

## مروری جامع بر روش‌های جلوگیری از خوردگی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی

مجید میرزایی<sup>۱\*</sup>، طیبه محبی<sup>۲</sup> و علیمراد رشیدی<sup>۳</sup>

۱. استادیار گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران.

۲. دانشجوی دکتری گروه شیمی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

۳. استاد مرکز توسعه فناوری نانو و کربن، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران.

دریافت: تیر ۱۴۰۲ بازنگری: مرداد ۱۴۰۲ پذیرش: مرداد ۱۴۰۲

 10.30495/JACR.2023.1991514.2142

### چکیده

در سال‌های اخیر، سلول‌های خورشیدی پروسکایتی (PSC) به دلیل مناسب بودن قیمت و عملکرد عالی، از امیدوارکننده‌ترین فناوری‌های فتوولتائیک هستند. با این حال، پروسکایت‌ها در برابر عامل‌هایی مانند رطوبت، اکسیژن، دما و بایاس الکتریکی، حساس هستند. تغییرها در ترکیب و ساختار مواد از پیش‌ساز تا پروسکایت به دست آمده منجر به نقص‌های گوناگونی می‌شود. در طول عملیات طولانی مدت، این نقص‌ها بیشتر به عنوان شروع کننده، موجب تخریب عملکرد PSC می‌شوند. از این رو، روش‌های متفاوتی برای واپاش این عامل‌ها طراحی شده‌اند که شامل حذف مکان‌های خوردگی در طول ساخت، از بین بردن مکان‌های خوردگی در حین کار دستگاه و جلوگیری از تماس بین محیط خورنده و پروسکایت مربوط است. در این مطالعه، طول عمر PSC از دیدگاه علم خوردگی بررسی شده است. در نهایت، بهره‌مندی از یک سری راهبرد های پادخوردگی (روبینش، پوشش سطح، ماشین کاری و . . .) در علم خوردگی، پایداری سلول‌های پروسکایت را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** پروسکایت‌ها، سلول خورشیدی، خوردگی، طول عمر، پادخوردگی.

### مقدمه

اپتوالکترونیکی عالی، قابلیت پردازش آسان، کاف‌های نوار قابل تنظیم و تحمل بالای نقص‌ها، یک نقطه تحول در مواد نیم‌رسانا بوده‌اند. سلول‌های خورشیدی پروسکایتی (PSC<sup>۱</sup>) در سال‌های اخیر با افزایش سریع کارایی تبدیل توان (PCE<sup>۲</sup>) تا

علم مواد از زمان خلقت بشر، توسعه تمدن‌ها را شکل داده است. پیدایش مواد جدید موجب ایجاد تغییرهای عمیق در جامعه و ارتقای پیشرفت تمدن بشری خواهد شد [۱]. در سال‌های اخیر، پروسکایت‌های هالید فلزی به دلیل ویژگی

1. Perovskite solar cells (PSC)

2. Power conversion efficiency (PCE)

وسعی از راهبردها را برای افزایش پایداری مواد پروسکایتی ارائه دهد. در طول فرایند پیرش سلول‌های خورشیدی پروسکایتی، محیط خورنده به عامل‌های تنش‌زا مانند اکسیژن، رطوبت، نور، گرما، میدان الکتریکی [۱۲ و ۱۳] و غیره اشاره دارد. فیلم رویین از نظر خوردگی به تشکیل خودبه‌خود یک لایه بسیار نازک اشاره دارد. فراورده خوردگی بر سطح فلز به‌عنوان مانعی برای واکنش‌های شیمیایی اضافی عمل می‌کند [۱۴]. فیلم رویین در کاهش آسیب خوردگی بسیار مفید است. تخریب مواد پروسکایتی را می‌توان با جلوگیری از تهاجم محیط خورنده (برای مثال، پوشش، مواد انتقال حامل فشرده (CTM<sup>۲</sup>)) و پوشینه‌دارکردن دستگاه، مهار کرد. نقش پوشش سطحی، CTM فشرده و پوشینه‌دارکردن دستگاه، مشابه نقش فیلم رویین است. به‌طورعمومی، اعتقاد بر این است که یک فیلم رویین خوب شکل‌گرفته بر سطح فلز محافظت مؤثری را ایجاد می‌کند. با این حال مکان‌های ضعیف در لایه غیرفعال می‌توانند در مکان‌های مرزهای دانه (۱)، ناجابه‌جایی (۲)، نقص یا آسیب‌های مکانیکی (۳) و ترکیب‌های بین فلزی (۴) ایجاد شوند که در نتیجه به موضع خوردگی تبدیل می‌شوند. برای خود مواد پروسکایتی، فرایند تخریب را می‌توان از راه کاهش نقص‌ها در لایه پروسکایت با راهبردهای معنی‌دار متفاوت مانند رویینش<sup>۳</sup>، ماشین‌کاری و آزادسازی تنش کاهش داد، زیرا نقص‌ها می‌توانند به‌عنوان محل شروع تخریب برای تهاجم محیطی، عمل کنند [۱۵ تا ۲۱].

در این مقاله مروری، چگونه راهبرد پادخوردگی فلزهای متداول که می‌تواند پایداری PSCها را افزایش دهد، بررسی شده است. ابتدا نقص‌ها معرفی شده‌اند که می‌توانند به‌عنوان مکان‌های اصلی شروع تخریب برای تهاجم رسانه‌های محیطی عمل کنند. سپس، راهبردهای طراحی شده برای کاهش نقص‌ها در طول ساخت، مانند رویینش، ماشین‌کاری و آزادسازی تنش،

۲۵/۷ درصد، پیشرفت چشمگیری را نشان داده‌اند که نزدیک به PCE پیشرفته ۲۶/۷ درصد است که با سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بلوری به‌دست می‌آید. با این حال، پروسکایت‌های هالید فلزی (MHPs<sup>۱</sup>) می‌توانند در برابر رطوبت، اکسیژن، دما، بایاس الکتریکی، روشنایی و تنش تخریب شوند که مانع تجاری‌سازی فناوری فتوولتائیک به‌دست‌آمده هستند [۲ و ۳]. پایداری ضعیف پروسکایت‌ها به‌طورعمده با تخریب بلورهای پروسکایتی در برابر عامل‌های تنش مرتب است. عامل‌های تنش‌زای پیرش را می‌توان به دو گروه بیرونی و ذاتی تقسیم کرد. عامل‌های تنش‌زای بیرونی تحت تأثیر گونه‌های محیطی مانند رطوبت و اکسیژن قرار می‌گیرند و عامل‌های تنش‌زای ذاتی شامل گرما، روشنایی و بایاس (مستقل از محیط محافظ یا بسته‌بندی دستگاه) است. در میان آن‌ها، تأثیر نامطلوب ناشی از عوامل بیرونی را می‌توان با اصلاح سطحی فیلم پروسکایتی و پوشینه‌دارکردن دستگاه‌های پروسکایتی، به کمینه رساند [۴ و ۵]. پیرش مواد پروسکایتی ناشی از عامل‌های ذاتی و بیرونی می‌تواند به‌طور همزمان اتفاق بیفتد. این ویژگی‌های پیرش مواد پروسکایتی با تعریف خوردگی مواد همخوانی کامل دارد. از پیش از دهه ۱۹۶۰، خوردگی به‌طورمعمول به‌عنوان تخریب فلزها همراه با یک فرایند الکتروشیمیایی تعریف می‌شود. در حال حاضر، این مفهوم برای بسیاری از انواع دیگر مواد قابل استفاده است که بیشتر به‌عنوان حمله به یک ماده به‌صورت الکتروشیمیایی، شیمیایی و اثرهای فیزیکی با محیط اطراف تعریف می‌شود [۶ و ۷]. برای مثال، می‌توان به تورم یا ترک خوردگی پلاستیک [۸ و ۹]، ترک خوردگی یا پوسیدگی چوب و کنده‌شدن سیمان و غیره اشاره کرد. بنابراین، خوردگی پروسکایتی مربوط به موادی است که در برابر آسیب یا تخریب ناشی از اثرات شیمیایی، الکتروشیمیایی و فیزیکی با حضور عوامل محیطی (اکسیژن، رطوبت، نور [۱۰ و ۱۱]، میدان الکتریکی و غیره) قرار می‌گیرند. علم خوردگی می‌تواند طیف

1. Metal halide perovskites (MHPs)

2. Compact carrier transport material (CTM)

3. Passivation

چندین راهبرد خودترمیم‌شوندگی درجا برای ازبین‌بردن پویا نقص‌های جدید ایجادشده در حین کار، ایجاد شده است.

#### روینش

روینش یک فرایند متداول برای محافظت در برابر خوردگی است که یک لایه محافظ ایجاد می‌کند. این لایه به-راحتی با محیط‌های خورنده واکنش شیمیایی نمی‌دهد. لایه‌های نازک پروسکایت به‌طورمعمول با فرایند محلول تهیه می‌شوند که در آن تغییر ساختار و ترکیب ماده از پیش‌ساز به پروسکایت موجب ایجاد نقص‌های متفاوتی می‌شود. روینش را با توجه به موقعیت‌های متفاوت می‌توان به روینش لایه سطحی، روینش توده و روینش فصل مشترک تقسیم کرد که در میان آن‌ها، روینش سطحی یک راه اصلی برای دستیابی به عملکرد و پایداری بالا در پروسکایت است. در ادامه، انواع متفاوت روینش سطح مانند نمک‌های غیرهالید، نمک‌های هالید و مولکول‌های خنثی که اصلاح سطوح پروسکایت را آسان می‌کنند و طول عمر فتوولتائیک‌های پروسکایتی را افزایش می‌دهند، ارائه شده‌اند.

#### نمک‌های غیرهالیدی

پیوند قوی‌تر بین سطح پروسکایت و لایه رویین برای جلوگیری از تخریب لایه پروسکایت بسیار مهم است. در سال ۲۰۱۹، هوانگ<sup>۱</sup> و همکارانش [۲۲] یک روش غیرفعال‌سازی معمول را برای تشکیل یک لایه  $PbSO_4$  متراکم و نازک بر سطح پروسکایت از راه یک واکنش درجا با آنیون‌های معدنی انتخاب شده گزارش کردند (شکل ۲-الف). دستگاه‌های پروسکایت به‌دست‌آمده (کاپسوله‌شده) ۹۶/۸ درصد از PCE اصلی را بیش از ۱۲۰۰ ساعت زیر نور در هوا (رطوبت نسبی ۱۰ ± ۶۰ درصد و ۶۵ درجه سلسیوس) ردیابی می‌کنند، در حالی که دستگاه‌های مرجع ۴۶/۹ درصد از بازده اولیه را در ۴۷۴ ساعت حفظ کردند. این نتیجه نشان می‌دهد که لایه رویین معدنی اثر

خلاصه شده‌اند و با تأکید ویژه، تأثیر تنش بر پایداری PSC نیز مطالعه شده است. افزون‌براین، ازبین‌بردن نقص‌ها در حین کار دستگاه بسیار مهم است. بنابراین، رویکردهای مورد استفاده برای ازبین‌بردن نقص‌ها در حین کارکرد دستگاه بیان می‌شود. در پی آن، راهبردهای جلوگیری از تماس محیط خورنده با پروسکایت‌ها مانند لایه سطحی، لایه انتقال حامل و کل دستگاه بررسی شده است. در پایان، چالش‌های فعلی را که PSC ها هنوز با آن روبه‌رو هستند، تجزیه و تحلیل شده و توصیه‌هایی در مورد تثبیت دستگاه‌های پروسکایتی ارائه شده است.

#### کاهش مکان‌های خوردگی برای بهبود پایداری سلول‌های خورشیدی پروسکایتی

خوردگی، بهبود کیفیت بلوری لایه‌های پروسکایتی با روینش، ماشین‌کاری و آزادسازی تنش، می‌تواند مکان‌های خوردگی اولیه فیلم پروسکایت را کاهش و در نتیجه طول عمر عملیاتی سطح پروسکایت را افزایش دهد. روینش پروسکایت منجر به کاهش مکان‌های خوردگی و در پی آن، بهبود پایداری سلول خورشیدی پروسکایتی می‌شود. ماشین‌کاری‌هایی مانند پرداخت‌کردن، می‌توانند مکان‌های خوردگی سطح فیلم پروسکایت را نیز حذف کنند و در نتیجه عمر مفید سلول‌های خورشیدی پروسکایتی را بهبود بخشند. جبران تنش، مانند اصلاح با مواد بسیار با ضریب انبساط گرمایی منفی، مکان‌های خوردگی ایجادشده با ترک‌خوردگی تنشی در لایه‌های پروسکایتی و سرعت پیرش را کاهش می‌دهد. با این حال، راه‌حل‌های فنی یادشده برای کاهش محل خوردگی پروسکایت بر پایه علم پادخوردگی تنها می‌توانند نقص‌های ایجادشده در هنگام تهیه فیلم‌های پروسکایتی را کاهش دهند. با توجه به اینکه پروسکایت‌ها شبکه‌های بلوری نرم هستند، عیب‌های جدیدی در حین کار ایجاد می‌شود که در مواد فلزی معمولی به‌ندرت دیده می‌شود.

