

Stabilization of Polymer Solar Cells and Their Importance in Photovoltaic Systems

Samira Agbolaghi^{1*}, Omid Mohammadi-Vanyar¹, and Saleheh Abbaspoor²

1. Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Postal Code 5375171379, Tabriz, Iran

2. Mechanical Engineering Department, School of Engineering, Damghan University, Postal Code 36716-41167, Damghan, Iran

Received: 7 October 2020, accepted: 8 May 2021

ABSTRACT

Nowadays, the use of renewable energy resources has been considered as one of the imminent issues in human life. By converting solar energy into electricity, solar cells can meet most of the needs of communities for domestic and industrial use. Meanwhile, polymer solar cells have received much attention in recent years for their acceptable performance and easy manufacturing method. Nevertheless, researchers are trying to simultaneously decrease the cost of preparation and increase efficiency. In addition to the high efficacy of polymer solar cells, their stability in the manufacturing process is a challenge. For decades, rapid advances in photovoltaic cells have strongly linked the world of polymers and photovoltaic energies. Stable solar cells can be used in a variety of applications, such as space station equipment, solar vehicles, sensors, traffic lights, clocks and watches and more. Polymer solar cells with high sensitivity to environmental factors and configuration containing of degradable and oxidizing materials have attached much attention in the discussion of stability and performance. In the present study, effective properties in reducing the stability of polymer solar cells, including semi-stable morphology, oxygen, heat, mechanical stress, etc., will be discussed. Moreover, outstanding methods for increasing stability such as architectural manipulation and morphology of the active layer, reverse configuration, optimization of buffer layers, stable electrodes, molecular restructuring of polymers and other components, etc. are reviewed and in each section, the principal researches are briefly discussed.

Keywords:

polymer solar cell,
energy,
efficiency,
stability,
morphology

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: S.Agbolaghi@azaruniv.ac.ir

Please cite this article using:

Agbolaghi S., Mohammadi-Vanyar O., and Abbaspoor S., Stabilization of Polymer Solar Cells and Their Importance in Photovoltaic Systems: A Review, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **34**, 99-129, 2021.

پایدارسازی سلول‌های خورشیدی پلیمری و اهمیت آن‌ها در سامانه‌های فوتولتایی

سمیرا آقبلاغی^{۱*}، امید محمدی و نیار^۱، صالحه عباس‌پور^۲

۱- تبریز، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی، کد پستی ۵۳۷۵۱۷۱۳۷۹

۲- دامغان، دانشگاه دامغان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، کد پستی ۳۶۷۱۶-۴۱۱۶۷

دریافت: ۱۳۹۹/۷/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۱۸

دسترس پذیر در نشانی: <http://jips.ippi.ac.ir>

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،

سال سی و چهارم، شماره ۲،

صفحه ۱۲۹-۹۹، ۱۴۰۰

ISSN: 1016-3255

Online ISSN: 2008-0883

DOI: 10.22063/JIPST.2021.1807

چکیده

امروزه استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر یکی از دغدغه‌های اجتناب‌ناپذیر زندگی انسان است. سلول‌های خورشیدی با تبدیل انرژی خورشید به جریان الکتریسیته می‌توانند پاسخگوی بخش بزرگی از نیاز انسان امروزی به انرژی برق در مصارف خانگی و صنعتی باشند. از این میان، سلول‌های خورشیدی پلیمری به دلیل داشتن عملکرد مناسب و روش ساخت آسان در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. با وجود این، پژوهشگران در تلاش هستند، ضمن کاهش هزینه ساخت این نوع سلول‌های خورشیدی، بازده آن‌ها را نیز افزایش دهند. افزون بر کارایی زیاد سلول‌های خورشیدی پلیمری، پایداری آن‌ها نیز موضوع چالشی است. پیشرفت‌های سریع در زمینه سلول‌های فوتولتایی از چند دهه پیش به مرحله‌ای رسیده است که میان دنیای پلیمر و انرژی‌های فوتولتایی، پیوند ناگسستنی ایجاد کرده است. سلول‌های خورشیدی پایدار در کاربردهای مختلفی همچون تجهیزات ایستگاه فضایی، ماشین‌های خورشیدی، حسگرها، چراغ‌های راهنمایی و ساعت‌های خانگی و مچی استفاده می‌شوند. سلول‌های خورشیدی پلیمری با داشتن حساسیت زیاد در برابر عوامل محیطی و پیکربندی متشکل از مواد تخریب‌پذیر و اکسیدشونده توجه زیادی را در بحث پایداری و عملکرد جلب کرده‌اند. در این مقاله، خواص اثرگذار بر کاهش پایداری سلول‌های خورشیدی پلیمری نظیر شکل‌شناسی نیمه‌پایدار، اکسیژن، گرما و تنش مکانیکی بحث می‌شوند. افزون بر این، راهکارهای افزایش پایداری نظیر دستکاری ساختار شیمیایی و شکل‌شناسی لایه فعال، هندسه وارون، بهینه‌سازی لایه‌های بافوری، الکترودهای پایدار و تغییر ساختار مولکولی پلیمرها و سایر اجزای آن‌ها مرور شده و در هر بخش به‌اختصار پژوهش‌های شاخص انجام‌شده توضیح داده می‌شوند.

