود و در نتیجه بازترکیب بار را به حداقل برساند.

بهترین و متداول‌ترین ماده‌ی مورد استفاده به‌عنوان HTM، اسپایروامتد^{۱۷} است. حلالیت، پتانسیل یونی‌زاسیون و شفاف بودن در رنج طیف مرئی از ویژگی‌های خوب این ترکیب پلیمری است که باعث می‌شود گزینه مناسبی باشد. از PSS و NiO_2 ^{۱۸}، PEDOT^{۱۹} نیز می‌توان به‌عنوان HTM استفاده کرد [2]. اما ترکیب پلیمری اسپایروامتد بسیار گران‌قیمت است و در شرایط محیطی به سرعت تخریب می‌شود. بنابراین طول عمر PSCs را به چند ماه کاهش می‌دهد. اگر این ماده به طور خالص استفاده شود؛ رسانندگی آن بسیار اندک است و برای بهبود عملکرد آن از نمک‌هایی بر پایه‌ی کبالت و لیتیم مانند LiTFSI و TBP استفاده می‌شود [1].

۴-۱-۲- الکتروده فلزی

آخرین لایه، معمولاً یک لایه‌ی فلزی با هدایت بالا و از جنس طلا یا نقره است [4]. لایه‌نشانی طلا یا نقره با استفاده از روش‌های تبخیر حرارتی و اسپاترینگ انجام می‌شود. ضخامت این لایه معمولاً بیشتر از ۵۰ نانومتر است و گاهی اوقات برای دست‌یابی به اتصال بهتر یک لایه نقره بر روی طلا لایه‌نشانی می‌شود. این لایه را با کربن نیز می‌توان جایگزین کرد [7].

که TCO دارای شکاف انرژی بزرگی است تا فوتون‌های تابیده بدون جذب در این لایه به داخل سلول خورشیدی وارد شوند و به لایه‌ی فعال برسند. انواع TCOهای مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی FTO^۲ یا ITO^۳ است؛ که استفاده از FTO به دلیل مقاومت بیشتر در برابر خوردگی، درصد عبور بیشتر نور مرئی، مقاومت الکتریکی پایین‌تر و میزان جذب رطوبت کمتر متداول‌تر است.

۲-۱-۲- لایه‌ی فعال

لایه‌ی فعال از لایه‌ی انتقال دهنده الکترون^۴ (ETL) و لایه‌ی جاذب نور تشکیل شده است. ETL باید دارای خاصیت تابع کار مناسب، هدایت بالا و نرخ بازترکیب پایین بر روی سطح باشد [3]. ETL نیز شامل لایه‌ی فشرده (سدی) و لایه‌ی مزومتخلخل TiO_2 است. وظیفه لایه‌ی فشرده (سدی) پوشش‌دهی سطح FTO است تا مانع از بازگشت الکترون از FTO به لایه‌ی انتقال دهنده حفره^۵ (HTL)؛ و بازترکیب الکترون و حفره‌ی موجود در HTL شود. لایه‌ی مزومتخلخل TiO_2 حاوی نانوذرات ۲۰ نانومتری است که مسیری برای ترابرد^۶ الکترون به TCO است. این لایه به دلیل سطح ویژه بالایی که دارد سبب می‌شود که ماده‌ی جاذب کننده نور به میزان قابل توجهی روی این لایه قرار بگیرد.

به جای استفاده از TiO_2 می‌توان از ترکیباتی مانند ZnO ، $TiCl_4$ ، $PCBM$ ^۷، Zn_2SnO_4 و SnO_2 استفاده کرد که بهترین انتخاب برای ETL همان TiO_2 است [3]. در سال‌های اخیر برخی از محققان برای دست‌یابی به لایه‌ای با کیفیت، از روش‌های مختلفی مانند لایه‌نشانی چرخشی^۸، اسپری پایرولیز^۹، رسوب لایه‌ی اتمی^{۱۰}، آب‌کاری^{۱۱}، اکسیداسیون حرارتی^{۱۲} و روش کمکی نقطه کوانتومی^{۱۳} استفاده کرده‌اند [4].