بار منفی خود روئین کنند. ژاو<sup>۵</sup> و همکارانش [۲۷] روئینش سطح پروسکایت را با طیف گسترده‌ای از یدیده‌های فنیل‌آلکیل آمونیم با طول‌های زنجیره آلکیل متفاوت بررسی کردند. اثر تثبیت‌کننده با طول زنجیره افزایش می‌یابد، زیرا سطح پروسکایت با مولکول پیوند قوی‌تری دارد. تان و همکارانش [۲۸] پروسکایت‌های سرب-قلع روئین شده با ۴-تری فلورومتیل‌فنیل آمونیم (CF<sub>3</sub>-PA) را توسعه دادند و سلول‌های خورشیدی روئین شده، ۹۰ درصد از PCE اولیه را در طول ۶۰۰ ساعت از عملکرد MPP حفظ کردند و پایداری عملیاتی بهتری نسبت به نمونه شاهد نشان دادند. به‌طور کلی پروسکایت‌های دوبعدی یا شبه‌دوبعدی را می‌توان با استفاده از نمک‌های هالید بر سطح تشکیل داد. مواد دوبعدی به‌طور معمول به‌عنوان مواد پادخوردگی فلزی به دلیل عدم تأثیرگذاری بر ریخت سطح پوشش‌ها استفاده می‌شوند. در سال ۲۰۱۹، سو<sup>۶</sup> و همکارانش [۲۹] یک معماری هالید دولایه را معرفی کردند که در آن یک پروسکایت با کاف نوار بسیار نازک بر یک جاذب کاف نواری باریک پیش از رسوب مواد حامل حفره<sup>۷</sup> (HTMs) قرار می‌گیرد (شکل ۲-۵). هدف از معرفی لایه پروسکایتی کاف نوار گسترده، از بین بردن نقص‌ها در فصل مشترک پروسکایت/پلی(۳-هگزیل تیوفن) (P3HT) است. گزارش شده است که بخش  $N^+(CH_3)_3$  سطح پروسکایت را در برابر تخریب در شرایط رطوبت مقاوم می‌کند. معماری هالید دولایه PSC (پوشینه-دارشده) حدود ۸۰ درصد از PCE اصلی را در طول ۱۰۰۸ ساعت تحت ۸۵ درصد رطوبت نسبی در دمای اتاق نگه داشت، در حالی که دستگاه واپایش در عرض ۲۰۰ ساعت به‌طور کامل تحلیل رفت (شکل ۲-۳). وولف<sup>۸</sup> و همکارانش [۳۰] دستگاه‌های پروسکایت را از راه تنظیم پروسکایت دوبعدی تشکیل شده با یدیداولیل آمونیم در دمای اتاق ساختند.

برتری بر غیرفعال‌سازی نقص‌ها دارد. فانگ<sup>۱</sup> و همکارانش یک عملیات سولفیدشدن سطحی (SST<sup>۲</sup>) را برای ایجاد پیوندهای ناهمگون پایدار گزارش کردند که در نتیجه دستگاه‌ها ۹۱٫۸ درصد از بازده اولیه را پس از ۲۲۰۰ ساعت، در دمای ۸۵ درجه سلسیوس حفظ کردند. یانگ و همکارانش گزارش کردند که تیمارهای سطحی تویالات (-TsO) منجر به تغییر عملکرد مثبت و در نتیجه افزایش انرژی فعال‌سازی برای مهاجرت یون می‌شود که ۸۸٫۵ درصد از بازده اولیه خود را در طول ۲۰۹۲ ساعت کار حفظ می‌کند [۲۳].

#### نمک‌های هالیدی

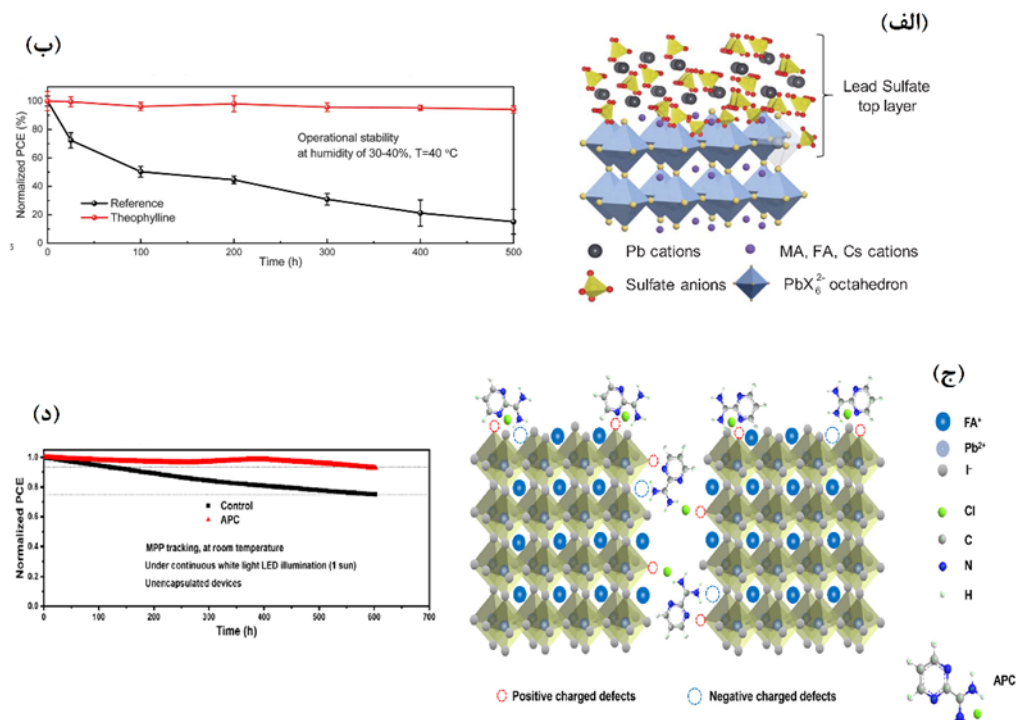
نمک‌های هالید به‌طور معمول به‌عنوان روئینش برای فتولتائیک‌های پروسکایتی با کارایی بالا و پایدار استفاده می‌شوند. در سال ۲۰۱۹، گروهی پژوهشی دریافت که کاتیون‌های آلی و جاهای خالی آنیون هالید را می‌توان با افزودن مقادیر کمی فلورید به پیش‌ساز پروسکایت به خوبی روئین کرد [۲۴]. در سال ۲۰۲۲، پنگ<sup>۳</sup> و همکارانش [۲۵] از ۲-آمیدینوپیریمیدین هیدروکلرید در لایه‌های نازک پروسکایت مرطوب استفاده کردند تا تنظیم هم‌زمان تله‌های باردار و بلوری شدن صورت گیرد. هیدروکلرید ۲-آمیدینوپیریمیدین می‌تواند جای خالی فرمیدینیم (FA) را با تشکیل پیوندهای هیدروژنی با FAI جبران کند (شکل ۲-۳). در نتیجه با جلوگیری از تشکیل حالت تله موجب افزایش پایداری PSC می‌شود. PSC به‌دست آمده ۹۳ درصد از بازده اولیه را در ۶۰۰ ساعت کارکرد MPP<sup>۴</sup> تحت نور (اتم‌سفر N<sub>2</sub>، ۳۰ درجه سلسیوس) حفظ کرد، در حالی که PSC مرجع ۷۵ درصد بازده اولیه را در ۶۰۰ ساعت کارکرد MPP حفظ کرد (شکل ۲-۴). هوانگ و همکارانش [۲۶] گزارش کردند که هالیدهای آمونیم چهارتایی به خوبی می‌توانند نقص یونی را با اجزای بار مثبت و

1. Fang  
3. Peng  
5. Zhao  
7. Hole transport materials (HTMs)

2. Surface sulfidation treatment (SST)  
4. Maximum power point (MPP)  
6. Seo  
8. Wolf

افزون‌براین، پروسکایت‌های دوبعدی نه تنها به پروسکایت‌های رودلسدن-پوپر (RP) اشاره دارد، بلکه به پروسکایت‌های دیون-ژاکوبسون (DJ) که با کاتیون‌های آلی آمونیم دو ظرفیتی تشکیل شده‌اند نیز مرتبط است.

دستگاه‌های پروسکایت دارای بازده ۲۴٫۳ درصد هستند و بیش از ۹۵ درصد بازده اولیه را برای بیش از ۱۰۰۰ ساعت در شرایط آزمون گرمای مرطوب حفظ می‌کنند.



شکل ۱ طرحواره حفاظت از پروسکایت‌ها با تشکیل لایه رویی PbSO<sub>4</sub> در سطح پروسکایت [۳۵] (الف)، کارایی اندازه‌گیری شده برای PSC‌های بسته‌بندی شده با توفیلین یا تیمارنشده با توفیلین که در برابر نور ثابت قرار دارند (۹۰ mW cm<sup>-2</sup>) [۳۳] (ب)، طرحواره سازوکار برهم‌کنش پیشنهادی بین هیدروکلرید ۲-آمیدینوپیریمیدین و پروسکایت [۲۵] (ج) و ردیابی MPP دینامیک دستگاه‌های تحت نوردهی ثابت تیمار شده و واپایش نشده با ۲-آمیدینوپیریمیدین هیدروکلرید [۲۵] (د) (دارای مجوز از ناشران مربوط)

حالی که بازده نمونه شاهد تا ۴۳ درصد کاهش یافت. برخی از هالیدهای معدنی نیز می‌توانند ساختارهای دوبعدی را تشکیل دهند. لو<sup>۲</sup> و همکارانش [۳۲] یک پروسکایت دوبعدی Cs<sub>2</sub>PbI<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> به‌طور کامل غیرآلی را با پردازش سطح فیلم CsPbI<sub>3</sub> با محلول CsCl رسوب دادند. نمونه Cs<sub>2</sub>PbI<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>، ۸۰

ژو<sup>۱</sup> و همکارانش [۳۱] گزارش کردند که N، N-دی‌متیل-۱،۳-پروپان دی آمونیم (DMePDA<sup>2+</sup>) برای تشکیل یک لایه نازک دوبعدی DJ یک راهبرد معمول برای افزایش PCE و همچنین، پایداری است. نمونه اصلاح شده با DMepDAI<sub>2</sub> بازده اولیه ۹۰ درصد خود را در ۱۰۰۰ ساعت کار نگه‌داشت، در

پردازش نشده افزایش دهد. مطالعه مشابهی در زمینه PSCها نشان داد که ویژگی یونی پروسکایت منجر به تعداد زیادی نقص سطحی باردار تحت بازپخت در دمای بالا می‌شود. با توجه به اینکه نقص‌های اصلی بر سطح پروسکایت توزیع شده‌اند، کاهش نقص‌های سطحی بسیار مهم و کلید افزایش طول عمر فتوولتائیک پروسکایت است. در سال ۲۰۲۰، هوانگ<sup>۳</sup> و همکارانش [۱۹] یک راهبرد برای حذف پروسکایت نقص‌دار با نوار چسب، بدون تأثیر بر نواحی بلوری زیرین گزارش کردند. نوارهای ساخته‌شده از چسب نرم بر یک بستر بسیار انعطاف‌پذیر بر سطوح ناهموار پروسکایت فشار داده شدند تا تماس نزدیکی با آن ایجاد کنند.

این کار با فشاردادن نوار ارزان قیمت M Temflex ۳ 170086 بر فیلم‌های  $\text{MAPbI}_3$  ( $\text{MA} = \text{CH}_3\text{NH}_3$ ) و سپس جداکردن نوار از سطوح پروسکایت، همان‌طور که به صورت طرحواره در شکل ۲-الف نشان داده شده است، انجام شد. نیمه سمت راست نمونه که تحت عملیات نواری قرار گرفته بود، پس از ۸ ساعت روشنایی سیاه باقی ماند، در حالی که نیمه سمت چپ در کمتر از ۴ ساعت به فازهای زرد تبدیل شد که نشان می‌دهد کار با نوار می‌تواند پایداری فیلم را افزایش دهد (شکل ۲-ب). افزایش پایداری نوری فیلم به دلیل حذف لایه‌های سطحی نقص‌دار است. بازده یک PSC شاهد آب‌بندی شده به سرعت از ۱۹/۱ درصد به ۱۴/۱۷ درصد در طول ۳۲۴ ساعت کاهش یافت (شکل ۲-ز). در مقابل، PSCهای تیمار شده با نوار، ۹۷/۱ درصد از بازده اولیه را پس از ۱۴۴۰ ساعت روشنایی حفظ کردند. این راهبرد ساده ماشین‌کاری، عملیات نواری، به‌طور چشمگیری پایداری نوری PSCها را با حذف لایه‌های سطحی نقص‌دار افزایش داد. در سال ۲۰۲۱، هوانگ و همکارانش [۳۷] گزارش کردند برخی از فازهای آمورف و غیربلوری که بر سطح لایه‌های پلی‌بلوری با روش رسوب‌دهی محلول ته‌نشین شده بودند، موجب افزایش سرعت تجزیه

درصد از PCE اصلی خود را پس از آنیل‌شدن در دمای درجه سلسیوس ۱۱۰ زیر نور ثابت به مدت ۲۱۰۰ ساعت حفظ کرد.

#### مولکول‌های خنثی

فراگیرترین نقص‌ها در مواد پروسکایتی، نقص‌های نقطه باردار هستند که می‌توانند از راه اسیدها یا بازهای لوئیس غیرفعال شوند. برخی از مولکول‌های خنثی آلی با گروه‌های عاملی باردار می‌توانند نقص‌ها را کاهش دهند. در سال ۲۰۱۹، یانگ<sup>۱</sup> و همکارانش [۳۳] گزارش کردند که با تتوبرومین، کافئین و تتوفیلین به‌عنوان رویش سطح، نقص مکان PBI به خوبی غیرفعال شد. مطالعه‌ها نشان داده است که تتوفیلین بیشترین تأثیر را در رویش دارد. نمونه‌های تیمار شده با تتوفیلین (پوشیده‌شده) به بالاترین بازده (۲۳/۴۸ درصد) همراه با طول عمر طولانی دست یافتند: بیش از ۹۵ درصد از PCE اصلی را بیش از ۵۰۰ ساعت در زیر نور ثابت (در ۳۰ تا ۴۰ درصد رطوبت نسبی و ۴۰ درجه سلسیوس) نگه‌داشتند. نمونه‌های شاهد ۲۰ درصد از PCE اصلی را در طول ۵۰۰ ساعت در شرایط یکسان نگه‌داشتند (شکل ۲-ب). هان و همکارانش با رسوب CI-GO پیوندهای شیمیایی قوی Pb-O و Pb-Cl ایجاد کردند که در نتیجه PSCها ۹۰ درصد کارایی اولیه خود را در ۱۰۰۰ ساعت کارکرد حفظ کردند. افزون‌براین، لی و همکارانش [۳۴] یک لاکتون سسکوئی‌ترین به نام آرتمیزینین را برای افزایش VOC و سپس عملکرد نمونه‌های انعطاف‌پذیر به فیلم‌های پروسکایت معرفی کردند که در نتیجه نمونه‌های پروسکایت انعطاف‌پذیر با پایداری طولانی‌مدت و پایداری مکانیکی بهتری ایجاد کردند.