واژه‌های کلیدی

سلول خورشیدی پلیمری،
انرژی،
بازده،
پایداری،
شکل‌شناسی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

فهرست مطالب

۱- مقدمه	۱۰۱
۲- سلول‌های خورشیدی پلیمری	۱۰۱
۳- پایداری سلول‌های خورشیدی و اهمیت آن‌ها	۱۰۳
۴- ناپایداری سلول‌های خورشیدی پلیمری	۱۰۶
۴-۱ شکل‌شناسی نیمه‌پایدار و مشکلات لایه‌های بافری	۱۰۶
۴-۲ اکسیژن	۱۰۶
۴-۳ آب	۱۰۶
۴-۴ تابش	۱۰۷
۴-۵ گرما	۱۰۷
۴-۶ تنش مکانیکی	۱۰۷
۵- ناپایداری لایه فعال نوری	۱۰۷
۵-۱ ناپایداری رطوبتی	۱۰۷
۵-۲ ناپایداری فرابنفش	۱۰۷
۵-۳ ناپایداری دمایی	۱۰۸
۶- راهکارهای افزایش پایداری سلول‌های خورشیدی پلیمری	۱۰۸
۶-۱ مهندسی سامانه لایه فعال	۱۰۸
۶-۱-۱ افزودن جزء سوم به کامپوزیت لایه فعال	۱۰۸
۶-۱-۲ روش‌های آماده‌سازی	۱۰۸
۶-۲ استفاده از هندسه وارون	۱۰۸
۶-۳ بهینه‌سازی لایه‌های بافری	۱۰۸
۶-۳-۱ لایه انتقال‌دهنده حفره	۱۰۸
۶-۳-۲ لایه انتقال‌دهنده الکترون	۱۰۹
۶-۴ استفاده از الکترودهای پایدار	۱۰۹
۶-۵ کپسول‌دار کردن	۱۰۹
۶-۶ زنجیرهای جانبی اجزای الکترون‌دهنده	۱۰۹
۶-۷ زنجیرهای جانبی جداشدنی	۱۱۰
۶-۸ ایجاد پیوند عرضی	۱۱۰
۶-۹ اسیدهای کاتالیز شده جداشدنی	۱۱۰
۶-۱۰ پایداری شکل‌شناسی	۱۱۰
۶-۱۱ طراحی مواد لایه فعال	۱۱۱
۶-۱۱-۱ ساختار الکترون‌دهنده‌ها	۱۱۱
۶-۱۱-۲ الکترون‌گیرنده‌های فولرنی و غیرفولرنی	۱۱۱
۷- نتیجه‌گیری	۱۱۲
۸- مراجع	۱۱۲

۱- مقدمه

با پیشرفت روزافزون و سریع جوامع بشری و افزایش مصرف انرژی هم‌راستا با توسعه صنایع و تغییرات آب و هوایی، نیاز به انرژی‌های مختلف به‌عنوان مشکل جهانی مطرح می‌شود. آلودگی‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی نگرانی مهمی برای جامعه انسانی، فعالان

محیط‌زیست و سیاست‌مدارانی به‌شمار می‌آید که نگران سلامت انسان و محیط هستند [۱]. در دهه‌های اخیر، علاقه و تمرکز گسترده‌ای برای توسعه فناوری‌هایی نظیر زمین‌های گرمایی [۲،۳]، مزرعه‌های خورشیدی، نیروی آبی [۴،۵] و انرژی بادی وجود داشته است که می‌توانند از منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده کنند. از میان گزینه‌های مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی رایگان، پاک و بدون آلاینده بوده و از نظر زیست‌محیطی پذیرفتنی است و می‌تواند به‌طور مستقیم به سایر شکل‌های انرژی تبدیل شود [۶]. دو نسل کلی برای طبقه‌بندی سلول‌های خورشیدی در نظر گرفته شده است. نسل اول، سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بلوری بوده [۷،۸] و نسل دوم به سلول‌های خورشیدی لایه‌نازک معروف هستند که شامل سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بی‌شکل (amorphous silicon) [۹]، سلول‌های خورشیدی نقاط کوانتومی [۱۰-۱۳]، سلول‌های خورشیدی حساس به رنگینه [۱۴-۱۶]، سلول‌های خورشیدی آلی کوچک‌مولکول [۱۷-۱۹] و سلول‌های خورشیدی پلیمری [۲۰-۲۲] هستند.

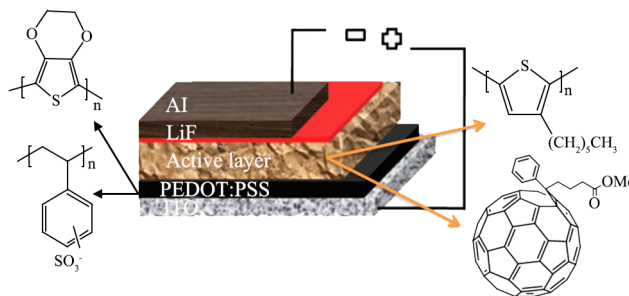
در کنار بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی پلیمری، افزایش پایداری آن‌ها نیز از چالش‌های روز سامانه‌های فوتوولتایی به‌شمار می‌آید، تولید آزمایشگاهی و صنعتی سلول‌های خورشیدی با بازده زیاد اما عمر مفید کم نمی‌تواند مشکلات و نیازهای روز بشر را به انرژی‌های تجدیدپذیر کاهش دهد. از این‌رو، پژوهشگران بسیاری در زمینه‌های تخصصی مختلف بر آن شده‌اند تا راهکارهایی را برای افزایش طول عمر و پایداری سلول‌های خورشیدی به‌ویژه سلول‌های خورشیدی پلیمری ارائه کنند. در این مقاله مروری، راهکارها و چاره‌اندیشی‌های گزارش شده برای افزایش پایداری سلول‌های خورشیدی پلیمری تا حد امکان گردآوری شده است.