لایه‌ی جاذب نور متشکل از ماده‌ی پروسکایت است که بایستی شکاف انرژی نوری مناسب داشته باشد تا فوتون‌های گستره وسیعی از طیف خورشید را جذب کند. ضریب جذب نوری بالا، بازده کوانتومی بالا برای حامل‌های تهییج‌شده، طول نفوذ بیشتر حامل‌های بار و سرعت بازترکیب پایین از دیگر ویژگی‌های این لایه است [1].

$CH_3NH_3PbI_3$ ، $CH_3NH_3PbI_{3-x}Cl_x$ ، $CH_3NH_3PbI_2Cl$ ، $CH_3NH_3PbBr_3$ و $CH_3NH_3Pb(I_{1-x}Br_x)_3$ از جمله پروسکایت‌هایی هستند که در ساخت PSCs به‌کار برده می‌شوند

¹ Substrates

² Fluorine doped Tin Oxide (FTO)

³ Indium Tin Oxide (ITO)

⁴ Electron Transport Layer (ETL)

⁵ Hole Transporting Layer (HTL)

⁶ Transport

⁷ Phenyl C₆₁ Butyric acid Methyl (PCBM)

⁸ Spin coating

⁹ Spray pyrolysis

¹⁰ Atomic layer deposition

¹¹ Electrodeposition

¹² Thermal oxidation

¹³ Quantum dots-assisted method

¹⁴ Highest Occupied Molecular Orbital (HOMO)

¹⁵ Hole Transporting Material (HTM)

¹⁶ Valence Band Energy (VBE)

¹⁷ Spiro-OMETAD

¹⁸ poly-triarylamine (PTAA)

¹⁹ Poly Ethylene Di Oxy Thiophene:PolyStyrene

Sulfonate (PEDOT:PSS)



شکل ۲. روش لایه‌نشانی پروسکایت به روش غوطه‌وری

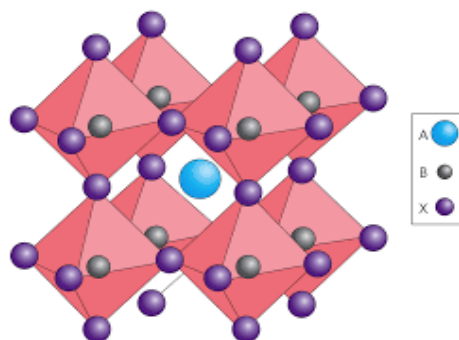
۲-۲- نقاط قوت و ضعف PSCs

بازده تبدیل بالا، هزینه ساخت پایین، مراحل ساخت آسان، جذب نور بالا، نرخ پایین بازترکیب حامل‌های غیرتابشی و امکان تغییر خواص فوتوالکترونیکی با اصلاح ساختار شیمیایی سطح از نقاط قوت PSCs به حساب می‌آید [1]. استفاده از مواد گران‌قیمت و کم‌یاب مانند اسپایروامتد، اعمال درجه حرارت بالا، ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، برای پخت لایه‌ی TiO_2 ، نرخ نسبتاً کند انتقال الکترون از پروسکایت به TiO_2 و عدم پایداری در طولانی مدت از نقاط ضعف PSCs به حساب می‌آید [8].

کیفیت و خلوص مواد اولیه، روش‌های لایه‌نشانی مناسب، استفاده از حلال‌های بدون آب، ضخامت لایه‌ها، ساختار میکروسکوپی و تبلور لایه‌ی پروسکایت تاثیر مهمی بر عملکرد PSCs دارد. ریخت لایه‌ی پروسکایت بر جدایی اکسیژن‌ها، انتقال بار و بازترکیب اثرگذار است. تبلور کم در لایه‌ی پروسکایت، منجر به نشت بار می‌شود و در نتیجه اثر منفی روی دینامیک حرکت بارها در PSCs دارد. با توجه به مکانیسم رشد بلوری پیچیده مواد، کنترل دقیق ریخت و تبلور لایه‌ی پروسکایت هم‌چنان یک چالش مهم محسوب می‌شود [9].

۳-۲- ساختار پروسکایت

پروسکایت با فرمول ABX_3 ، دارای ساختار مکعبی شکل است [10] (شکل).