#### ماشین‌کاری

ماشین‌کاری یک روش موثر برای محافظت در برابر خوردگی است. آدین<sup>۲</sup> و همکارانش [۳۶] گزارش کردند که یکپارچگی سطح بهبود یافته به دست آمده از ماشین‌کاری می‌تواند مقاومت به خوردگی یک آلیاژ منیزیم را در مقایسه با سطح اولیه

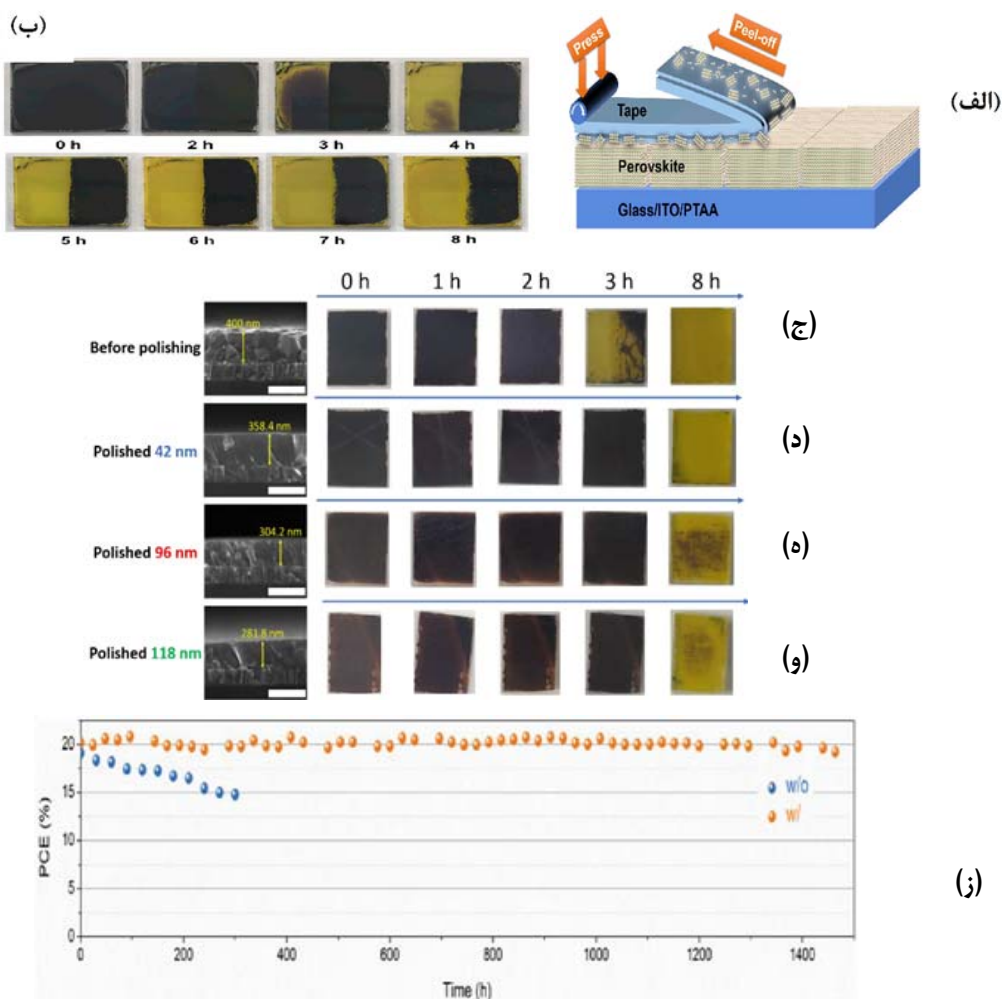
1. Yang

2. Uddin

3. Huang

برای  $\text{MAPbI}_3$  با پرداخت کردن متفاوت آزمایش شدند. برای جلوگیری از تأثیر تغییرهای ریخت فیلم پروسکایت بر پایداری، تنها نیمی از هر فیلم پروسکایت پرداخت شد.

پروسکایت شدند. طول عمر لایه‌های پروسکایت با پرداخت کردن برای حذف فاز آمورف و لایه‌های غیربلوری، به‌طور چشمگیری افزایش یافت. پایداری نوری فیلم‌های



شکل ۲ طرحواره جدا شدن نوار چسب از روی یک فیلم پروسکایت [۱۹] (الف)، تصویرهای نوری از یک فیلم پروسکایتی با مساحت  $15 \times 15$  میلی‌متر تهیه‌شده به روش تک‌مرحله‌ای پس از نوردی در فاصله‌های زمانی متفاوت (سمت راست فیلم با نوار چسب پرداخت شده بود). (ب)، تصاویر نوری فیلم‌های پروسکایت در آزمایش پایداری شیشه با گودی‌های صیقل‌شده متفاوت با پرداخت لایه‌به‌لایه [۱۹]، ضخامت اولیه ۴۰۰ نانومتر (ج)، صیقل‌دادن ۴۲ نانومتر (د)، صیقل‌دادن ۹۶ نانومتر (ه)، صیقل‌دادن ۱۱۸ نانومتر (و) (تصاویر SEM مقطع آن‌ها در ستون سمت چپ نشان داده شده که نوار مقیاس داخل آن ۵۰۰ نانومتر است. روشنایی مشابه آزمایش‌های پیشین در هوای محیط بود [۳۷]) و پایداری عملیاتی سلول‌های خورشیدی آب‌بندی‌شده بر پایه لایه‌های پروسکایت  $\text{Rb}_{0.05}\text{Cs}_{0.05}\text{FA}_{0.85}\text{MA}_{0.05}\text{PbI}_{2.85}\text{Br}_{0.15}$  با و بدون عملیات نواری [۱۹] (ز) (دارای مجوز بازنشر از ناشران مربوط)

چنین تفاوت بزرگی در ضریب انبساط گرمایی دلیل اصلی کرنش کششی در لایه‌های پروسکایتی است که در دمای اتاق سرد می‌شوند. هنگامی که یک لایه پروسکایتی بر بستری با  $\alpha$  پایین‌تر قرار می‌گیرد، تماس ایجادشده بین دو لایه در طول فرایند بازپخت در دمای بالا، انقباض پروسکایت را پس از سرد شدن تا حد دمای اتاق محدود می‌کند و در نتیجه موجب ایجاد کرنش کششی در جهت درون صفحه می‌شود (شکل ۴-۳). کارایی دستگاه‌های پروسکایت مشابه شرایط MPP بود (شکل ۴-ج). کرنش کششی PSC کارایی زیادی را از دست داد، در حالی که PSC‌های فشاری و بدون کرنش، ۹۶ درصد و ۸۰ درصد از PCE اصلی را در ۱۰۰۰ ساعت گرمادهی در ۸۵ درجه سلسیوس حفظ کردند. این کار اهمیت پروسکایت‌های بدون کرنش را در پایداری دستگاه‌ها نشان می‌دهد، زیرا کرنش موجب افزایش نقص‌ها می‌شود که در شرایط عملیاتی واقعی به‌عنوان مکان‌های شروع تخریب عمل می‌کنند. برای کاهش بیشتر تنش، تغییر ضریب انبساط مواد پروسکایتی یک راهبرد برای کاهش تنش از مواد پروسکایت است. چن<sup>۵</sup> و همکارانش [۴۱] حذف تنش پسماند در لایه‌های پروسکایتی را با معرفی کاتیون‌های متفاوت مکان‌های A گزارش کردند. از آنجایی که ترکیب دوبعدی پروسکایت پس از این عملیات تشکیل می‌شود، تنش باقی‌مانده در لایه پروسکایتی می‌تواند به‌طور موثر تا حدود ۵۰ درصد آزاد شود. ساختار ترکیبی دو/سه‌بعدی شبیه یک «مفصل استخوان» است (شکل ۴-د)، که پایداری PSC‌ها را در برابر تنش‌های نور/گرمایی خارجی از راه یک اثر بالشتک افزایش می‌دهد. افزون‌براین، لوو<sup>۶</sup> و همکارانش [۴۲] لایه‌های آزادکننده کرنش آلکیل‌تری‌متوکسی‌سیلان را در فصل مشترک پروسکایت/بستر معرفی کردند. پیرش دستگاه‌های به‌دست‌آمده در MPP تحت نور برپایه روش ISOS-L-II انجام شد. سلول‌های خورشیدی تیمار شده با بوتیل‌تری‌متوکسی‌سیلان بیش از ۹۰ درصد

مشخص شد که پروسکایت تحت نور در هوای محیط به دید سرب و سایر گونه‌ها تجزیه و موجب رنگ‌زدایی لایه‌ها می‌شود. فیلم‌هایی که برای حذف ۹۶ نانومتر و ۱۱۸ نانومتر صیقل داده شده‌اند، نسبت به فیلم‌هایی که برای حذف ۴۲ نانومتر صیقل داده شده‌اند، پایداری نوری بهتری از خود نشان می‌دهند (شکل‌های ۲-ه و ۲-و). همه این گزارش‌ها نشان می‌دهند که ماشین‌کاری یک راهبرد مفید برای کاهش نقص‌های سطحی است که می‌تواند برای دستگاه‌های قوی‌تر توسعه یابد.

### آزادسازی تنش

آزادسازی تنش روشی موثر برای از بین بردن خوردگی تنش است. خوردگی تنش نوعی خوردگی است که در اثر عمل هم‌زمان یک محیط خورنده و تنش کششی پایدار رخ می‌دهد. کرنش نامطلوب در فیلم پروسکایت در طول ساخت فیلم به تغییرهای پیوندهای شیمیایی و انبساط/انقباض حجم شبکه اشاره دارد که بر طول عمر دستگاه‌ها تأثیر می‌گذارد. مهندسی کرنش به‌عنوان یک راهبرد جدید برای بهبود کارایی و طول عمر PSCs توسعه داده شده است. در سال ۲۰۲۰، سارجنت<sup>۱</sup> و همکارانش [۳۸]، کرنش کششی باقی‌مانده را با معرفی یک کرنش فشاری خارجی از لایه انتقال حفره ( $HTL^2$ )، جبران کردند. کرنش کششی باقی‌مانده در لایه‌های پروسکایتی از عدم همخوانی ضریب انبساط گرمایی بین بسترها و پروسکایت‌ها ناشی می‌شود. ضریب انبساط گرمایی هر ماده لایه عملکردی بسیار متفاوت است (شکل ۴-الف). لایه‌های انتقال بار غیرآلی و شیشه اکسید ایندیم قلع ( $ITO^3$ ) که به‌طور معمول استفاده می‌شوند [۳۹ و ۴۰]، مقادیر کم  $\alpha$  در گستره  $0.37 \times 10^{-5}$  تا  $1 \times 10^{-5}$  دارند. در مقابل، پروسکایت‌ها دارای مقادیر  $\alpha$  بسیار بالاتری در گستره  $3/3$  تا  $1/K \times 10^{-5}$  هستند که به تقریب ۱۰ برابر بیشتر از لایه‌های انتقال الکترون ( $ETLs^4$ ) یا بسترها هستند.

1. Sargent

3. Indium tin oxide (ITO)

5. Chen

2. Hole transport layer (HTL)

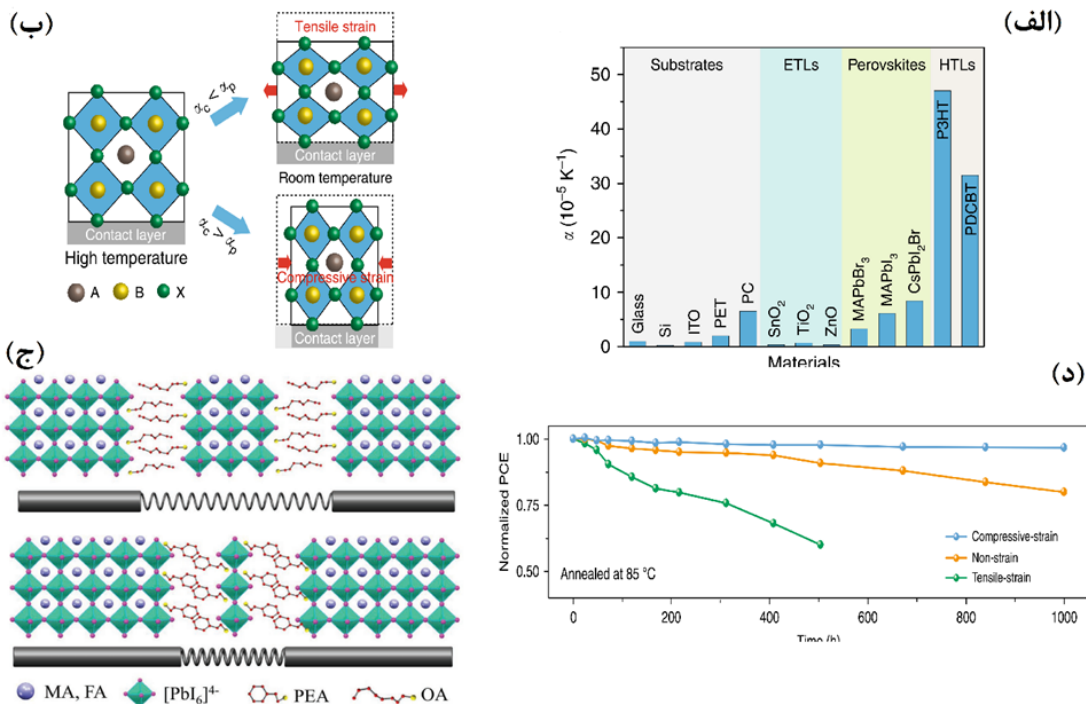
4. Electron transport layers (ETLs)

6. Loo



PCE اولیه را پس از ۲۰۹ ساعت تحت شرایط مشابه حفظ کردند که در شکل (۴-۵) نشان داده شده است.