۲- سلول‌های خورشیدی پلیمری

سلول‌های خورشیدی پلیمری به‌دلیل داشتن مشخصه‌هایی نظیر وزن سبک و ساخت آسان و مقرون به‌صرفه بودن توجه زیادی را در سال‌های اخیر جلب کرده‌اند [۲۳-۲۶]. یک سلول خورشیدی شامل اجزایی نظیر الکترودهای آندی و کاتدی و لایه فعال نوری است که نور خورشید را به جریان الکتریسیته تبدیل می‌کند. پیکربندی سلول خورشیدی پلیمری با لایه فعال پلی (۳-هگزیل تیوفن) و فنیل-C-بوتیریک اسید متیل استر (PCBM:P3HT) در شکل ۱ نشان داده شده است [۲۷]. لایه فعال نوری معمولاً میان لایه پوشش‌یافته با قلع ایندیم اکسید (ITO) و یک الکتروود کاتدی قرار داده می‌شود. در

قرار می‌گیرند و این به نوبه خود موجب افزایش انتقال حامل‌های بار و کاهش بازترکیب آن‌ها می‌شود.

شکل‌شناسی لایه فعال اثر بسیار زیادی بر کارایی سلول‌های خورشیدی دارد [۳۶-۳۸]. فولرن که از دگرشکل‌های مهم کربن به‌شمار می‌آید، می‌تواند نقش پذیرنده الکترون را در لایه فعال سلول‌های خورشیدی پلیمری ایفا کند [۳۹]. برخی از سلول‌های خورشیدی برای داشتن عملکرد بهینه نیازمند مسیرهایی از شبکه‌های متصل به هم پلیمر و فولرن هستند که از بلورش و جدایی فاز

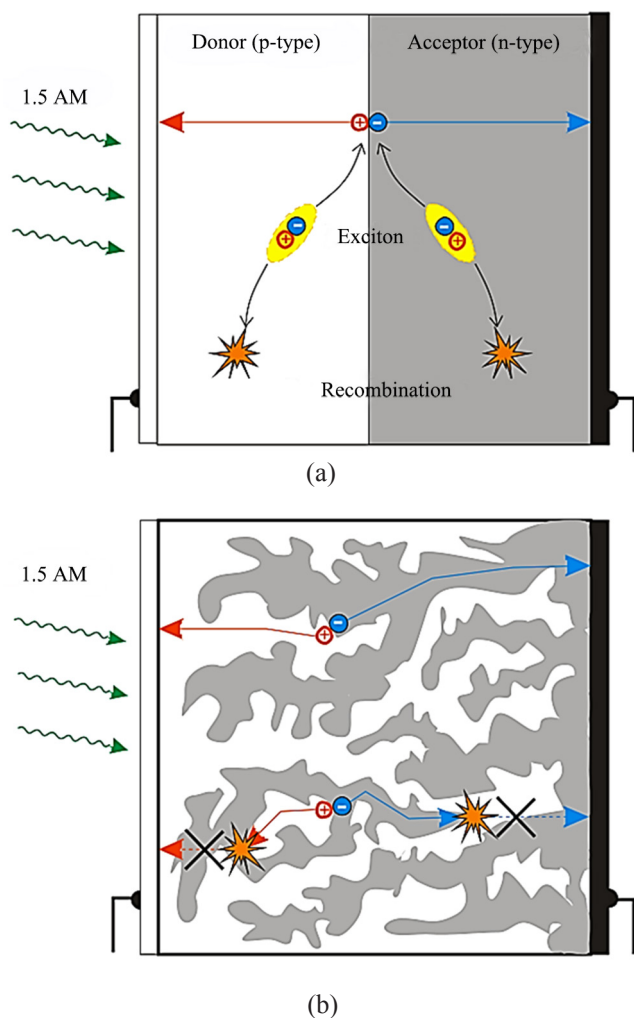


شکل ۱- طرحی از سلول خورشیدی با لایه فعال P3HT:PCBM [۲۷،۲۸].

Fig. 1. Scheme of a solar cell with the P3HT:PCBM active layer [27,28].

سلول‌های خورشیدی پلیمری، استفاده از پلی(۳،۴-اتیلن دی‌اکسی تیوفن:پلی‌استیرن سولفونات) (PEDOT:PSS) فقط برای انتقال حفره و نیز استفاده از لیتیم فلئوئورید روی آلومینیم به‌عنوان لایه بافری کاتی در برای گرفتگی حفره و انتقال بهتر الکترون به سمت فلز است. در سلول خورشیدی، در صورت نبود وجود لایه انتقال‌دهنده حفره، امکان تزریق بار و در نتیجه، تولید جریان وجود ندارد.