شکل ۳. ساختار شبکه‌ی پروسکایت با فرمول شیمیایی ABX_3 . A: متیل‌آمونیم، اتیل‌آمونیم و فرم‌آمیدینیوم. B: کاتیون‌های فلزی دوظرفیتی مانند Sn و Pb. X: هالوژن‌ها [10].

پروسکایت‌ها ترکیبات معدنی با فرمول CaTiO_3 هستند که در سال ۱۸۳۱ توسط زمین‌شناس روسی لئو پروسکی^۲ کشف شدند [1]. A در ساختار بلوری، می‌تواند یون‌های قلیایی، قلیایی خاکی یا خاکی کم‌یاب (شامل گروه‌های آلکیل‌آمونیم آلی مانند متیل-آمونیم^۳، $(\text{CH}_3\text{NH}_3)^+$ ، اتیل‌آمونیم، $(\text{CH}_3\text{CH}_2\text{NH}_3)^+$ و در موارد خاصی فرم‌آمیدینیوم^۴، $(\text{NH}_2\text{CH}=\text{NH}_2)^+$)، باشد [5]. همین‌طور فلزات واسطه شامل کاتیون‌های فلزی دو ظرفیتی مثل، Co^{2+} ، Fe^{2+} ، Mn^{2+} ، Cr^{2+} ، Pd^{2+} ، Cd^{2+} ، Ge^{2+} ، Cu^{2+} ، Ni^{2+} ، Eu^{2+} ، Sn^{2+} و Pb^{2+} معمول‌ترین گزینه برای اشغال موقعیت-های B در پروسکایت به‌شمار می‌روند [4]، که بالاترین بازدهی‌ها با استفاده از Pb به‌دست آمده است. در مورد عنصر Sn به این نکته باید اشاره کرد که در حضور یدید، اکسید می‌شود و در نتیجه سلول پایداری نخواهیم داشت. X می‌تواند آنیون‌هایی مانند هالیدها $(\text{Cl}^-, \text{I}^-, \text{Br}^-, \text{F}^-)$ ، PF_6^- ، BF_4^- و SCN^- باشد [4]. پروسکایت‌های متعارف می‌توانند به‌صورت پروسکایت اکسید معدنی، پروسکایت هالید قلیایی و پروسکایت‌های هالید آلی-فلزی باشند. با توجه به تنوع هالیدها، برای به‌دست آوردن سلول‌هایی با بازدهی بالا، از پیش‌سازهای هالیدی مخلوط، برای تشکیل لایه‌های پروسکایت، استفاده می‌کنند [4]. در حال حاضر، سلول‌های خورشیدی شامل پروسکایت رایج با فرمول $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ یا $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ است که از نظر بازده و پایداری بهترین سلول‌های خورشیدی به‌شمار می‌آیند [9].

با تغییر ترکیب A، B و X طیف جذب، شکاف انرژی و ترازهای انرژی نوار هدایت و ظرفیت تغییر می‌کند [1] و می‌توان انتقال الکترون از پروسکایت به ETL را مهندسی و بهینه کرد.

۴-۲- عملکرد PSCs

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است؛ نور از سمت لایه‌ی فعال به PSC وارد می‌شود و با عبور از لایه‌ی مزومتخلخل TiO_2 ، به ماده‌ی جاذب پروسکایت می‌رسد. پروسکایت، فوتون‌هایی که انرژی‌شان برابر یا بیش‌تر از شکاف انرژی خود است را جذب می‌کند و زوج الکترون-حفره تولید می‌شود (مرحله ۱ شکل ۴). الکترون‌هایی که بعد از تهییج، در نوار رسانش پروسکایت حضور دارند به دلیل این‌که نوار رسانش لایه‌ی مزومتخلخل TiO_2 نسبت به نوار رسانش پروسکایت منفی‌تر است؛ به نوار رسانش TiO_2 منتقل می‌شوند (مرحله ۲ شکل ۴). در سمت دیگر سلول، حفره‌ها به داخل تراز HOMO اسپایروامتد که نسبت به نوار ظرفیت پروسکایت مثبت‌تر است می‌روند (مرحله ۳ شکل ۴). به این ترتیب در فصل مشترک لایه‌ی پروسکایت و لایه‌ی TiO_2 ، الکترون و حفره از یکدیگر جدا می‌شوند و از بازترکیب زوج الکترون-حفره تولید شده در پروسکایت، جلوگیری می‌شود. الکترون‌هایی که به لایه‌ی TiO_2 منتقل شده‌اند با استفاده از پدیده پخش در این لایه ترابرد می‌کنند و با رسیدن به