از PCE اولیه را پس از ۱۷۹۸ ساعت حفظ کردند، در حالی که سلول‌های خورشیدی بدون لایه آزادکننده، کرنش ۸۰ درصد از



شکل ۳ ضریب‌های انبساط گرمایی مواد رایج مورد استفاده در دستگاه‌های پروسکایت [۳۸] (الف)، طرحواره شکل‌گیری کرنش‌های کششی و فشاری [۳۸] (ب)، کارایی دستگاه‌های پروسکایت که در دمای ۸۵ درجه سلسیوس در جو N<sub>2</sub> نگهداری می‌شوند [۳۸] (ج)، طرحواره تنش‌زدایی پسماند با زیرواحدهای ساختاری نرم و سخت [۴۱] (د) و بازده بهنجار شده برای دستگاه‌های آب‌بندی شده مبتنی بر CsPbI<sub>3</sub> با و بدون لایه‌های آزادکننده کرنش C3 (ه). (پیرش دستگاه‌ها در MPP و در شرایط محیطی ۴۰ درجه سلسیوس و ۴۰ درصد رطوبت نسبی برپایه روش ISOS-L-11 انجام شد [۴۲]). (دارای مجوز بازنشر از ناشران مربوط)

مطالعه‌ها گزارش داده‌اند که I<sup>-</sup> در پروسکایت‌ها می‌تواند آماده اکسیدشدن به I<sup>0</sup> باشند که نه تنها به‌عنوان یک عامل ترکیبی برای حامل عمل می‌کند، بلکه موجب ایجاد واکنش‌های زنجیره‌ای شیمیایی برای سرعت‌دادن به تجزیه PSCs می‌شود. افزون‌براین، Pb<sup>2+</sup> به‌راحتی با گرمایش یا تابش نور به Pb<sup>0</sup> فلزی کاهش می‌یابد، همان‌طور که در فیلم‌های هالید پروسکایت مبتنی بر سرب مشاهده می‌شود [۴۳]. حالت فلزی Pb<sup>0</sup> یک حالت نقص غالب است که عملکرد فتوولتائیک

خودترمیم‌شوندگی

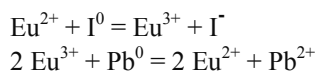
راهبردهای معرفی شده برای بهبود طول عمر عملیاتی PSCها، مانند روپینش، ماشین‌کاری و آزادسازی تنش، همه با کاهش نقایص ایجادشده در هنگام تهیه فیلم‌های پروسکایت به‌دست‌آمده، همراه هستند. با این حال، مواد پروسکایتی شبکه‌های نرم هستند. در حین بهره‌برداری از PSCها، ولتاژ گرما، نور و ولتاژ بایاس موجب نقص‌های جدیدی می‌شود، که مکان‌های شروع برای تخریب مواد پروسکایتی هستند. برخی از

یکی از این ترکیبات ۳،۲-بیس (۵،۴،۲-تری-متیل-۳-تی-انیل) مالیمید (DAE<sup>۱</sup>) که به رویشش نقص کمک می‌کند و محافظت از دستگاه در برابر پرتو فرابنفش را افزایش می‌دهد (شکل ۴-ب). وانگ و همکارانش [۴۶] با یک مولکول همپار نوری اسپروپیران<sup>۲</sup>، یک روش غیرفعال‌سازی پویا پایدار برای PSCها توسعه دادند که در نتیجه آن فرایند انتقال فاز برگشت-پذیر از پروسکایت چیره FA، (یعنی فاز δ- به α و فاز α به δ-) بررسی شد. PSCهای تخریب‌شده پس از گرمایش بهبود یافتند (شکل ۴-ج). این یافته یک راهبرد امکان‌پذیر برای تثبیت فاز α از پروسکایت‌های مبتنی بر FA و PSCها ارائه می‌دهد.

به‌کمینه‌رساندن تماس بین سلول‌های خورشیدی پروسکایتی و محیط خورنده

با توجه به راهبرد پادخوردگی، از یک سو باید کیفیت بلوری پروسکایت برای کاهش مکان‌های خوردگی بهبود داده شود، از سوی دیگر، باید از تماس محیط خورنده با پروسکایت جلوگیری شود تا پایداری سلول‌های خورشیدی پروسکایتی بهبود یابد. افزون‌براین، همچنین، باید از تماس بین محیط خوردگی و پروسکایت با توجه به لایه سطحی، لایه انتقال حامل و کل دستگاه جلوگیری شود. در مرحله اول، لایه نازک سدی ممکن است بهتر از سطح پروسکایت از محیط‌های خورنده جلوگیری کند. همچنین، مواد حامل بدون افزودنی می‌توانند تماس بین فیلم پروسکایت و محیط خورنده را به کمینه برسانند. در پایان، با پوشینه‌دار کردن دستگاه پروسکایت، می‌توان به‌طور موثر از تماس با لایه پروسکایت جلوگیری کرد و در نتیجه سرعت پیرش این مواد را کاهش داد.

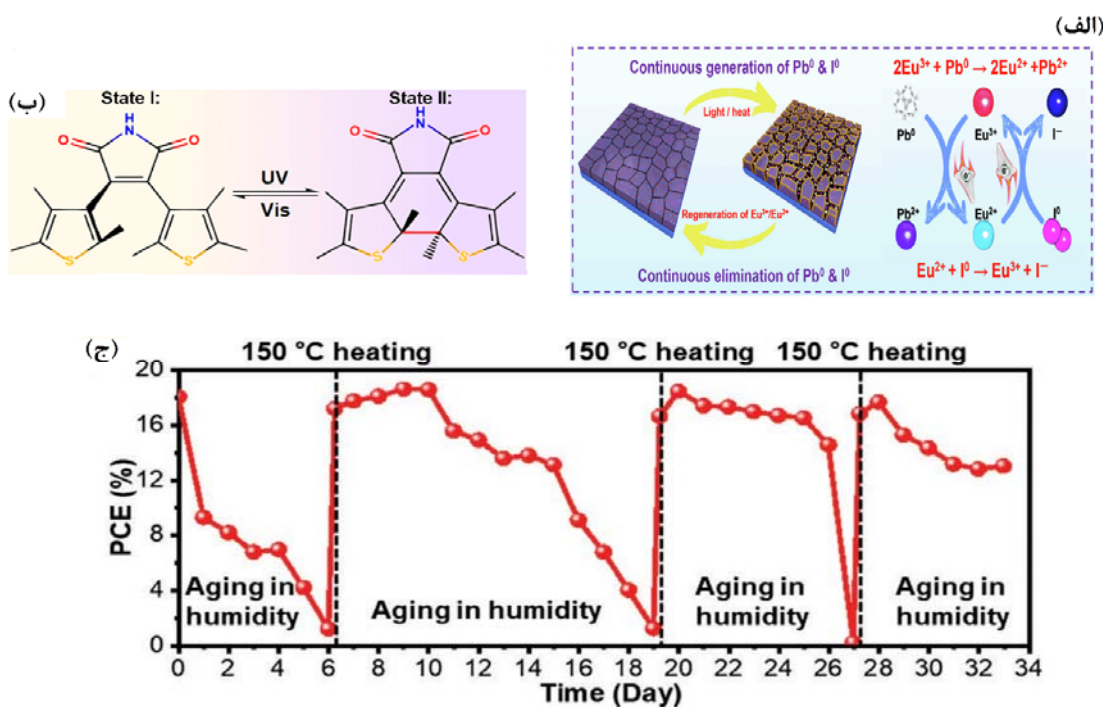
PSCها را به‌طور جدی تخریب می‌کند. از همه مهم‌تر، همه این نقص‌های (I<sup>۰</sup> و Pb<sup>۰</sup>) تولیدشده در طول عملکرد PSC نیز بر طول عمر عملیاتی دستگاه‌های پروسکایتی تأثیر منفی می‌گذارد. در سال ۲۰۱۹، در یک کار پژوهشی [۴۴] از جفت یونی Eu<sup>۳+</sup>-Eu<sup>۲+</sup> برای احیای I<sup>۰</sup> و اکسایش Pb<sup>۰</sup> استفاده شد (شکل ۵-الف).



جفت یونی Eu<sup>۳+</sup>-Eu<sup>۲+</sup> در حین کار PSC مصرف نمی‌شود که ممکن است به‌دلیل داشتن پتانسیل اکسایش و کاهش مناسب و عدم فراربت آن در این انتقال چرخه‌ای باشد. ترمیم نقص‌های I<sup>۰</sup> و Pb<sup>۰</sup> با یک شاتل اکسایش و کاهش مؤثر (افزودنی خاصی به الکترولیت برای انجام واکنش‌های خاص برگشت‌پذیر در پتانسیلی معین) و روش رویش پویا باید برای دستگاه‌های پروسکایتی با ثبات‌تر عملیاتی شود. یون‌های هالوژن در حال حرکت آزادانه و تولید نقص ناشی از تابش به‌صورت پویا به‌روز می‌شوند. براین‌پایه، بیشتر روش‌ها کوتاه مدت و ایستا هستند که موجب می‌شوند در ثبات نور بسیار، محدود شود. بنابراین، نیاز فوری به یافتن روش‌های جدید انفعال برای همخوانی با نقص ایجادشده در طول کار دستگاه وجود دارد. در سال ۲۰۲۲، سونگ و همکارانش [۴۵] یک روش منفعل تاتومری را برای رویش ایزومری مولکولی پیشنهاد دادند که به کمک آن نقص‌های موجود در برابر فرابنفش غیرفعال‌شدند. نقص برای دستگاه‌های پایدار با محافظت از فرابنفش پایدار (UV) پیشنهاد دادند.

1. 2,3-Bis(2,4,5-trimethyl-3-thienyl)maleimide (DAE)

۲ اسپروپیران نوعی ترکیب آلی با ویژگی‌های فتوکرومیک است که قابلیت استفاده در زمینه‌های پزشکی و فناوری را برای این مولکول فراهم می‌کند.



شکل ۴ سازوکار پیشنهادی حذف حلقوی نقص  $Pb^0$  و  $I^0$  و بازسازی جفت یون فلزی  $Eu^{3+}-Eu^{2+}$  [۴۴] (الف)، نمودار مولکول DAE تاتومریک با ماهیت دینامیکی (حالت I به حالت II) [۴۵] (ب) و عملکرد ترمیم دستگاه‌های پیرشده، با عملیات گرمایشی (ج). (PCE برای PSC مشابه در طول سه چرخه «پیرش با رطوبت-ترمیم‌شده با گرمایش» [۴۷] (دارای مجوز بازنشر از ناشران مربوط)

POSS می‌تواند به‌طور موثری چگالی تله بار<sup>۱</sup> پروسکایت را کاهش دهد و پایداری رطوبت دستگاه پروسکایت را بهبود بخشد. در سال ۲۰۱۸، سالیبا و همکارانش [۴۹]، فصل مشترک بین لایه انتقال حفره و پروسکایت را با استفاده از یک لایه پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) بر PSC بررسی کردند که پیش از آن دارای مخلوط بسیار متیل استر (۶۶-فنیل-C61-بوتیریک اسید<sup>۲</sup> PMMA/PCBM) در فصل مشترک لایه انتقال الکترون بودند (شکل ۵-الف). دستگاه اصلاح‌شده با بسیار، ۹۳/۴ درصد از کارایی اولیه خود را در طول ۱۰۰۰ ساعت MPP تحت نور (اتم‌سفر  $N_2$ ) حفظ کرد، در حالی که PSC‌های شاهد ۷۸/۳۵ درصد از بازده اولیه

#### پوشش سطح

بیشتر فلزها و آلیاژهای آن‌ها مانند منیزیم، نیکل، مس و فولاد کربنی در صنایع تولیدی در برابر خوردگی قرار می‌گیرند. پوشش‌های پادخوردگی می‌توانند با جداسازی فلزها از محیط‌های خورنده، خطر خوردگی را کاهش دهند [۴۸]. پوشاندن سطوح فلزی با پوشش‌های پادخوردگی یک راهبرد با قیمت مناسب برای پادخوردگی است. از آنجایی که سطح پروسکایت در برابر عامل‌های تنش‌زای محیطی مانند رطوبت نیز حساس است، معرفی برخی مولکول‌های آب‌گریز یا رطوبت‌گیر یک راهبرد موثر برای بهبود طول عمر عملیاتی دستگاه‌های پروسکایت است. برای مولکول‌های آب‌گریز، کارهای پیشین نشان داده است که گروه آمینه ( $NH_2$ -)

1. Charge trap

2. [6,6]-phenyl-C61-butyrac acid methyl ester

به‌طور کامل متفاوتی از فیلم پروسکایت تحت عملیات با PS نشان می‌دهند. فیلم پروسکایت با عملیات PEO حتی در طول دو هفته هم ظاهر خود را تغییر نداد.

در سال ۲۰۲۰، پارک<sup>۲</sup> و همکارانش [۵۱] روش جدیدی را برای افزایش طول عمر پروسکایت با استفاده از مواد آب‌دوست ۴-آمینو-۱-بوتانول هیدرویدید (4-ABI) یا ۲-آمینو اتانول هیدرویدید (2-AEI) گزارش کردند. این مواد مولکول‌های آب و بنابراین پروسکایت را جذب می‌کنند که می‌تواند از تعامل مستقیم با رطوبت جلوگیری کند. بازده دستگاه شاهد در طی ۷۰۰ ساعت به ۶۰ درصد بازده اولیه کاهش یافت، در حالی که هر دو PSC‌های تحت عملیات با 2-AEI و 4-ABI، ۹۰ درصد از مقدار اولیه را در طول ۱۰۰۰ ساعت حفظ کردند (شکل ۵-۵). استفاده از مواد جاذب رطوبت برای جذب رطوبت و غیرفعال کردن نقص‌های سطحی روش موثر دیگری برای افزایش طول عمر دستگاه‌های پروسکایتی است که نیاز به توسعه بیشتر دارند.