نور تابشی که درون لایه فعال نوری سلول خورشیدی پلیمری جذب می‌شود، ابتدا موجب تولید جفت الکترون-حفره متصل به هم یا اکسیتون‌ها (excitons) می‌شود. پس از اینکه اکسیتون‌ها به الکترون‌ها و حفره‌ها تفکیک شدند، بارهای مثبت و منفی به سمت الکترودهای مربوط حرکت می‌کنند تا جریان مستقیم خارجی ایجاد شود [۲۹]. ماده الکترون‌دهنده به‌عنوان حامل حفره‌ها عمل می‌کند که معمولاً از جنس پلیمری انتخاب می‌شود، در حالی که الکترون‌ها از راه ماده الکترون‌پذیرنده منتقل می‌شوند. پلیمرهای رسانا و کاربرد آن‌ها در مراجع گزارش شده‌اند [۳۰،۳۱]. بنابراین مسیرهایی تراوش برای هر دو نوع بار مورد نیاز است تا اطمینان حاصل شود که حامل‌های بار به‌دلیل به‌دام‌افتادن در نواحی جدا از هم، دچار بازترکیب نشوند [۳۲-۳۴]. ناجوراتصال توده‌ای (bulk heterojunction, BHJ) که جایگزین مناسبی برای اتصال دوبعدی بوده است، دارای مسیرهایی تراوش به‌صورت شبکه‌های به‌هم‌پیوسته فازهای الکترون‌دهنده و الکترون‌پذیرنده است. در شکل ۲ دو نوع ناجوراتصال با نام‌های ناجوراتصال دوبعدی و توده‌ای نشان داده شده است [۳۵]. در ناجوراتصال دوبعدی، اجزای الکترون‌دهنده و الکترون‌پذیرنده در لایه‌های جداگانه روی یکدیگر قرار می‌گیرند و فقط یک فصل مشترک میان آن‌ها وجود دارد. اما، در شکل‌شناسی‌های از نوع ناجوراتصال توده‌ای، اجزای الکترون‌دهنده و الکترون‌پذیرنده در جزایر نانومتری و میکرومتری فراوانی در مجاورت یکدیگر برای تبادل الکترون و حفره



شکل ۲- ساختار لایه فعال با (a) ناجوراتصال و (b) ناجوراتصال توده‌ای. بردارها مسیرهایی انتقال حامل‌های بار به سمت الکترودها و علامت‌های ستاره بازترکیب حامل‌های بار را نشان می‌دهند [۳۵].

Fig. 2. Active layer structure with (a) non-heterojunction and (b) bulk heterojunction. The arrows are depicting the pathways for charge mobility towards the electrodes and the stars stand for the recombinations [35].

بازده‌های گزارش شده در مدل‌های بزرگ [۸۴، ۸۵]، پایداری کم عامل محدودیت در تولید صنعتی بوده است [۸۶-۸۹]. برای تجاری‌سازی سلول‌های خورشیدی، باید کارایی تجهیزات آن‌ها حداقل تا ۲۵ سال حفظ شود [۹۰].

استفاده از نانوذرات و نانو هیبریدهای مختلف در لایه فعال سلول‌های خورشیدی برای افزایش پایداری گزارش شده است. از این میان، نانو ساختارهای کربنی توجه زیادی را در سلول‌های خورشیدی پلیمری به خود جلب کرده‌اند [۹۴-۹۱]. نانولوله‌های کربن تک دیواره و چند دیواره [۹۸-۹۵] و گرافن و مشتقات آن [۱۰۱-۹۹] به هسته‌زایی و بلورش در سامانه‌های دارای زنجیره‌های پلیمری بلورش پذیر منجر می‌شوند. این فرایند از راه برهم‌کنش‌های قوی π - π میان زنجیره‌های پلیمری مزدوج و سطوح کربنی امکان پذیر است [۱۰۵-۱۰۲]. تشکیل رسانا و مشتقات نانولوله‌های کربن و گرافنی افزون بر آسانی انتقال حامل‌های بار، کارایی و پایداری سلول‌های خورشیدی را نیز تا حد زیادی افزایش می‌دهد. در واقع، با طراحی نانو هیبریدهای پایدار، شکل‌شناسی لایه فعال در برابر عوامل خارجی تهدید کننده مقاومت می‌کند و همین موضوع موجب افزایش پایداری سلول‌های خورشیدی مربوط می‌شود [۱۰۵-۱۰۳]. به زبان ساده‌تر، برهم‌کنش‌های مناسب میان اجزای پلیمری و کربنی موجب ایجاد نانو ساختارهای منظم و مقاوم در برابر عواملی نظیر رطوبت و اکسیژن شده و در نتیجه، پایداری سلول خورشیدی مربوط افزایش می‌یابد [۱۰۶].

در پژوهشی، دو نوع ابرمولکول هسته-پوسته و هسته-جبه-پوسته بر پایه نانولوله‌های کربن پیوند سطحی شده و پلی(بنزودی تیوفن-بیس(تترادسیل-تین) نفتوتیادی آزلول) (PBDT-DTNT) تهیه شده و برای افزایش پایداری سلول خورشیدی استفاده شدند [۱۰۶]. نانو هیبریدهای تهیه شده در شکل‌های ۳ (a) و (b) و تغییرات مشخصه‌های سلول‌های خورشیدی ساخته شده در برابر زمان در شکل ۳ (c) نشان داده شدند. نانو ساختارهای هسته-پوسته از نانولوله‌های کربن پیوند سطحی شده با پلی(۳-دودسیل تیوفن) (PDDT) و آرایش یافته بازنجیره‌های PBDT-DTNT تهیه شدند. به طور مشابه، نانو هیبریدهای هسته-جبه-پوسته از نانولوله‌های کربن پیوند سطحی شده با پلی آنیلین و آرایش یافته بازنجیره‌های PBDT-DTNT ساخته شدند. همان‌طور که در نمودارهای شکل ۳ (c) دیده می‌شود، ساختارهای هسته-پوسته-جبه به طور چشمگیری مانع از کاهش تمام مشخصه‌های سلول‌های خورشیدی ساخته شده در برابر نور با گذشت ۳۰ روز می‌شوند. براین اثر مثبت این نوع نانو هیبریدهای پلیمری-کربنی، جلوگیری از کاهش بازده