² L.A. Perovski

³ Methyl Ammonium (MA)

⁴ Form Amidinium (FA)

¹ Morphology

به منظور بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی و افزایش پایداری آن‌ها، استفاده از نانو مواد کربنی با رسانندگی بالا و پایداری شیمیایی مناسب، در قسمت‌های مختلف سلول گزارش شده است که می‌توان به استفاده از کربن به عنوان الکتروود و HTM، قرار دادن GQD^۳ بین پروسکایت و لایه‌ی TiO_2 و آلایش گرافن در لایه‌ی سدی TiO_2 اشاره کرد. با استفاده از کربن در الکتروود فلزی بازدهی از ۶۴/۶٪ به ۱۰۶/۶٪ افزایش می‌یابد که با بهینه کردن ضخامت کربن بازدهی ۱۱۶/۶٪ به دست می‌آید. با استفاده از کاند کربنی متخلخل نیز می‌توان بازدهی ۱۲۸/۱٪ را مشاهده کرد [8].

در سال ۲۰۱۶ گروهی از محققان برای بهبود پایداری ETL در برابر پرتوی فرابنفش نور خورشید، از نیم‌رسانای پروسکایتی La-doped BaSnO_3 (LBSO) با شکاف انرژی ۳/۲ eV؛ به جای لایه‌ی مزومخلخل TiO_2 استفاده کرده‌اند. در کنار این مشخصه، نیم‌رسانای پروسکایتی LBSO، در مقایسه با TiO_2 دارای تمایزهایی است که می‌توان به تحرک پذیری بسیار بالای الکترون‌ها با مقدار $320 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ در دمای اتاق (تحرک پذیری TiO_2 از مرتبه 10^{-5} است)، نرخ بازترکیب پایین و چگالی الکترونی بیشتر اشاره کرد. همچنین کمینه نوار رسانش این نیم‌رسانا در موقعیت بالاتری نسبت به کمینه نوار رسانش TiO_2 قرار گرفته است که نرخ انتقال الکترون را تسریع می‌کند. بنابراین در این پژوهش، با تغییر ماده‌ی ETL از TiO_2 به نیم‌رسانای LBSO، بازدهی از ۱۹۷/۷٪ به مقدار ۲۱۳/۳٪ افزایش یافت [3]. جدول ۱ مشخصه‌های فوتوولتائی سلول‌های معرفی شده را نشان می‌دهد.

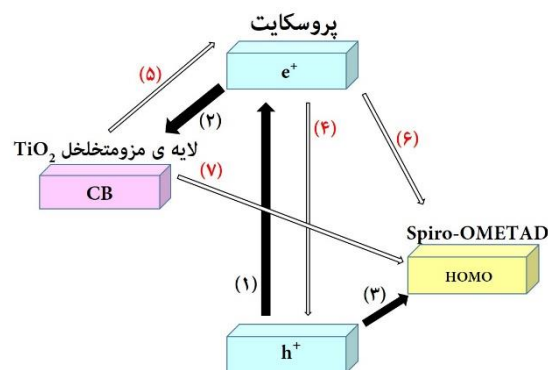
جدول ۱. بررسی مشخصه‌های فوتوولتائی PSCs

مشخصه‌های فوتوولتائی	PCE	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF
مهندسی فصل مشترک	۱۲٪/۲۷	۸۸۴	۲۰/۴۱	۶۸٪/۰۱
پروسکایت سه کاتیونی Cs/MA/FA	۱۹٪/۲۰	۱۱۳۲	۲۱/۸۶	۷۴٪/۸
استفاده از نانو مواد کربنی	۱۲٪/۸۰	۸۶۰	۲۲/۸	۶۶٪
استفاده از LBSO به عنوان ETL	۲۱٪/۳	۱۱۲۰	۲۳/۴	۸۱٪/۳

³ Graphen Quantum Dot

فصل مشترک شیشه رسانا و لایه‌ی TiO_2 ، به شیشه رسانا منتقل و به مدار خارجی وارد می‌شوند. اگر دو سر انتهایی سلول با سیم به یکدیگر متصل شوند، الکترون‌هایی که به مدار خارجی منتقل شده‌اند به کمک سیم و الکتروود فلزی به HTL می‌رسند و جریان اتصال کوتاه^۱ شکل می‌گیرد.