#### CTM فشرده

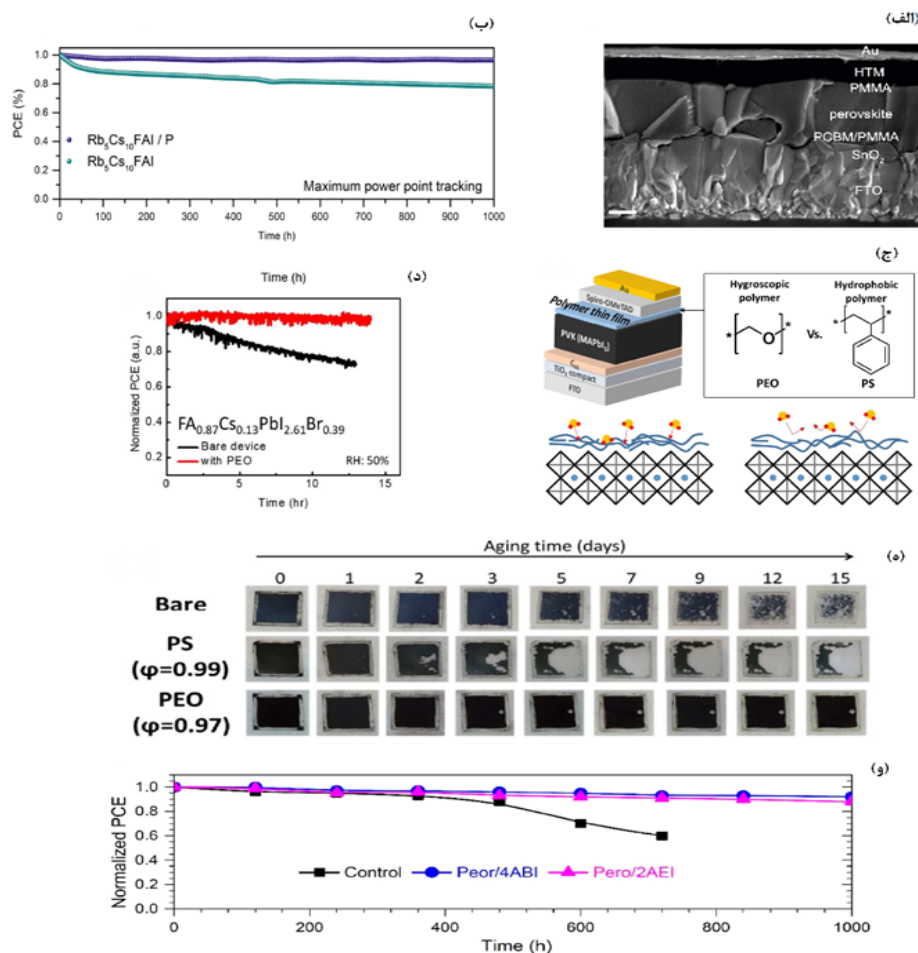
پوشش پادخوردگی به‌طور کلی یک مانع بین سطح فلز و محیط خورنده ایجاد می‌کند. یک لایه محافظ ضخیم می‌تواند بهتر از پروسکایت در برابر نفوذ محیط‌های خورنده محافظت کند. یک ماده حامل فشرده، یک محافظ ضخیم برای پروسکایت‌ها فراهم می‌کند که به تاخیر در نفوذ محیط خورنده از راه مواد حامل کمک می‌کند. به‌طور معمول در ساختار دستگاه n-i-p، مواد انتقال حامل بر سطح پروسکایت رسوب می‌کنند. طول عمر دستگاه‌های پروسکایت ارتباط نزدیکی با مواد افزودنی، آب دوستی و فشرده‌گی مواد حامل حفره دارد. افزودنی‌هایی که برای افزایش تحرک در این مواد استفاده می‌شوند، ویژگی ظریفی وابسته به رطوبت دارند که مولکول‌های آب را جذب می‌کند و منجر به تخریب سریع PSC‌ها می‌شود.

را در طول ۱۰۰۰ ساعت تحت شرایط مشابه حفظ کردند (شکل ۵-۵). همه این نتیجه‌ها یک روش کلی برای افزایش پایداری رطوبت دستگاه‌های پروسکایت ارائه می‌دهند که نه تنها دارای گروه‌های گیرنده یا دهنده الکترون برای روینش نقص‌های سطحی، بلکه دارای گروه‌های آب‌گریز برای جلوگیری از نفوذ آب نیز هستند. گروه دیگری از مولکول‌ها، بسپارهای وابسته به رطوبت هستند.

در سال ۲۰۱۸، پتروزا<sup>۱</sup> و همکارانش [۵۰] دو بسپار سازگار با رطوبت متفاوت را انتخاب کردند، پلی‌اتیلن اکسید (PEO) و پلی‌استایرن آب‌گریز (PS) (شکل ۵-۵). لایه PEO فرایند آبداران کردن پروسکایت را با جذب رطوبت پیش از حمله به پروسکایت‌ها، بسیار کند کرد و در نتیجه پایداری رطوبت فیلم‌ها و دستگاه‌های پروسکایت مربوط را به شدت افزایش داد. دستگاه‌های مبتنی بر PEO (بدون پوشینه) ۱۰۰ درصد از PCE اولیه خود را پس از ۱۴ ساعت کارکرد MPP تحت روشنایی در شرایط محیطی (۵۰ درصد رطوبت نسبی) نگه می‌دارند، در حالی که دستگاه‌های شاهد، ۷۵ درصد از PCE اولیه را در مدت ۱۴ ساعت در شرایط مشابه نگه می‌دارند (شکل ۵-۵). تصاویر فیلم‌های پروسکایت در ۸۸ درصد رطوبت نسبی طی ۱۵ روز در حال تخریب نشان داده شده است (شکل ۵-۵). در تبدیل رنگ سیاه فیلم پروسکایت به شفاف انتقال پروسکایت به فاز آبدار تایید شد. برای پوشش MAPbI<sub>3</sub> بدون عملیات، مشاهده شد که بخش‌های شفاف در روز دوم پدیدار شدند و سپس، در همه سطح قطعه رشد کردند و تعداد مکان‌های شفاف در طول آبداران کردن در سطح افزایش یافت. در فیلم پروسکایت تحت عملیات با PS نیز در روز سوم لکه‌های کوچک شفاف پدیدار شد و به رشد خود ادامه داد. در مقایسه با MAPbI<sub>3</sub>، PS-MAPbI<sub>3</sub> دارای تعداد کمتری از محل‌های هسته‌زایی اولیه بود که آبداران کردن و تجزیه را آغاز می‌کنند، ولی همه آن‌ها به‌طور چشمگیری در روز پانزدهم تخریب شدند. از سوی دیگر، فیلم‌های پروسکایتی تحت عملیات با PEO رفتارهای

1. Petrozza

2. Park



شکل ۵ تصویر SEM یک سلول خورشیدی پروسکایتی  $Rb_5Cs_{10}FAPbI_3$  با لایه‌های بسیار متشکل از PMMA در فصل مشترک پروسکایت/HTM و PCBM/PMMA در فصل مشترک  $SnO_2$ /پروسکایت [۴۹] (الف)، پایداری برای  $Rb_5Cs_{10}FAPbI_3$  بدون اصلاح بسیار (منحنی سبز) و با لایه‌های بسیار (منحنی آبی) با پیرش در دمای اتاق و بیش از ۱۰۰۰ ساعت کارکرد MPP در اتمسفر  $N_2$  [۴۹] (ب)، ساختار دستگاه PSC با بسیار (با ساختارهای شیمیایی PEO و PS) و طرحواره‌ای از یک لایه نازک بسیار هم‌گذرا شده بر ساختار پروسکایت [۴۹] (ج)، بازده ۰٫۸۷ اندازه‌گیری شده برای FA با و بدون ترکیب PEO در  $AM^*$  برابر با ۱٫۵، تابش برابر با ۱۰۰ میلی‌وات بر سانتی‌متر مربع در هوا و ۵۰ درصد رطوبت نسبی [۵۰] (د)، تصویرهای نوری فیلم‌های  $MAPbI_3$  با و بدون لایه‌های روینش PEO و PS (با غلظت ۱۰ میلی‌گرم در میلی‌لیتر در مدت ۱۵ روز در ۸۸ درصد رطوبت نسبی) [۵۰] (ه) و آزمون پایداری پروسکایت در ۲۰ درصد رطوبت نسبی [۵۱] (و) (دارای مجوز بازنشر از ناشران مربوط)

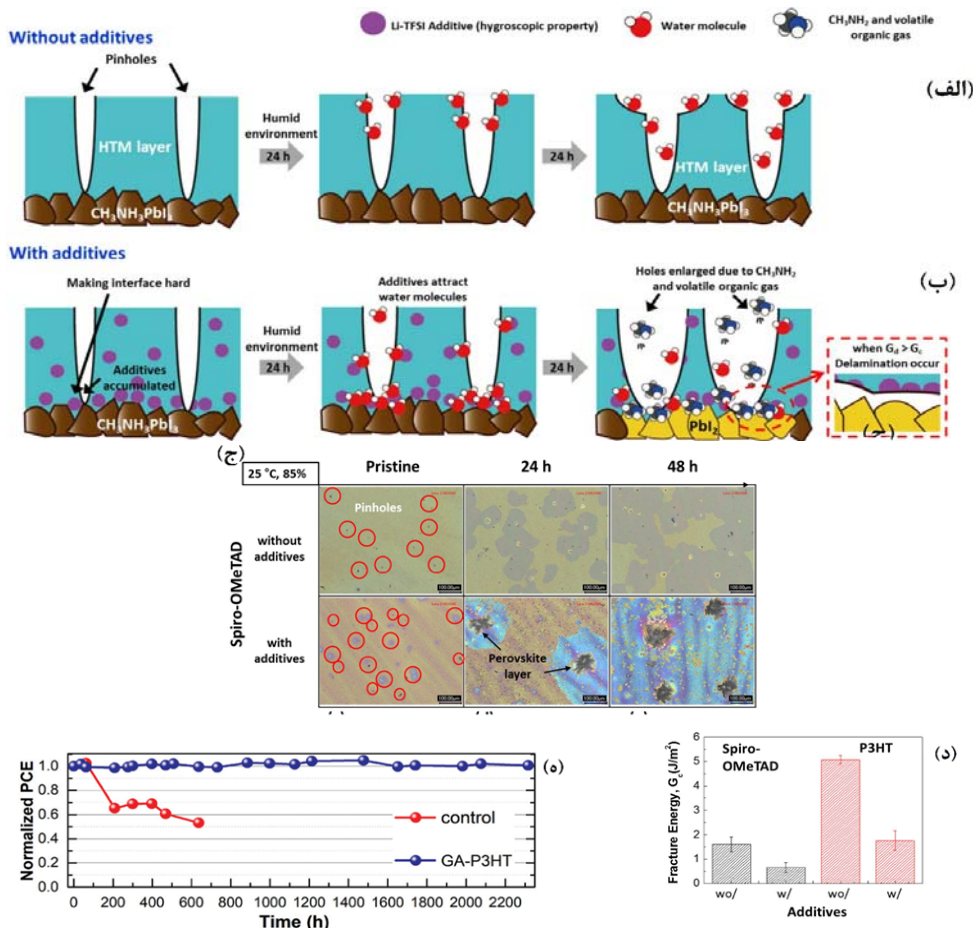
\* Air mass

با افزودن مواد افزودنی، انرژی شکست P3HT و  $7.2 \times 10^4$  -  
 تتراکیس (N,N-دی-پی-متوکسی‌فنیل‌آمین)-۹،۹-اسپیروبی-  
 فلوئورن (OMeTAD-اسپیرو) <sup>۲</sup> از  $5.07 \pm 0.17 \text{ Jm}^{-2}$  و  $5.07 \pm 0.17 \text{ Jm}^{-2}$  کاهش  
 یافت. اگرچه OMeTAD-اسپیرو به دلیل ماهیت مولکولی  
 کوچکش چسبندگی ضعیفی داشت، ولی انرژی شکست به طور  
 چشمگیری به زیر  $1 \text{ Jm}^{-2}$  کاهش یافت (شکل ۶-د) که با  
 برهم‌کنش ضعیف و اندروالس بدون پیوند شیمیایی همخوانی  
 دارد. بنابراین، انرژی‌های شکست کمتر از  $1 \text{ Jm}^{-2}$  برای مقاومت  
 در برابر فشار ایجاد شده در طول تخریب و انتقال مولکول‌های  
 آب از جامد به گاز بسیار ضعیف هستند. بنابراین، لایه‌لایه شدن  
 در فصل مشترک رخ می‌دهد. با این حال، برای P3HT،  
 می‌توان گفت حتی اگر مواد افزودنی به طور چشمگیری انرژی  
 شکست سطحی را کاهش دهند، چسبندگی برای جلوگیری از  
 لایه‌برداری در مقیاس بزرگ با ایجاد اختلال در انتشار ترک  
 اضافی، با وجود لایه‌برداری موضعی غالب، کافی است. بنابراین،  
 P3HT به عنوان یک HTM امیدوارکننده‌تر برای تجاری‌سازی  
 دستگاه پروسکایت نسبت به OMeTAD - اسپيرو در نظر  
 گرفته شد. در سال ۲۰۲۱، نه <sup>۳</sup> و همکارانش [۵۳] یک روش  
 کارآمد برای ترکیب گالیم (III) استیل استونات  $(\text{Ga}(\text{acac})_3)$  به  
 P3HT بدون فرایندهای بعدی و مواد دوپه‌شده وابسته به  
 رطوبت توسعه دادند. P3HT مخلوط با  $(\text{GA}-\text{Ga}(\text{acac})_3)$   
 (P3HT) دستگاه PSC، ۹۹ درصد از بازده اولیه خود را در طول  
 ۲۰۰۰ ساعت تحت ۸۵ درصد رطوبت نسبی در دمای اتاق  
 بدون پوشینه‌داری حفظ کرد، در حالی که دستگاه مرجع در  
 مقایسه با بازده اولیه دچار خرابی شدید PCE شد (شکل ۶-ه).