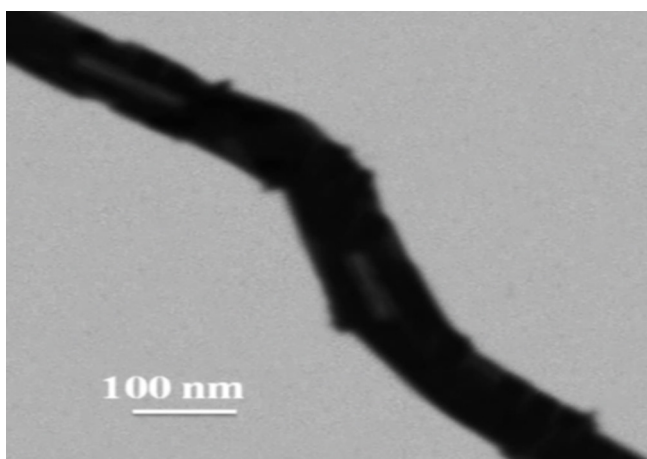
نانومقیاس در لایه فعال ایجاد می‌شوند [۴۱-۳۹]. پژوهش‌های اخیر نشان دادند، به دلیل بعضی معایب موجود در فولرن‌ها، استفاده از ترکیبات بدون فولرن بسیار سودمند بوده است [۴۲]. در حالت کلی، دست‌یافتن به شکل‌شناسی بهینه به دلیل مؤثر بودن ویژگی‌های سینتیکی و ترمودینامیکی کار آسانی نیست [۴۳]. برای بهبود شکل‌شناسی لایه فعال سلول‌های خورشیدی، روش‌های متعددی نظیر استفاده از عامل پیوند عرضی [۴۴، ۴۵]، سازگارکننده‌ها [۴۸-۴۶]، حلال‌ها [۴۹، ۵۰]، افزودنی‌ها [۵۴-۵۱] و مشتقات مختلف الکترون‌دهنده و الکترون‌پذیرنده [۵۷-۵۵] گزارش شده‌اند. افزون بر این، عمل‌آوری‌های گرمایی و حلالی [۶۱-۵۸]، الکتريکی، ریزموج [۶۳، ۶۲]، دستکاری وزن مولکولی [۶۴] و فضاویژگی (regioregularity) پلیمر الکترون‌دهنده [۶۵]، تغییر در ضخامت لایه فعال [۶۶] و ترکیب درصد آن [۷۰-۶۷] نیز به بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی منجر شده است. کوچک‌مولکول‌ها و پلیمرها دو خانواده مهم از افزودنی‌ها به‌شمار می‌آیند که برای کنترل شکل‌شناسی لایه فعال استفاده شده‌اند [۷۳-۷۱]. افزون بر این، مواد مختلفی نظیر نانولوله‌های کربن، گرافن، نانوذرات نقره و نقاط کوانتومی ترکیب شده در لایه فعال مطالعه شده‌اند [۷۶-۷۴]. اجزای کربنی نظیر نانولوله‌های کربن و صفحه‌های گرافنی با افزایش درصد و کیفیت بلورش پلیمرهای مزدوج الکترون‌دهنده در لایه فعال موجب تشکیل فازهای خالصی برای انتقال حفره می‌شوند. در نتیجه، جریان مدار کوتاه و نیز کارایی به‌صورت شایان توجهی ارتقا می‌یابند [۲۸]. پلیمرهای مزدوج از جمله پلی‌پیرول [۷۷]، پلی آنیلین [۷۸]، پلی (۳-آلکیل تیوفن) [۷۹] و پلی (آریلن اتیلن) [۸۰] آرایش‌های مؤثری روی نانولوله‌های کربن نشان داده‌اند.

۳- پایداری سلول‌های خورشیدی و اهمیت آن‌ها

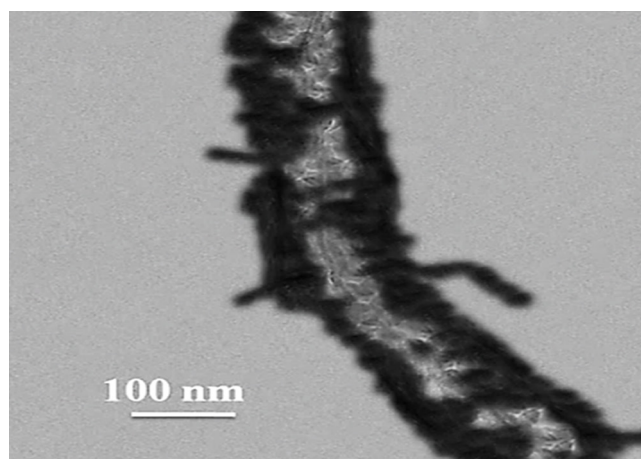
اصلی‌ترین محدودیتی که مانع از تولید سلول‌های خورشیدی آلی در مقیاس بزرگ می‌شود، پایداری کم آن‌ها در مقایسه با سایر فناوری‌هاست، زیرا به‌طور مستقیم به طول عمر سلول‌ها بستگی دارد. صفحه‌های خورشیدی در شرایط عملیاتی معمولاً به دماهای 65°C تا 85°C می‌رسند. بنابراین، تخریب گرمایی عامل مهمی است که باید کنترل شود [۸۱]. مطالعات درباره عملکرد سلول‌های خورشیدی، کاهش شدید بازده را پس از مدت زمان کوتاه عملکرد نشان می‌دهد [۸۲]. سنجش اقتصادی سلول‌های خورشیدی آلی و سیلیکونی نشان داد، عملکرد رقابتی هنگامی به‌دست می‌آید که بازده (۷٪) در مدل‌های بزرگ و با طول عمر حداقل ۵ سال بتواند حاصل شود [۸۳]. بر اساس