در عمل انتقال‌های ناخواسته بار نیز رخ می‌دهد که می‌توان به بازترکیب زوج الکترون-حفره در پروسکایت (مرحله ۴ شکل ۴)، انتقال الکترون از نوار رسانش لایه‌ی مزومخلخل TiO_2 به نوار رسانش پروسکایت (مرحله ۵ شکل ۴)، انتقال الکترون از نوار رسانش پروسکایت به تراز HOMO اسپایروامتد (مرحله ۶ شکل ۴) و انتقال الکترون از نوار رسانش لایه‌ی مزومخلخل TiO_2 به تراز HOMO اسپایروامتد (مرحله ۷ شکل ۴) اشاره کرد [11].



شکل ۴. فرآیندهای مطلوب و ناخواسته از نوع انتقال بار در PSCs

۳. مروری بر تحقیقات انجام شده بر روی PSCs

مهندسی فصل مشترک لایه‌های جاذب (پروسکایت $(\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x)$ و لایه‌ی مزومخلخل TiO_2 و بررسی اثر غلظت $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ روی میکروساختار لایه‌ی $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ و خواص فوتوالکترونیکی در PSCs یکی از موارد پژوهشی است. نتایج نشان می‌دهد انتخاب غلظت مناسب $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ می‌تواند جذب نور خورشید و بازده کوانتومی خارجی EQE^۲ را در طول موج‌های کمتر از ۶۰۰ nm بهبود ببخشد و نرخ بازترکیب را کاهش و انتقال موثر بار را افزایش دهد که در نتیجه عملکرد سلول بهبود پیدا کرده است که بدین ترتیب بازدهی از ۹۶/۸٪ به مقدار ۱۲۸/۲۷٪ افزایش یافته است [9].

برای بهبود پایداری پروسکایت، تکرارپذیری بالا و کارایی بالای PSCs، استفاده از کاتیون‌های سه‌گانه‌ی Cs/MA/FA گزارش شده است. پروسکایت‌های سه کاتیونی دارای پایداری حرارتی بالا هستند و کمتر تحت تأثیر نوسانات محیط مانند دما و در نتیجه تبخیر حلال قرار می‌گیرند و مراحل ساخت سلول به صورت تکرارپذیر ممکن می‌شود که بازدهی نیز از ۱۶۳/۳۷٪ به ۱۹۷/۲۰٪ افزایش می‌یابد [4].

¹ Short-Circuit Current (J_{sc})

² External Quantum Efficiency

۴. جمع بندی

PSCs یکی از انواع سلول‌های خورشیدی نانوساختار هستند که در مدت کوتاهی بازدهی آن‌ها افزایش قابل ملاحظه یافت. این سلول، از بخش‌های مختلفی مانند زیرلایه رسانای شفاف، لایه‌ی فعال که خود شامل ETL (لایه‌ی سدی و لایه‌ی مزومتخلخل TiO_2) و لایه‌ی جاذب نور است؛ HTL و الکتروود فلزی تشکیل شده است.

PSCs به دلیل هزینه‌ی ساخت کم، روش‌های ساخت آسان (مانند روش‌های دکتر بلید، چرخشی و غوطه‌وری) با بازدهی ۲۲٪/۱ سلول‌های خورشیدی سیلیکونی قابل مقایسه هستند. عاملی که مانع از تجاری شدن PSCs می‌شود عدم تکرارپذیری در ساخت و ناپایداری این نوع سلول در طولانی مدت است. مکانیسم‌های تخریب سلول نیاز به تحقیقات بیشتری دارد. محققان معتقدند رطوبت، اکسیژن و نور فرابنفش (UV) عوامل اصلی تجزیه‌ی پروسکایت در هوای محیط هستند. اگرچه می‌توان عوامل تخریب را با استفاده از پوشش ضدآب، فیلتر پرتو فرابنفش و پوشش‌های حفاظت در برابر اکسیژن، کاهش داد یا از بین برد اما هزینه‌های ساخت افزایش می‌یابد که پژوهش برای حل این مسائل هم‌چنان در حال انجام است.