افزون‌براین، معرفی افزودنی‌های نمک فلزی به دلیل ناسازگاری  
 بین مولکول‌های HTM آلی و افزودنی‌های نمک فلز، منجر به  
 ایجاد حفره‌های اضافی در HTL می‌شود. در سال ۲۰۱۷،  
 کیم<sup>۱</sup> و همکارانش [۵۲]، اثرات افزودنی‌ها در لایه HTM بر  
 لایه پروسکایتی را با لایه‌برداری دقیق فصل مشترک بین  
 لایه‌های HTM و پروسکایت بررسی کردند. افزودنی‌های  
 انباشته‌شده از راه کاهش انرژی شکست و جذب رطوبت به  
 فصل مشترک بین لایه‌های پروسکایتی و HTM، تخریب  
 PSC را تسریع می‌کنند. در HTL بدون مواد افزودنی (شکل  
 ۶-الف)، حفراتی بر سطح HTL وجود داشت. در آن موقعیت،  
 تخریب به جای کل فیلم، بر HTL در PSC متمرکز شد. با این  
 حال، هنگامی که افزودنی‌های سولفونیمید (تری‌فلورومتان) ( $\text{Li-TFSI}$ )  
 به HTM افزوده شدند، افزودنی‌ها در پایین در امتداد  
 ضخامت HTM همان‌طور که در شکل ۶-ب نشان داده شده  
 است، جمع می‌شوند. افزودنی‌های پراکنده در HTL رطوبت را  
 از راه حفره‌های سوزنی جذب می‌کنند. بنابراین، پایداری کل  
 HTL کم است. در این حالت، رطوبت به فصل مشترک بین  
 لایه HTL و پروسکایت به دلیل تعداد زیاد مواد افزودنی در  
 پایین HTL حمله می‌کند. بنابراین، لایه پروسکایت به‌طور مستقیم  
 در شرایط مرطوب قرار می‌گیرد و مولکول‌های آب با پروسکایت  
 واکنش می‌دهند. همان‌طور که با دایره‌های قرمز در شکل ۶-ج  
 نشان داده شده است، HTM با افزودنی‌ها سوراخ‌های بیشتری بر  
 سطوح داشت. افزودنی‌ها به طور چشمگیری تخریب ساختار  
 پروسکایت/HTM اولیه را تسریع کردند و این پدیده با افزایش  
 زمان قرارگرفتن در محیط، شدیدتر شد. انرژی شکست به طور  
 چشمگیری برای نمونه‌ها با افزودن مواد افزودنی یونی کاهش  
 یافت.

1. Kim  
 3. Noh

2. 2,2',7,7'-tetrakis(N,N-di-p-methoxyphenylamino)-9,9'-spirobifluorene (Spiro-OMeTAD)



شکل ۶ سازوکار تخریب PSCها در محیط‌های مرطوب بدون (الف) و با (ب) مواد افزودنی [۵۲]، عکس‌های نمونه‌های اسپيرو-OMeTAD با و بدون مواد افزودنی به‌دست‌آمده برای نمونه اولیه و نمونه‌ها پس از ۲۴ و ۴۸ ساعت قرارگرفتن در ۸۵ درصد رطوبت نسبی و دمای ۲۵ درجه سلسیوس [۵۲] (ج)، انرژی شکست نمونه‌های اسپيرو-OMeTAD و P3HT با و بدون افزودنی پیش از قرارگرفتن در شرایط مرطوب اندازه‌گیری [۵۲] (د) و نتیجه آزمون‌های پایداری رطوبتی PSCs در ۸۵ درصد رطوبت نسبی و دمای اتاق بدون پوشینه‌دار شدن آن‌ها [۵۳] (و) (دارای مجوز بازنشر از ناشران مربوط)

الف). با این حال، مطالعه ما نشان می‌دهد که TBP می‌تواند لایه پروسکایت جذبی ( $CH_3NH_3PbI_3$ ) را خورده و در پایداری سلول‌های خورشیدی اختلال ایجاد کند. برای رفع این مشکل، مونت‌موریلونیت<sup>۲</sup> (MMT) برای تشکیل یک لایه بافر پیش از

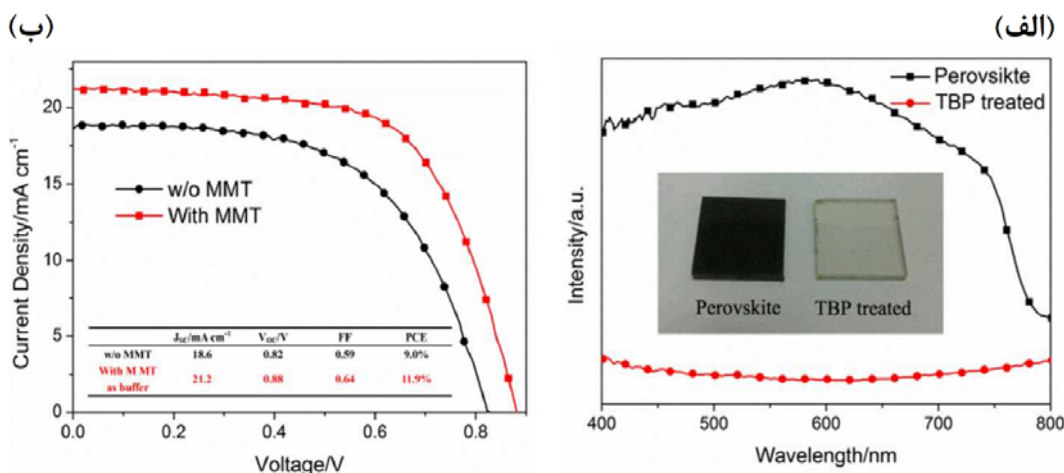
۴-ترت-بوتیل‌پیریدین<sup>۱</sup> (TBP) یک جز مهم در لایه انتقال حفره برای سلول‌های خورشیدی پروسکایتی هیبریدی بود. نتایج طیف‌سنجی UV-vis نشان داد که پس از پوشش TBP بر پروسکایت، جذب به شدت کاهش یافت (شکل ۷-)

1. 4-tert-butylpyridine (TBP)

2. Montmorillonite (MMT)

مشترک  $\text{TiO}_2$  می‌شود. در نتیجه، بازده متناظر تا حد زیادی از ۹/۰ درصد به ۱۱/۹ درصد افزایش یافت (شکل ۷-ب) [۵۴].

لایه انتقال حفره استفاده شد. MMT نه تنها یک لایه مسدود کننده تشکیل می‌دهد که پروسکایت را از خوردگی با TBP محافظت می‌کند، بلکه موجب تاخیر در بازترکیب بار در فصل



شکل ۷ خوردگی پروسکایت با TBP (الف) و به‌کارگیری مونتموریلونیت (MMT) به‌عنوان یک لایه بافر دو عملکردی برای جلوگیری از خوردگی و تاخیر ترکیب دوباره الکترون-حفره‌الکترون (ب) [۵۴] (دارای مجوز بازنشر از ناشران مربوط)

مشاهده که با اصلاح OXD-7 نیز سرکوب می‌شود. بازده تبدیل توان بالا (۲۱/۸۴ درصد) و ضریب پشدن بالا (۸۴/۶۳ درصد) با این راهبرد به‌دست می‌آید که در نتیجه آن یکی از بالاترین PCEها و FFها برپایه پیوند ناهمگون بین MAPbI<sub>3</sub> و PCBM است. در نهایت PCE می‌تواند ۸۰ درصد از مقدار اولیه خود را پس از ۱۰۸۰ ساعت در ۸۵ درجه سلسیوس با اصلاح OXD-7 حفظ کند.

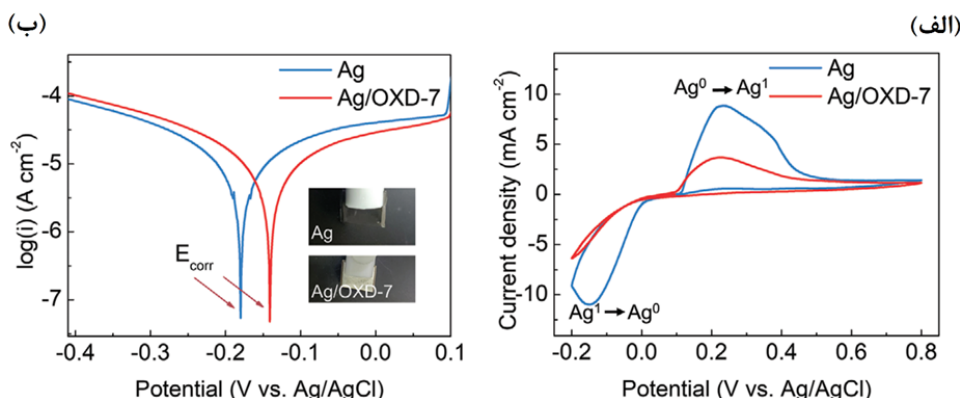
برای تایید بیشتر و درک عمیق عملکرد پادخوردگی فلز OXD-7، روش الکتروشیمیایی انجام شده است [۵۵]. فیلم OXD-7/Ag با غوطه‌ور کردن فیلم Ag در محلول آبی OXD-7 تشکیل می‌شود. ولت‌آمپرسنجی چرخه‌ای روش متداولی است که برای شبیه‌سازی و تحلیل رفتار خوردگی فلزها استفاده می‌شود. یک لایه نقره خالص به‌راحتی می‌تواند از نظر الکتروشیمیایی خورده شود زیرا پیک‌های آندی و کاتدی

پایداری فصل مشترک کاتد، عملکرد سلول‌های خورشیدی پروسکایت معکوس (PSCs) را تا حد زیادی محدود می‌کند. در اینجا، یک راهبرد اصلاح فصل مشترک پادخوردگی چندمنظوره کارآمد مبتنی بر OXD-7 برای چیرگی بر مشکل‌های فصل مشترک کاتد پیشنهاد شده است. مولکول‌های OXD-7 از نظر شیمیایی با الکتروود Ag هماهنگ می‌شوند و یک فیلم پیچیده شیمیایی پایدار از OXD-7/Ag را تشکیل می‌دهند که مهاجرت یون هالید را سرکوب می‌کند و در نتیجه مقاومت به خوردگی الکتروود را نیز افزایش می‌دهد. افزون‌براین، چگالی تله فیلم پروسکایت، تماس فصل مشترک PCBM/Ag، پتانسیل داخلی، مقاومت در برابر رطوبت، با آرایش OXD-7 بر فیلم PCBM، بهبود یافته است، که به‌ترتیب عملکرد و پایداری دستگاه را افزایش می‌دهد. مهاجرت یون هالید دو طرفه و خوردگی ITO



به خوردگی و جریان خوردگی نشان‌دهنده سرعت خوردگی است. لایه Ag/OXD-7 دارای  $E_{corr}$  مثبت (0.14 V-) نسبت به فیلم Ag (0.18 V-) است که نشان می‌دهد خوردگی فیلم Ag/OXD-7 بسیار دشوارتر است [55]. افزون‌براین، چگالی جریان خوردگی Ag و Ag/OXD-7 به ترتیب  $10^{-10}$  A/cm<sup>2</sup> و  $1.38 \times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup> است که از نمودارهای تافل مشتق شده است.  $I_{corr}$  پایین‌تر Ag/OXD-7 نشان می‌دهد که نرخ خوردگی فلز از طریق OXD-7 کاهش می‌یابد. عبارات یادشده نشان می‌دهد که OXD-7 به‌طور موثری از خوردگی نقره با بهبود مقاومت در برابر خوردگی و کاهش سرعت خوردگی فلز جلوگیری کرده است [55].

آشکاری در اتمسفر خنثی محلول‌های NaCl مشاهده می‌شوند (شکل ۸-الف). منحنی‌های ولت‌آمپرسنجی چرخه‌ای ویژگی‌های نامتقارن را نشان می‌دهند که نشان می‌دهد خوردگی واکنشی غیرقابل برگشت است. چگالی جریان پیک اکسایش فیلم‌های Ag به میزان ۲/۴ برابر بیشتر از Ag/OXD-7 است و چگالی جریان پیک کاهش کاتدی نیز با مقدار ۱/۷۲ برابر OXD-7 کاهش می‌یابد. نتیجه‌های ولت‌آمپرسنجی چرخه‌ای نشان می‌دهد که فرایندهای اکسایش و کاهش Ag با معرفی OXD-7 از بین می‌روند. برای ارزیابی دقیق بهبود عملکرد پادخوردگی نقره با OXD-7، نمودارهای قطبش تافل اندازه‌گیری شده و نتیجه در شکل ۸-ب نشان داده شده است. در نمودارهای تافل، پتانسیل خوردگی ( $E_{corr}$ ) نشان‌دهنده تمایل



شکل ۸ نمودار ولت‌آمپرسنجی چرخه‌ای (الف) و نمودارهای قطبش تافل لایه‌های نقره خالص و Ag/OXD-7 در محلول NaCl ۳/۵ درصد وزنی و تصاویر فیلم‌های Ag و Ag/OXD-7 پس از آزمون قطبش (ب) [55] (دارای مجوز بازنشر از ناشران مربوط)

برای دستگاه‌های پروسکایت را گزارش کردند که آن‌ها را قادر می‌سازد تا آزمون‌های گرمای مرطوب (DH<sup>T</sup>) استاندارد صنعتی IEC 61646 و چرخه گرمایی را پشت سر بگذارند. شکل ۹-الف یک نمای جانبی از پوشینه‌داری نسل اول را نشان می‌دهد. در این طرح از نوارهای فلزی لچیم‌شده برای هدایت جریان از دستگاه به قسمت بیرون استفاده می‌شد. هر دو لبه

#### پوشینه‌داری

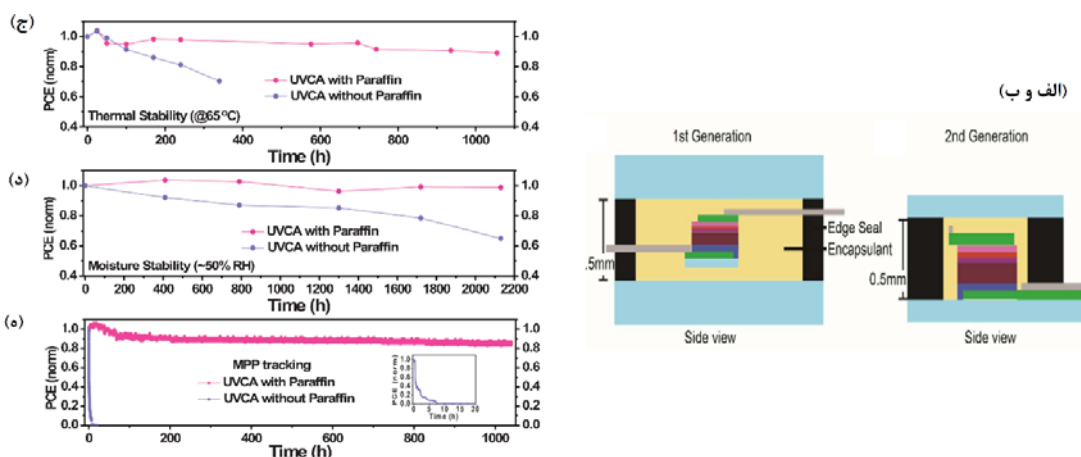
هنگامی که یک فلز در برابر اکسیژن و رطوبت قرار می‌گیرد، تجزیه و خورده می‌شود. برای جلوگیری از این اتفاق، پوشینه‌داری یک رویکرد متداول است که یک راهبرد موثر برای کاهش تخریب PSC نیز است. در سال ۲۰۱۸، مک‌گهی<sup>۱</sup> و همکارانش [56] یک روش پوشینه‌داری شیشه‌شیشه

1. McGehee

2. Damp Heat (DH)

بسته نسل دوم، یک الکتروود شفاف شیشه‌ای/ ایندیم قلع اکسید (ITO) [۵۶ و ۵۷] برای جدا کردن پروسکایت از فلز و اطمینان از وجود ۲ میلی‌متر فضای جانبی بین فلز و دستگاه استفاده شد (شکل ۹-ب) [۵۶].

