بررسی اثر سزیم روی کاهش هیسترزیس سلول‌های خورشیدی پروسکایتی

نسرین صلح طلب[۱]، وحید احمدی [۱،*]، بهرام عبدالهی نژند[۱،۳]،
[۱] ایران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده برق و کامپیوتر
[۲] ایران، تهران، جهاد دانشگاهی تربیت مدرس، گروه تکنولوژی نانوذرات

چکیده - علیرغم بازدهی بالای سلول‌های خورشیدی پروسکایتی و همچنین سهولت ساخت آن‌ها، شاهد هیسترزیس درنمودار جریان – ولتاژ این سلول‌ها هستیم. در این پژوهش نشان داده می شود که با اضافه کردن سزیم به ساختار پروسکایت $CH_3NH_3PbI_3$ هیسترزیس به میزان قابل توجهی کاهش می یابد. با توجه به اینکه به طور قطعی نمی‌توان در مورد منشا هیسترزیس در پروسکایت نظر داد، کاهش هیسترزیس در ساختار مورد بررسی قرار می گیرد. بنظر می رسد کوچک بودن شعاع مهاجرت یونی Cs نسبت به کاتون ارگانیک CH_3NH_3 و بهبود ترازهای تله ای پروسکایت موجب کاهش هیسترزیس است.

کلید واژه- هیسترزیس، سلول خورشیدی پروسکایت ، فوتوولتائیک، سزیم

Effect of Cs as an Additive on Hysteresis Reduction in Perovskite Solar Cell

Nasrin Solhtalab[1], Vahid Ahmadi[1,*], Bahram Abdollahi Najand[1,3]

[1] School of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran-Iran.
[3] Nanomaterial Research Group, Academic Center for Education, Culture, and Research (ACECR) at TMU, Tehran-Iran.

Abstract- Despite the high efficiency of the perovskite solar cells and the ease of their fabrication process, the presence of hysteresis is still known as an important challenge of the perovskite solar cells. In this study, it is shown that this undesirable phenomenon can be considerably mitigated by adding Cs to the structure of $CH_3NH_3PbI_3$. Although the exact reason of the hysteresis is still unknown, in this work, it is ascribed to the smaller radius of ionic migration of Cs, in comparison to organic cations such as CH_3NH_3 and improving the trap levels of perovskite.

Keywords: hysteresis, perovskite solar cell, photovoltaic, cesium

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

۱- مقدمه

سلول‌های خورشیدی پروسکایتی از سال ۲۰۰۹ توسط میاساکا و همکاران معرفی شدند[۱]. بازدهی این سلول‌ها با پیشرفت چشمگیری که داشته از ۳/۸٪ در سال ۲۰۰۹ ، به بیش از ۲۲٪ در حال حاضر رسیده است [۲]. ماده جاذب نور این سلول‌های خورشیدی به دلیل ضریب جذب بالا و طول نفوذ بالای حامل و حداقل بازترکیب، بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است. تاکنون تغییراتی در ساختار سلول و مورفولوژی لایه‌ها و روش‌های ساخت سلول برای بهبود عملکرد سلول‌ها صورت گرفته است. با این حال مشکلات مهمی از جمله پدیده هیسترزیس در منحنی جریان-ولتاژ این سلول‌ها وجود دارد. تفاوت زیادی بین منحنی جریان-ولتاژ سلول های پروسکایتی به دست آمده از اسکن مستقیم (از حالت اتصال کوتاه به مدار باز) و اسکن معکوس (از حالت مدار باز به اتصال کوتاه) وجود دارد که به آن رفتار هیسترزیس سلول گفته می‌شود. اثر هیسترزیس مشاهده شده در سلول های خورشیدی پروسکایتی مانع بزرگی برای دستیابی به حداکثر بازدهی و عملکرد سلول است.

در این تحقیق به بررسی اثر سزیم در کاهش هیسترزیس سلول های خورشیدی پرداخته می شود و نشان داده شده است که سزیم با کاهش تله های الکترونی و همچنین کاهش شعاع مهاجرت یونی سبب کاهش هیسترزیس در سلول های خورشیدی پروسکایت می شود.