مراجع:

- [5] Y.-C. Hsiao, T. Wu, M. Li, Q. Liu, W. Qin, and B. Hu, "Fundamental physics behind high-efficiency organo-metal halide perovskite solar cells," *J. Mater. Chem. A*, vol. 3, no. 30, pp. 15372–15385, 2015.
- [6] P. Vivo, A. Ojanperä, J. Smått, S. Sandén, S. G. Hashmi, K. Kaunisto, P. Ihalainen, M. T. Masood, R. Österbacka, P. D. Lund, and H. Lemmetyinen, "Influence of TiO_2 compact layer precursor on the performance of perovskite solar cells," *Org. Electron.*, vol. 41, pp. 287–293, Feb. 2017.
- [7] J. Kim, N. Park, J. S. Yun, S. Huang, M. A. Green, and A. W. Y. Ho-Baillie, "An effective method of predicting perovskite solar cell lifetime—Case study on planar $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ and $\text{HC}(\text{NH}_2)_2\text{PbI}_3$ perovskite solar cells and hole transfer materials of spiro-OMeTAD and PTAA," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 162, pp. 41–46, Apr. 2017.
- [8] M. Batmunkh, C. J. Shearer, M. J. Biggs, and J. G. Shapter, "Nanocarbons for mesoscopic perovskite solar cells," *J. Mater. Chem. A*, vol. 3, no. 17, pp. 9020–9031, 2015.
- [9] W. Wang, Z. Zhang, Y. Cai, J. Chen, J. Wang, R. Huang, X. Lu, X. Gao, L. Shui, S. Wu, and J.-M. Liu, "Enhanced performance of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ perovskite solar cells by $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ modification of TiO_2 -perovskite layer interface," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 11, no. 1, p. 316, Dec. 2016.
- [10] M. A. Green, A. Ho-Baillie, and H. J. Snaith, "The emergence of perovskite solar cells," *Nat. Photonics*, vol. 8, no. 7, pp. 506–514, Jun. 2014.
- [11] A. Marchioro, J. Teuscher, D. Friedrich, M. Kunst, R. van de Krol, T. Moehl, M. Grätzel, and J.-E. Moser, "Unravelling the mechanism of photoinduced charge transfer processes in lead iodide perovskite solar cells," *Nat. Photonics*, vol. 8, no. 3, pp. 250–255, Jan. 2014.
- [1] N. H. Tiep, Z. Ku, and H. J. Fan, "Recent Advances in Improving the Stability of Perovskite Solar Cells," *Adv. Energy Mater.*, vol. 6, no. 3, p. 1501420, Feb. 2016.
- [2] H.-H. Wang, Q. Chen, H. Zhou, L. Song, Z. S. Louis, N. De Marco, Y. Fang, P. Sun, T.-B. Song, H. Chen, and Y. Yang, "Improving the TiO_2 electron transport layer in perovskite solar cells using acetylacetonate-based additives," *J. Mater. Chem. A*, vol. 3, no. 17, pp. 9108–9115, 2015.
- [3] S. S. Shin, E. J. Yeom, W. S. Yang, S. Hur, M. G. Kim, J. Im, J. Seo, J. H. Noh, and S. Il Seok, "Colloidally prepared La-doped BaSnO_3 electrodes for efficient, photostable perovskite solar cells," *Science (80-.)*, vol. 356, no. 6334, pp. 167–171, Apr. 2017.
- [4] M. Saliba, T. Matsui, J.-Y. Seo, K. Domanski, J.-P. Correa-Baena, M. K. Nazeeruddin, S. M. Zakeeruddin, W. Tress, A. Abate, A. Hagfeldt, and M. Grätzel, "Cesium-containing triple cation perovskite solar cells: improved stability, reproducibility and high efficiency," *Energy*