روبان آب‌بندی شد تا دسترسی مولکول آب به کمینه برسد. افزون‌براین، بسترهای دستگاه ۲×۲ سانتی‌متر با اتیلن وینیل استات (EVA) محصور شدند. روش پوشینه‌داری سازی نسل اول دستگاه پروسکایتی را قادر می‌سازد تا آزمون گرمای مرطوب ۱۰۰۰ ساعت استاندارد IEC 61646 را پشت سر بگذارند. در



شکل ۹ نمای جانبی نسل اول [۵۶] (الف) و مجموعه بسته نسل دوم [۵۶] (ب)، پایداری گرمایی [۵۹] (ج)، ردیابی پایداری رطوبت دستگاه‌های محصور شده [۵۹] (د) و پایش MPP با شرایط پوشینه‌داری کردن متفاوت در دمای محیط (شکل درج‌شده در این منحنی بررسی MPP برای UCVA در بازه زمانی کوتاه که پوشینه‌داری شدن پارافین انجام نشده است را نشان می‌دهد) [۵۹] (ه) (دارای مجوز بازنشر از ناشران مربوط)

در بسته نسل دوم، دستگاه‌ها و ورودی‌های الکتریکی به‌طور مستقیم در یک طرف پوشش شیشه‌ای قرار می‌گیرند تا دسترسی مولکول‌های آب به کمینه برسد و حفره‌های ایجادشده در اثر حرکت دستگاه کاهش یابد. افزون بر پایداری گرمایی بالا، این فرایند پوشینه‌داری سازی مبتنی بر فیلم پلی‌یورتان را می‌توان به راحتی تا کاربردهای بزرگ مقیاس استفاده کرد. زیرا ماژول‌های خورشیدی پروسکایت قابل چاپ با اندازه ۱۰ × ۱۰ سانتی‌متر به‌عنوان دستگاه‌های پوشینه‌داری شده با همان پروتکل ساخته شدند. در سال ۲۰۱۵، ویراسینقه<sup>۱</sup> و همکارانش [۵۸] اثر پوشینه‌داری را بر افزایش طول عمر PSC‌های انعطاف پذیر ارائه کردند. برای PSC‌های بسته‌بندی شده «جزئی»،

اتصال‌های الکتریکی در تماس مستقیم با PSC‌ها هستند، درحالی‌که برای PSC‌های «کامل» بسته‌بندی‌شده، اتصال الکتریکی با سیم‌های مسی نازک که به ماژول‌ها لحیم شده‌اند انجام می‌شود. بازده PSC پیش و پس از پوشینه‌داری کردن اندازه‌گیری شد و PSC‌های بسته‌بندی‌شده تغییر قابل توجهی در PCE به دلیل فرایند لایه‌گذاری نشان ندادند. در سال ۲۰۱۹، چن و همکارانش [۵۹] مزایای روش بسته‌بندی فرآوری در دمای پایین و بدون حلال برای دستگاه پروسکایت و همچنین، مزایای یک ماده محصورکننده ارزان، پارافین را نشان دادند. پایداری گرمایی و رطوبتی چسب قابل‌پخت با پرتو فرابنفش (UVCA) با/بدون PSC‌های بسته‌بندی‌شده با پارافین با

آماده‌سازی دستگاه‌های پروسکایت پایدارتر تحت شرایط متفاوت کمک می‌کند.

### نتیجه‌گیری

به‌طور خلاصه، توسعه سریع اخیر سلول‌های خورشیدی پروسکایتی بیشتر به دلیل ویژگی‌های سودمند آشکار مواد پروسکایتی هالید فلزی، از جمله کاف‌های نواری قابل تنظیم، ضرایب جذب بالا و طول انتشار حامل طولانی بوده است. افزون‌براین، درک اساسی در مورد هسته لایه نازک و سینتیک رشد، ترمودینامیک، شیمی کلئیدی، فناوری پیشرفته لایه نازک، فناوری دوپینگ نیم‌رسانا، و مهندسی فصل مشترک، به پیشرفت سریع PSCها به سمت بهبود کارایی، پایداری و مقیاس‌پذیری کمک کرده است. تاکنون، PCEها و مقیاس‌پذیری PSCها با سلول‌های خورشیدی معمولی به‌صورت رقابتی بوده است که نشان می‌دهد PSC یک فناوری فوتوولتائیک امیدوارکننده است. با این حال، ناپایداری دستگاه‌های بدست‌آمده هنوز هم بزرگترین مانع برای صنعتی‌شدن فناوری‌های فوتوولتائیک پروسکایت است. در این بررسی، با یادگیری از راهبرد یادخوردگی، راهبردهای موجود برای بهبود طول عمر دستگاه‌های پروسکایتی خلاصه و تحلیل شد. این روش‌ها شامل رویینش، ماشین‌کاری، آزادسازی تنش، مواد خودترمیم‌شونده، و به‌کارگیری روش‌های به‌کمینه‌رساندن تماس بین سلول‌های خورشیدی پروسکایتی و محیط خورنده بود.

آزمایش دوره‌ای، همان‌طور که در شکل‌های ۹-ج و ۹-د نشان داده شده است، ردیابی می‌شود. می‌توان به‌روشنی مشاهده کرد که PSC بسته‌بندی‌شده با UVCA و پارافین، پایداری گرمایی عالی را نشان می‌دهد و حدود ۹۰ درصد از PCE اصلی را پس از بازپخت در دمای ۶۵ درجه سلسیوس در شرایط محیطی (۴۰ تا ۶۰ درصد رطوبت نسبی) به مدت ۱۰۰۰ ساعت حفظ می‌کند. در همین حال، PCE UVCA بدون سلول‌های بسته‌بندی‌شده با پارافین به سرعت کاهش یافت. اندازه‌گیری MPP اکنون به‌عنوان با ارزش‌ترین و قانع‌کننده‌ترین روش آزمون برای ارزیابی پایداری دستگاه‌های پروسکایت در نظر گرفته می‌شود. شکل ۹-ه ردیابی PSC MPPهای پوشینه‌دارشده با UVCA با/ بدون پارافین را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که UVCA بدون PSC بسته‌بندی‌شده با پارافین دچار پوسیدگی قابل‌توجه PCE می‌شود و دستگاه PCE به‌دلیل وجود رطوبت و اکسیژن در فضای بالای PSC در عرض ۱۰ ساعت به‌طور کامل تخریب می‌شود. در مقابل، UVCA با PSC بسته‌بندی‌شده با پارافین، پایداری زیادی را نشان می‌دهد. حتی پس از ۱۰۰۰ ساعت ردیابی MPP، PSC بیش از ۸۰ درصد از بازده اولیه خود را حفظ کرد. به‌طور خلاصه، بسته‌بندی دستگاه برای عملکرد عملی دستگاه‌های پروسکایتی بسیار مهم است، در حالی که فناوری‌های بسته‌بندی پیشرفته، مانند فرایند بدون حلال و بسته‌بندی برپایه یک لایه کاربردی اضافی، به

### مراجع

- [1] Gandhi MV, Thompson B. Smart materials and structures. Berlin: Springer Science & Business Media; 1992.
- [2] Zhang G, Zhang J, Yang Z, Pan Z, Rao H, Zhong X. Role of Moisture and Oxygen in Defect Management and Orderly Oxidation Boosting Carbon-Based CsPbI<sub>2</sub>Br Solar Cells to a New Record Efficiency. *Advanced Materials*. 2022;34(40):2206222. doi: [org/10.1002/adma.202206222](https://doi.org/10.1002/adma.202206222)
- [3] Muscarella LA, Ehrler B. The influence of strain on phase stability in mixed-halide perovskites. *Joule*. 2022;6(9):2016-31. doi: [org/10.1016/j.joule.2022.07.005](https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.07.005)
- [4] Kerner RA, Xu Z, Larson BW, Rand BP. The role of halide oxidation in perovskite halide

- phase separation. *Joule*. 2021;5(9):2273-95. doi: [org/10.1016/j.joule.2021.07.011](https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.07.011)
- [5] Wang T, Li Y, Cao Q, Yang J, Yang B, Pu X, et al. Deep defect passivation and shallow vacancy repair via an ionic silicone polymer toward highly stable inverted perovskite solar cells. *Energy & Environmental Science*. 2022;15(10):4414-24. doi: [org/10.1039/D2EE02227C](https://doi.org/10.1039/D2EE02227C)
- [6] Mirzaee M, Rezaei Abadchi M, Rashidi A. A review of the application of two-dimensional nanosheets as a reinforcement to increase the corrosion resistance of polymer coatings. *Journal of Studies in Color World*. 2023;13(2):95-132. doi: [20.1001.1.22517278.1402.13.2.1.5](https://doi.org/10.1001.1.22517278.1402.13.2.1.5)
- [7] Mirzaee M, Rezaei Abadchi M, Mehdikhani A, Riahi Noori N, Zolriasatein A. Corrosion and UV resistant coatings using fluoroethylene vinyl ether polymer. *Progress in Color, Colorants and Coatings*. 2023;16(1):47-57. doi: [10.30509/PCCC.2022.166951.1156](https://doi.org/10.30509/PCCC.2022.166951.1156)
- [8] Mirzaee M, Seif A, Rashidi A, Silvestrelli PL, Zhou Z, Pourhashem S, et al. Investigating the effect of PDA/KH550 dual functionalized h-BCN nanosheets and hybridized with ZnO on corrosion and fouling resistance of epoxy coating: Experimental and DFT studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022;10(6):108746. doi: [org/10.1016/j.jece.2022.108746](https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108746)
- [9] Ji X, Seif A, Duan J, Rashidi A, Zhou Z, Pourhashem S, et al. Experimental and DFT studies on corrosion protection performance of epoxy/graphene quantum dots@ TiO<sub>2</sub> nanotubes coatings. *Construction and Building Materials*. 2022;322:126501. doi: [org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126501](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126501)
- [10] Rezaei Abadchi M, Mirzaee M, Dorkhani E, Zolriasatein A, Noori NR. Surface modification of acrylic coating with anti-corrosion and anti-UV materials. *Journal of the Chinese Chemical Society*. 2022;69(6):912-24. doi: [org/10.1002/jccs.202200169](https://doi.org/10.1002/jccs.202200169)
- [11] Zhou Z, Seif A, Pourhashem S, Silvestrelli PL, Ambrosetti A, Mirzaee M, et al. Experimental and theoretical studies toward superior anti-corrosive nanocomposite coatings of aminosilane wrapped layer-by-layer graphene oxide@ MXene/waterborne epoxy. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2022;14(45):51275-90. doi: [org/10.1021/acscami.2c14145](https://doi.org/10.1021/acscami.2c14145)
- [12] Sharma M, Jindal H, Kumar D, Kumar S, Kumar R. Overview on corrosion, classification and control measure: a study. *Journal on Future Engineering & Technology*. 2021;17(2):13-24. doi: [10.2487/PES03.01.002](https://doi.org/10.2487/PES03.01.002)
- [13] Mirzaee M, Rashidi A, Seif A, Silvestrelli PL, Pourhashem S, Gohari MS, Duan J. Aminosilane co-functionalized h-BN nanofibers with anti-corrosive function for epoxy coating. *Reactive and Functional Polymers*. 2022;174:105244. doi: [org/10.1016/j.reactfunctpolym.2022.105244](https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2022.105244)
- [14] Mirzaee M, Rashidi A, Zolriasatein A, Rezaei Abadchi M. Corrosion properties of organic polymer coating reinforced two-dimensional nitride nanostructures: a comprehensive review. *Journal of Polymer Research*. 2021;28:1-40. doi: [org/10.1007/s10965-021-02434-z](https://doi.org/10.1007/s10965-021-02434-z)
- [15] Qin M, Li Y, Yang Y, Chan PF, Li S, Qin Z, et al. Regulating the crystallization kinetics and lattice strain of lead-free perovskites with perovskite quantum dots. *ACS Energy Letters*. 2022;7(10):3251-9. doi: [org/10.1021/acscenergylett.2c01692](https://doi.org/10.1021/acscenergylett.2c01692)
- [16] Zhang Z, Kamarudin MA, Baranwal AK, Kapil G, Sahamir SR, Sanehira Y, et al. Sequential passivation for lead-free tin perovskite solar cells with high efficiency. *Angewandte Chemie*. 2022;134(42):e202210101. doi: [org/10.1002/ange.202210101](https://doi.org/10.1002/ange.202210101)
- [17] Liu G, Zhong Y, Feng W, Yang M, Yang G, Zhong JX, et al. Multidentate chelation heals structural imperfections for minimized recombination loss in lead-free perovskite