۲- روش آزمایش

۲-۱- ساخت افزاره

شیشه لایه نشانی شده با FTO به عنوان بستر مورد استفاده قرار گرفت. لایه FTO به روش شیمیایی با استفاده از پودر روی و HCl الگودهی شد و سپس تحت التراسونیک با آب یون‌زدایی شده (DI) و مایع شستشو و دوپروپانول شستشو شد. وقتی که نمونه‌ها خشک شد یک لایه سدکننده حفره TiO_2 با روش لایه‌نشانی چرخشی محلول اسیدی ایزوپروپکساید تیتانیوم که در اتانول حل شده لایه نشانی شد و سپس در دمای ۵۰۰ درجه سانتی-گراد به مدت ۳۰ دقیقه پخت داده شد. نمونه ها را در محلول ۴۰ میلی مولار $TiCl_4$ در دمای ۷۰ درجه سانتی-گراد به مدت ۳۰ دقیقه غوطه‌ور می‌کنیم و بعد از آن دوباره به مدت ۳۰ دقیقه تحت دمای ۵۰۰ درجه سانتی-گراد حرارت می‌دهیم. به این ترتیب لایه فشرده یکنواختی به دست می‌آید که مانع اتصال کوتاه شدن الکترود طلا و لایه FTO می‌شود.

۲-۲- روش لایه نشانی پروسکایت

لایه پروسکایت به روش چرخشی تک مرحله‌ای، لایه-نشانی شد که در آن ۲۳۰ میلی گرم پودر یدید سرب(PbI_2) و ۷۹/۵ میلی گرم پودر متیل آمونیوم یدید(MAI) در 1 ml حلال DMF حل می‌شوند. بعد از لایه نشانی پروسکایت نمونه ها به مدت ۳ دقیقه در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و ۵ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت حرارت قرار گرفتند. همچنین برای بررسی اثر سزیم بر عملکرد سلول، ۱۰۴ میلی گرم (۰/۴ مولار) پودر سزیم یدید(CsI) را به محلولی که دقیقا با همان مقادیر PbI_2 و MAI بالا آماده شده بود، اضافه کردیم و روی نیمی دیگر از نمونه ها لایه نشانی کردیم.

۲-۳- لایه نشانی Spiro-OMeTAD و طلا

بعد از خنک شدن لایه پروسکایت در دمای اتاق، لایه انتقال دهنده حفره Spiro-OMeTAD به روش لایه نشانی چرخشی، لایه نشانی شد. در آخر لایه نازک طلا به ضخامت ۱۰۰ نانومتر با روش تبخیر حرارتی و با استفاده از ماسک لایه نشانی شد.

۲-۴- مشخصه‌یابی افزاره

برای مشخصه یابی جریان-ولتاژ از دستگاه شبیه ساز نور خورشید شریف سولار استفاده کردیم. همچنین برای مطالعه میکروساختار از اسکن میکروسکوپ الکترونی اثر میدانی(FE-SEM) استفاده شد. برای مطالعه نوری لایه های پروسکایت از آنالیز UV-vis Spectroscopy استفاده شد.

۳- نتایج و داده ها

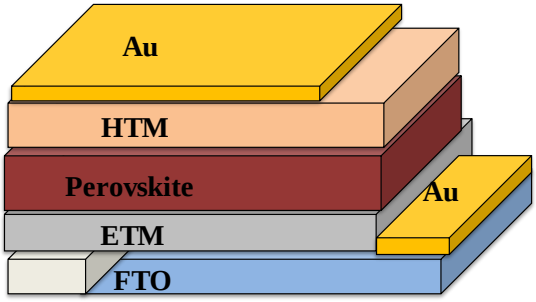
ساختاری که روی آن مطالعه می‌کنیم ساختار صفحه‌ای مستقیم FTO/c-TiO_2/PSK/SPIRO-OMeTAD/Au است که شماتیک آن در شکل ۱-الف و همچنین تصویر

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

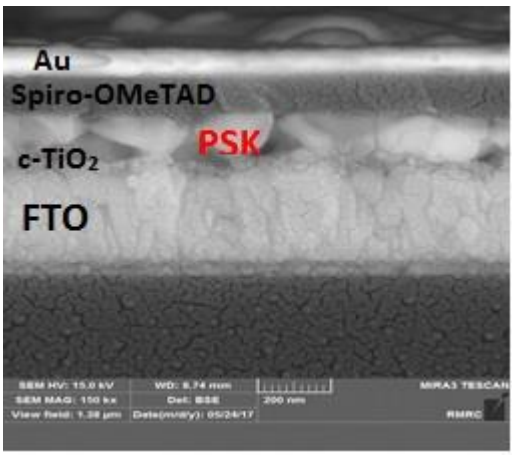
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

برشی عرضی آن در حالتی که پودر سزیم یدید به محلول اضافه کردیم، در شکل ۱-ب آمده است.