می‌آید [۱۰۷-۱۱۰]. در پژوهشی پایداری فوتولتایی سلول‌های خورشیدی PBDT-DTNT:PC71BM با استفاده از نانو ساختارهای متشکل از صفحه‌های گرافن اکسید کاهش یافته (rGO) و زنجیرهای پلیمری PBDT-DTNT به‌طور شایان توجهی افزایش یافت [۱۱۱]. پس از گذشت یک ماه، مشخصه‌های J_{sc} ، FF، V_{oc} و بازده تبدیل توان (PCE) به ترتیب به مقادیر $12/09 \text{ mA/cm}^2$ ، ۶۳٪، $0/64 \text{ V}$ و

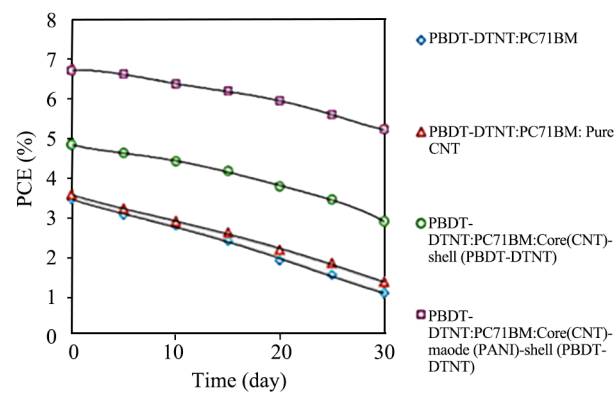
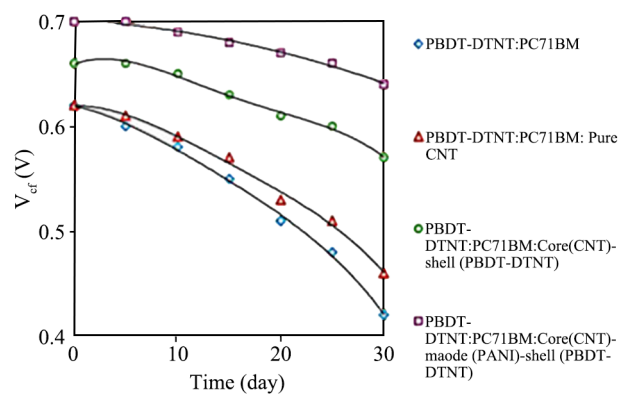
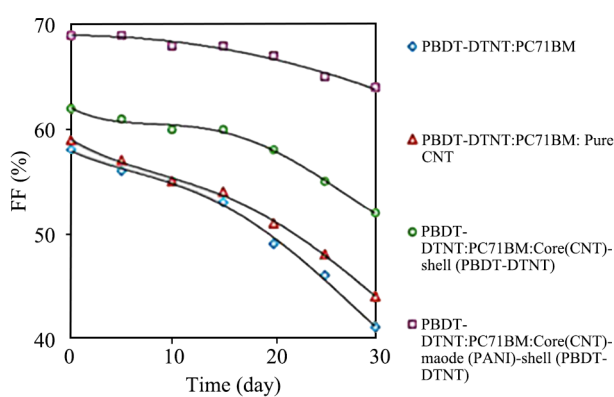
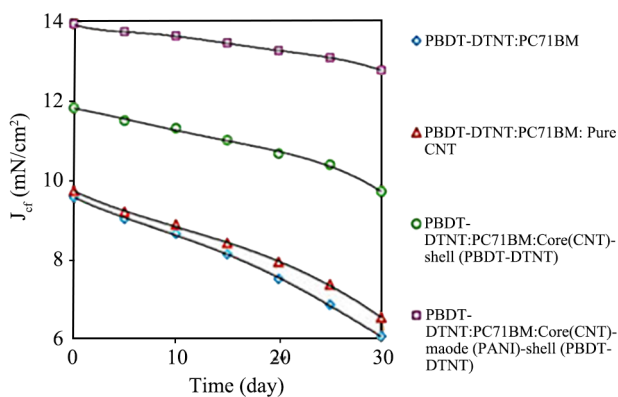
سامانه‌های فوتولتایی مربوط بوده است، به طوری که مقادیر جریان مدار کوتاه (J_{sc})، ضریب پرشدگی (FF)، ولتاژ مدار باز (V_{oc})، تحرک حفره‌ها، تحرک الکترون‌ها و در نهایت بازده به ترتیب $12/09 \text{ mA/cm}^2$ ، ۶۳٪، $0/64 \text{ V}$ ، $8/4 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V.s}$ و $9/7 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V.s}$ بوده‌اند. افزایش بلورینگی پلیمرهای الکترون‌دهنده راه دیگری برای افزایش پایداری نورشیمیایی در سلول‌های خورشیدی به‌شمار