- solar cells. *Angewandte Chemie*. 2022;134(40):e202209464. doi: [org/10.1002/ange.202209464](https://doi.org/10.1002/ange.202209464)
- [18] Zhang M, Li T, Zheng G, Li L, Qin M, Zhang S, et al. An amino-substituted perylene diimide polymer for conventional perovskite solar cells. *Materials Chemistry Frontiers*. 2017;1(10):2078-84. doi: [org/10.1039/C7QM00221A](https://doi.org/10.1039/C7QM00221A)
- [19] Chen S, Liu Y, Xiao X, Yu Z, Deng Y, Dai X, et al. Identifying the soft nature of defective perovskite surface layer and its removal using a facile mechanical approach. *Joule*. 2020;4(12):2661-74. doi: [org/10.1016/j.joule.2020.10.014](https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.10.014)
- [20] Zhao L, Li Q, Hou C-H, Li S, Yang X, Wu J, et al. Chemical polishing of perovskite surface enhances photovoltaic performances. *Journal of the American Chemical Society*. 2022;144(4):1700-8. doi: [org/10.1021/jacs.1c10842](https://doi.org/10.1021/jacs.1c10842)
- [21] Hosseinpour A, Abadchi MR, Mirzaee M, Tabar FA, Ramezanzadeh B. Recent advances and future perspectives for carbon nanostructures reinforced organic coating for anti-corrosion application. *Surfaces and Interfaces*. 2021;23:100994. doi: [org/10.1016/j.surfin.2021.100994](https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.100994)
- [22] Huang J, Yang S. Conversion of halide perovskite surfaces to insoluble, wide-bandgap lead oxysalts for enhanced solar cell stability. *Google Patents (EP3918639A4)*; 2020.
- [23] Li X, Zhang W, Guo X, Lu C, Wei J, Fang J. Constructing heterojunctions by surface sulfidation for efficient inverted perovskite solar cells. *Science*. 2022;375(6579):434-7. doi: [10.1126/science.abl5676](https://doi.org/10.1126/science.abl5676)
- [24] Li N, Tao S, Chen Y, Niu X, Onwudinanti CK, Hu C, et al. Cation and anion immobilization through chemical bonding enhancement with fluorides for stable halide perovskite solar cells. *Nature energy*. 2019;4(5):408-15. doi: [org/10.1038/s41560-019-0382-6](https://doi.org/10.1038/s41560-019-0382-6)
- [25] Wu Y, Wang Q, Chen Y, Qiu W, Peng Q. Stable perovskite solar cells with 25.17% efficiency enabled by improving crystallization and passivating defects synergistically. *Energy & Environmental Science*. 2022;15(11):4700-9. Doi: [org/10.1039/D2EE02277J](https://doi.org/10.1039/D2EE02277J)
- [26] Zheng X, Chen B, Dai J, Fang Y, Bai Y, Lin Y, et al. Defect passivation in hybrid perovskite solar cells using quaternary ammonium halide anions and cations. *Nature Energy*. 2017;2(7):1-9. doi: [org/10.1038/nenergy.2017.102](https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.102)
- [27] Guo Y, Aperi S, Li N, Chen M, Yin C, Yuan Z, et al. Phenylalkylammonium passivation enables perovskite light emitting diodes with record high-radiance operational life: the chain length matters. *Nature communications*. 2021;12(1):644. doi: [org/10.1038/nenergy.2017.102](https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.102)
- [28] Lin R, Xu J, Wei M, Wang Y, Qin Z, Liu Z, et al. All-perovskite tandem solar cells with improved grain surface passivation. *Nature*. 2022;603(7899):73-8. doi: [org/10.1038/s41586-021-04372-8](https://doi.org/10.1038/s41586-021-04372-8)
- [29] Jung EH, Jeon NJ, Park EY, Moon CS, Shin TJ, Yang T-Y, et al. Efficient, stable and scalable perovskite solar cells using poly (3-hexylthiophene). *Nature*. 2019;567(7749):511-5. doi: [org/10.1038/s41586-019-1036-3](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1036-3)
- [30] Azmi R, Ugur E, Seithkan A, Aljamaan F, Subbiah AS, Liu J, et al. Damp heat-stable perovskite solar cells with tailored-dimensionality 2D/3D heterojunctions. *Science*. 2022;376(6588):73-7. doi: [10.1126/science.abm5784](https://doi.org/10.1126/science.abm5784)
- [31] Zhang F, Park SY, Yao C, Lu H, Dunfield SP, Xiao C, et al. Metastable Dion-Jacobson 2D structure enables efficient and stable perovskite solar cells. *Science*. 2022;375(6576):71-76. doi: [10.1126/science.abj2637](https://doi.org/10.1126/science.abj2637)
- [32] Zhao X, Liu T, Burlingame QC, Liu T, Holley III R, Cheng G, et al. Accelerated aging of all-inorganic, interface-stabilized perovskite solar cells. *Science*. 2022;377(6603):307-10. doi: [10.1126/science.abn5679](https://doi.org/10.1126/science.abn5679)
- [33] Wang R, Xue J, Wang K-L, Wang Z-K, Luo Y, Fenning D, et al. Constructive molecular

- configurations for surface-defect passivation of perovskite photovoltaics. *Science*. 2019;366(6472):1509-13. doi: **10.1126/science.aay9698**
- [34] Yang L, Xiong Q, Li Y, Gao P, Xu B, Lin H, et al. Artemisinin-passivated mixed-cation perovskite films for durable flexible perovskite solar cells with over 21% efficiency. *Journal of Materials Chemistry A*. 2021;9(3):1574-82. doi: **org/10.1039/D0TA10717D**
- [35] Yang S, Chen S, Mosconi E, Fang Y, Xiao X, Wang C, et al. Stabilizing halide perovskite surfaces for solar cell operation with wide-bandgap lead oxysalts. *Science*. 2019;365(6452):473-8. doi: **10.1126/science.aax3294**
- [36] Uddin M, Rosman H, Hall C, Murphy P. Enhancing the corrosion resistance of biodegradable Mg-based alloy by machining-induced surface integrity: influence of machining parameters on surface roughness and hardness. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;90:2095-108. doi: **org/10.1007/s00170-016-9536-x**
- [37] Lin Y, Liu Y, Chen S, Wang S, Ni Z, Van Brackle CH, et al. Revealing defective nanostructured surfaces and their impact on the intrinsic stability of hybrid perovskites. *Energy & Environmental Science*. 2021;14(3):1563-72. doi: **org/10.1039/D1EE00116G**
- [38] Xue D-J, Hou Y, Liu S-C, Wei M, Chen B, Huang Z, et al. Regulating strain in perovskite thin films through charge-transport layers. *Nature communications*. 2020;11(1):1514. doi: **org/10.1038/s41467-020-15338-1**
- [39] Mirzaee M, Dolati A. Effect of content silver and heat treatment temperature on morphological, optical, and electrical properties of ITO films by sol-gel technique. *Journal of nanoparticle research*. 2014;16:1-11. doi: **org/10.1007/s11051-014-2582-0**
- [40] Mirzaee M, Dolati A. Effect of Cr doping on the structural, morphological, optical and electrical properties of indium tin oxide films. *Applied Physics A*. 2015;118:953-60. doi: **org/10.1007/s00339-014-8842-0**
- [41] Wang H, Zhu C, Liu L, Ma S, Liu P, Wu J, et al. Interfacial residual stress relaxation in perovskite solar cells with improved stability. *Advanced Materials*. 2019;31(48):1904408. doi: **org/10.1002/adma.201904408**
- [42] Liu T, Zhao X, Zhong X, Burlingame QC, Kahn A, Loo Y-L. Improved absorber phase stability, performance, and lifetime in inorganic perovskite solar cells with alkyltrimethoxysilane strain-release layers at the perovskite/TiO<sub>2</sub> interface. *ACS Energy Letters*. 2022;7(10):3531-8. doi: **org/10.1021/acseenergylett.2c01610**
- [43] Raga SR, Jung M-C, Lee MV, Leyden MR, Kato Y, Qi Y. Influence of air annealing on high efficiency planar structure perovskite solar cells. *Chemistry of Materials*. 2015;27(5):1597-1603. doi: **org/10.1021/cm5041997**
- [44] Wang L, Zhou H, Hu J, Huang B, Sun M, Dong B, et al. A Eu<sup>3+</sup>-Eu<sup>2+</sup> ion redox shuttle imparts operational durability to Pb-I perovskite solar cells. *Science*. 2019;363(6424):265-70. doi: **10.1126/science.aau5701**
- [45] Wang Y, Yang H, Zhang K, Tao M, Li M, Song Y. Tautomeric passivation strategy-assisted photostable perovskite solar modules. *ACS Energy Letters*. 2022;7(10):3646-52. doi: **org/10.1021/acsenergylett.2c01648**
- [46] Shi YR, Wang KL, Lou YH, Liu GL, Chen CH, Chen J, et al. Light-triggered sustainable defect-passivation for stable perovskite photovoltaics. *Advanced Materials*. 2022;34(50):2205338. doi: **org/10.1002/adma.202205338**
- [47] Liu H, Li N, Chen Z, Tao S, Li C, Jiang L, et al. Reversible phase transition for durable formamidinium-dominated perovskite photovoltaics. *Advanced Materials*. 2022;34(39):2204458. doi: **org/10.1002/adma.202204458**
- [48] Cui G, Bi Z, Zhang R, Liu J, Yu X, Li Z. A comprehensive review on graphene-based anti-corrosive coatings. *Chemical*

- Engineering Journal. 2019;373:104-21. doi: [org/10.1016/j.cej.2019.05.034](https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.05.034)
- [49] Turren-Cruz S-H, Hagfeldt A, Saliba M. Methylammonium-free, high-performance, and stable perovskite solar cells on a planar architecture. *Science*. 2018;362(6413):449-53. doi: [10.1126/science.aat3583](https://doi.org/10.1126/science.aat3583)
- [50] Kim M, Motti SG, Sorrentino R, Petrozza A. Enhanced solar cell stability by hygroscopic polymer passivation of metal halide perovskite thin film. *Energy & Environmental Science*. 2018;11(9):2609-19. doi: [org/10.1039/C8EE01101J](https://doi.org/10.1039/C8EE01101J)
- [51] Ma C, Park N-G. Paradoxical approach with a hydrophilic passivation layer for moisture-stable, 23% efficient perovskite solar cells. *ACS Energy Letters*. 2020;5(10):3268-75. doi: [org/10.1021/acsenrgylett.0c01848](https://doi.org/10.1021/acsenrgylett.0c01848)
- [52] Lee I, Yun JH, Son HJ, Kim T-S. Accelerated degradation due to weakened adhesion from Li-TFSI additives in perovskite solar cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017; 9(8): 7029-35. doi: [org/10.1021/acsami.6b14089](https://doi.org/10.1021/acsami.6b14089)
- [53] Jeong MJ, Yeom KM, Kim SJ, Jung EH, Noh JH. Spontaneous interface engineering for dopant-free poly (3-hexylthiophene) perovskite solar cells with efficiency over 24%. *Energy & Environmental Science*. 2021;14(4):2419-28. doi: [org/10.1039/D0E003312J](https://doi.org/10.1039/D0E003312J)
- [54] Li W, Dong H, Wang L, Li N, Guo X, Li J, Qiu Y. Montmorillonite as bifunctional buffer layer material for hybrid perovskite solar cells with protection from corrosion and retarding recombination. *Journal of Materials Chemistry A*. 2014;2(33):13587-92. doi: [org/10.1039/C4TA01550A](https://doi.org/10.1039/C4TA01550A)
- [55] Liu N, Xiong J, He Z, Yuan C, Dai J, Zhang Y, et al. Multifunctional Anti-Corrosive Interface Modification for Inverted Perovskite Solar Cells. *Advanced Energy Materials*. 2023 :2300025. doi: [org/10.1002/aenm.202300025](https://doi.org/10.1002/aenm.202300025)
- [56] Cheacharoen R, Boyd CC, Burkhard GF, Leijtens T, Raiford JA, Bush KA, Bent SF, McGehee MD. Encapsulating perovskite solar cells to withstand damp heat and thermal cycling. *Sustainable Energy & Fuels*. 2018; 2(11): 2398-2406. doi: [10.1039/C8SE00250A](https://doi.org/10.1039/C8SE00250A)
- [57] Mirzaee M, Dolati A. Effects of tin valence on microstructure, optical, and electrical properties of ITO thin films prepared by sol-gel method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2015;75:582-92. doi: [org/10.1007/s10971-015-3729-x](https://doi.org/10.1007/s10971-015-3729-x)
- [58] Weerasinghe HC, Dkhissi Y, Scully AD, Caruso RA, Cheng Y-B. Encapsulation for improving the lifetime of flexible perovskite solar cells. *Nano Energy*. 2015;18:118-25. doi: [org/10.1016/j.nanoen.2015.10.006](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.10.006)
- [59] Ma S, Bai Y, Wang H, Zai H, Wu J, Li L, et al. 1000 h operational lifetime perovskite solar cells by ambient melting encapsulation. *Advanced Energy Materials*. 2020 ;10(9):1902472. doi: [org/10.1002/aenm.201902472](https://doi.org/10.1002/aenm.201902472)

## A comprehensive review of corrosion prevention methods for perovskite solar cells

M. Mirzaee<sup>1,\*</sup>, T. Mohebbi<sup>2</sup>, A. Rashidi<sup>3</sup>

1. Assistant Prof. of Non-metallic Materials Research Group, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.
2. Ph.D Student of Chemistry Department, Kashan university, Kashan, Iran.
3. Professor of Carbon and Nanotechnology Research Center, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran.

**Abstract:** In recent years, perovskite solar cells (PSCs) have been considered one of the most promising photovoltaic technologies due to their affordability and excellent performance. However, perovskites are sensitive to parameters such as humidity, oxygen, temperature, and electrical bias. Changes in the composition and structure of materials from the precursor to the resulting perovskite lead to various defects. During long-term operation, these defects often act as the initiation of degradation to deteriorate PSC performance. Thus, various techniques have been designed to control these parameters, which include removing corrosion sites during construction, eliminating corrosion sites during machine operation, and preventing contact between the corrosive environment and perovskite. In this review, the lifetime of PSC is discussed from the point of view of corrosion science. Finally, the use of a series of anti-corrosion strategies (passivation, surface coating, machining) in corrosion science, significantly increases the stability of perovskite cells.

**Keywords:** Perovskites, solar cell, corrosion, lifetime, anti-corrosion.