(الف)



(ب)



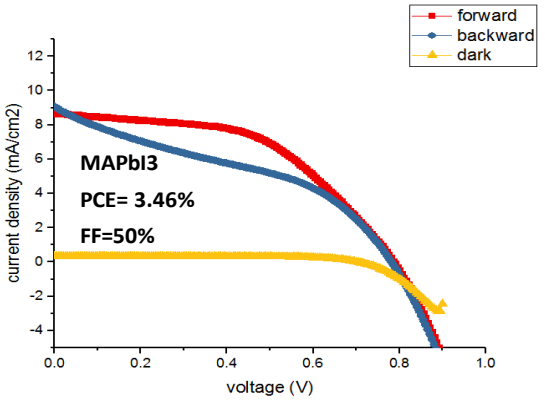
شکل ۱: (الف) شماتیک سلول خورشیدی با ساختار صفحه‌ای مستقیم. (ب) تصویر برش عرضی افزاره

۱-۳- هیسترزیس جریان-ولتاژ

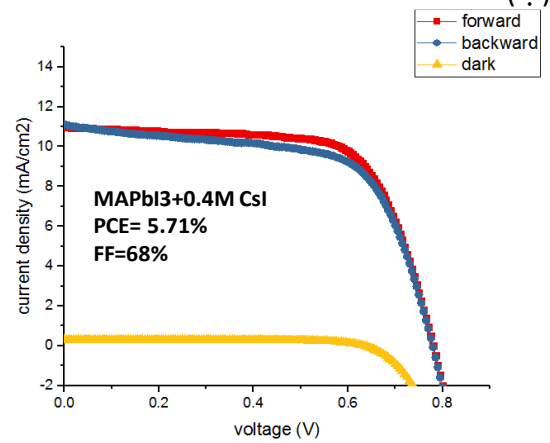
همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود، با افزودن سزیم، هیسترزیس به میزان قابل توجهی کاهش می یابد. نظریات متعددی برای توضیح منشاء هیسترزیس در پروسکایت ارائه شده است از جمله: جریان خازنی که به دلیل تجمع بار در سطح تماس دو لایه به وجود می-آید[۳]، به دام افتادن و آزاد شدن الکترون‌ها در نقص-هایی که در لایه فعال است[۴]، مهاجرت یون‌ها درون لایه پروسکایت[۵] و پلاریزاسیون فروالکتریک ماده پروسکایت[۶].

با وجود مطالعات زیادی که روی هسیترزیس صورت گرفته همچنان در مورد منشا این پدیده نمی‌توان با قطعیت سخن گفت. این امکان وجود دارد که کاتیون‌ها و آنیون‌ها از طریق نقص‌های کریستالی آزادانه در شبکه حرکت کنند. تحت ولتاژ مستقیم $MAPbI_3$ به صورت تجمع بارهای مثبت و منفی در نزدیکی لایه‌های انتقال دهنده‌ی الکترون و حفره قطبیده می‌شود. تجمع یون‌های مهاجرت کرده در فصل مشترک، پلاریته را تغییر می‌دهد و ادامه این تغییرات با اعمال ولتاژ در اسکن، باعث ایجاد رفتار هیسترزیس در منحنی جریان-ولتاژ می‌شود. از آنجایی که با افزودن سزیم به ساختار هیسترزیس کاهش پیدا کرده است می‌توان چنین تعبیر کرد که مهاجرت یونی در این ساختار نسبت به ساختاری که در آن فقط $MAPbI_3$استفاده شده، کاهش یافته است که دلیل آن می‌تواند کوچک‌تر بودن شعاع مهاجرت یونی Cs نسبت به کاتیون آلی باشد.

(الف)



(ب)



شکل ۲: نمودار جریان-ولتاژ افزاره در حالت (الف) بدون سزیم (ب) با سزیم.