(a)



(b)



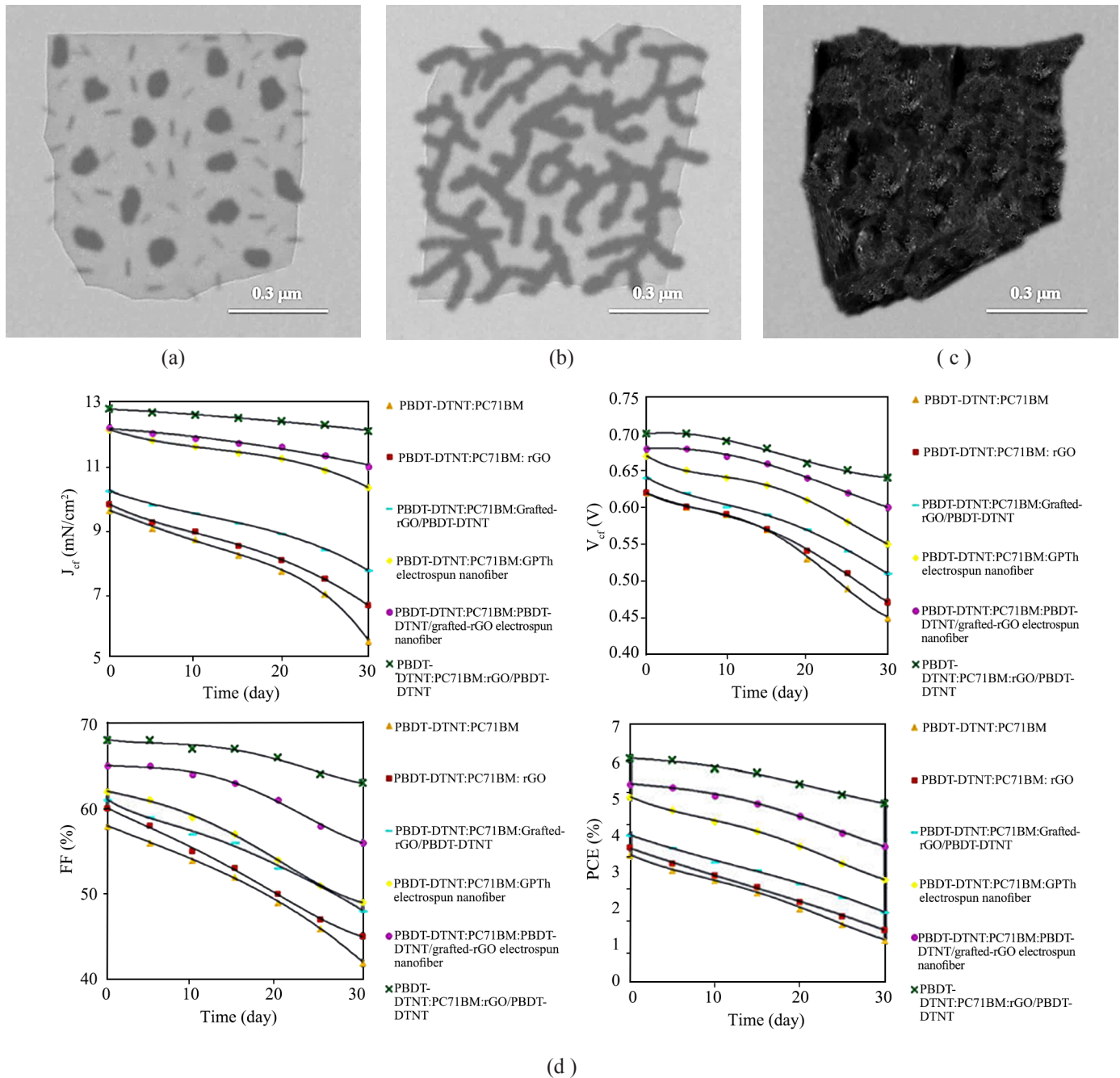
(c)

شکل ۳- ساختارهای (a) هسته-پوسته و (b) هسته-جبه-پوسته و (c) تغییرات مشخصه‌های سلول‌های فوتولتایی بر حسب زمان [۱۰۶].

Fig. 3. (a) The core-shell and (b) core-mantle-shell structures, and (c) the variations of photovoltaic cells characteristics versus time [106].

پس از آن در معرض آرایش زنجیرهای PBDDT-DTNT قرار گرفتند. فازهای تیره‌رنگ همان پلیمرهای آرایش‌یافته هستند که روی ماتریسی روشن‌تر از rGO چیدمان یافته‌اند. شکل ۴ (b) صفحه گرافنی سراسر پوشش‌یافته با نوعی پلی تیوفن را نشان می‌دهد که طی فرایند شیمیایی

۴/۸۷/ رسیده است. شکل‌های ۴ (a) تا (c) شکل‌شناسی‌های مختلف تهیه‌شده و شکل ۴ (d) تغییرات مشخصه‌های سلول‌های خورشیدی ساخته‌شده طی زمان را نشان می‌دهند. در شکل ۴ (a)، صفحه‌های rGO با اولیگومرهایی از جنس PDDT پیوند سطحی شدند و



شکل ۴- (a)، (b)، (c) نانوساختارهای متشکل از نانوصفحه‌های گرافن اکسید کاهش‌یافته (rGO) و زنجیرهای پلیمری PBDDT-DTNT و (d) تغییرات مشخصه‌های سلول‌های فوتولتایی برحسب زمان [۱۱۱].