تفاوت در هیسترزیس باعث تفاوت چشمگیر در مقدار FF و PCE می‌شود. با افزایش سزیم بازده و ضریب

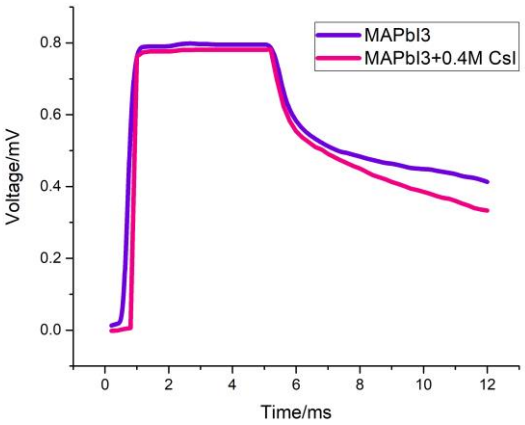
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

پرشوندگی نیز بهبود می یابد.

۲-۳- افت ولتاژ مدار باز

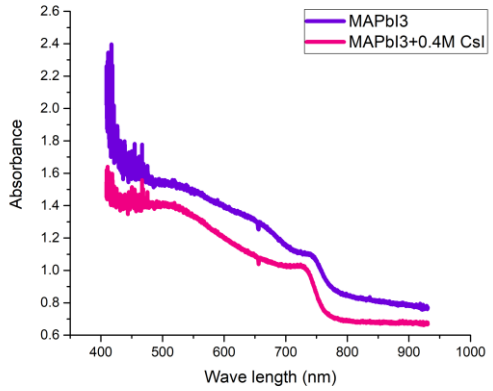
افت ولتاژ مدار باز می‌تواند ارتباط دقیق با هیسترزیس داشته باشد. وقتی که منبع نور خاموش می‌شود، حامل-های باری که در حین نوردهی در لایه پروسکایت تولید شدند، بازترکیب می‌شوند و باعث افت فوتوولتاژ می‌شوند . افت ولتاژ مدار باز در حالتی که سزیم در ساختار است با حالت بدون سزیم در شکل ۳ مقایسه شده است. در حالت بدون سزیم ولتاژ به کندی کاهش میابد که دلیل آن بارهای به دام افتاده درون ترازهای تله‌ای لایه پروسکایت است. با اضافه کردن سزیم به لایه جاذب پروسکایتی افت ولتاژ سریع تر اتفاق افتاد که دلیل آن را می‌توان بیشتر شدن میزان بازترکیب مستقیم حامل‌های بار دانست. در واقع سزیم ترازهای تله‌ای را کاهش داد که این تاثیر مستقیم روی کاهش هیسترزیس دارد.



شکل ۳: مقایسه افت ولتاژ مدار باز در حالتی که سزیم در ساختار است با حالتی که سزیم در ساختار نیست.

۳-۳- منحنی جذب

لبه جذب در حضور سزیم به سمت انرژی‌های بالاتر شیفت پیدا می‌کند که به معنی افزایش ناچیز گاف انرژی است.



شکل ۴: تغییرات جذب بر حسب طول موج در دو حالت با سزیم و بدون سزیم

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با مقایسه نمودار جریان-ولتاژ و همچنین نمودار افت ولتاژ مدار باز سلول ساخته شده بر پایه $MAPbI_3$ در حالت خاص و حالتی که ۰,۴ مولار سزیم یدید به آن اضافه شد، اثر سزیم بر کاهش هیسترزیس مشاهده شد. که این اثر با کوچک بودن شعاع مهاجرت یونی Cs و همچنین نقش سزیم در کاهش ترازهای تله‌ای توجیه شد.

سپاسگزاری

همکاران این تحقیق از همکاری فعال خانم فاطمه انصاری و خانم پریا نظری قدردانی می کنند.

مراجع

[1] A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, and T. Miyasaka, “Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 131, no. 17, pp. 6050–6051, 2009.

[2] W. S. Yang *et al.*, “Iodide management in formamidinium-lead-halide–based perovskite layers for efficient solar cells,” *Science (80-.).*, vol. 356, no. 6345, pp. 1376–1379, 2017.

[3] “Origin of J-V Hysteresis in Perovskite Solar Cells,” 2016.

[4] Y. Shao, Z. Xiao, C. Bi, Y. Yuan, and J. Huang, “Origin and elimination of photocurrent hysteresis by fullerene passivation in CH3NH3PbI3 planar heterojunction solar cells,” *Nat. Commun.*, vol. 5, pp. 1–7, 2014.

[5] W. Tress, N. Marinova, T. Moehln,. Nazeeruddin, and M. Grätzel, “Understanding the rate-dependent J–V hysteresis, slow time component, and aging in CH $_3$ NH $_3$ PbI $_3$ perovskite solar cells: the role of a compensated electric field,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 8, no. 3, pp. 995–1004, 2015

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]