Fig. 4. (a), (b), (c) Nanostructures composed of rGO nanosheets and the PBDDT-DTNT chains and (d) as well as the variations of photovoltaic cells characteristics versus time [111].

موجب آسیب پذیر شدن شکل‌شناسی لایه فعال می‌شوند [۱۲۶-۱۲۸]. لایه ITO می‌تواند به لایه PEDOT:PSS [۱۲۹] و لایه فعال [۱۳۰] نفوذ کند و آلومینیم نیز می‌تواند به لایه PEDOT:PSS [۱۳۱] و لایه فعال [۱۳۲] نفوذ کند. از طرفی، لایه PEDOT:PSS نیز می‌تواند به لایه فعال نفوذ کند [۱۳۳]. نفوذ مواد و لایه‌های بافری، با عوض کردن سطح‌های انرژی لایه‌های بافری و عمل کردن مانند مانع در برابر بازترکیب بار، پایداری سلول‌های خورشیدی آلی را کم می‌کند. شکل ۵ طرحی از عوامل مؤثر بر ناپایداری سلول‌های خورشیدی را نشان می‌دهد.

۴-۱۲ اکسیژن

الکترودهای فلزی نظیر آلومینیم (Al) و کلسیم (Ca) با نفوذ اکسیژن موجب اکسایش می‌شوند. در ادامه، اکسیژن نفوذکننده درون لایه فعال در واکنش‌های نوراکسایش بین مواد الکترون‌دهنده [۱۳۵] و الکترون‌پذیرنده [۱۳۶] نقش ایفا می‌کند. افزون بر این، دوپه کردن اکسیژن در لایه فعال می‌تواند تراکم حفره‌ها را بهبود بخشد که موجب افزایش چگالی حفره‌های زیری برای الکترودها و کاهش ضریب پرتشدگی (fill factor, FF) و ولتاژ مدار باز (open circuit voltage, V_{OC}) می‌شود [۱۳۳، ۱۳۷].

۴-۳ آب

آب می‌تواند الکترودهای فلزی با عملکرد ضعیف را به‌عنوان عنصر اکسند خراب کند [۱۱۳]. همچنین، نفوذ آب به سطح مشترک لایه فعال و الکترودها می‌تواند لایه عایق اکسید فلزی میان دو لایه تشکیل

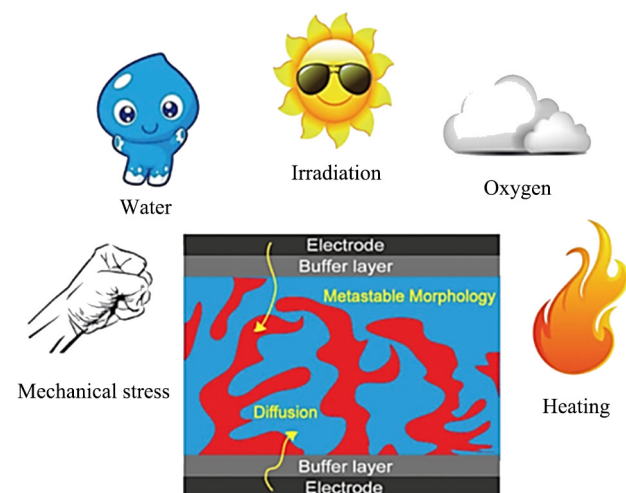
به‌دست آمده است. در نهایت، شکل ۴ (c) نمونه صفحه rGO پیوند سطحی نشده اما آرایش یافته با زنجیرهای پلیمری PBDT-DTNT را نشان می‌دهد. در واقع، با پیوند سطحی صفحه‌های rGO، مقدار آرایش زنجیرهای پلیمری ثانویه روی آن‌ها کاهش یافته است. در نتیجه، با تهیه ساختار آرایش یافته بهینه و متعادل، بیشترین مقدار پایداری فوتوولتایی حاصل شده است [۱۱۱].

۴- ناپایداری سلول‌های خورشیدی پلیمری

ناپایداری سلول‌های خورشیدی پلیمری در هوا و زیر نور خورشید مشکل مهمی است که مانع از تجاری شدن آن‌ها می‌شود. ناپایداری سلول‌های خورشیدی پلیمری در هوا از الکترودهای خوردنده و مواد فعال نوری ناشی می‌شود که در برابر واکنش با اکسیژن و آب موجود در هوا آسیب‌پذیر هستند [۱۱۲، ۱۱۳]. اصلی‌ترین علل تخریب سلول‌های فوتوولتایی را می‌توان در چند گروه شامل نفوذ آب و اکسیژن از هوا، نفوذ یون‌های ایندیم و آلومینیم از الکترودها، خاصیت نم‌گیری PEDOT:PSS و تغییرات مؤثر در سطح مشترک پلیمر و الکترودها [۱۱۴-۱۱۶] دسته‌بندی کرد. در واقع سازوکار تخریب می‌تواند به دو عامل بیرونی و درونی تقسیم شود. عامل بیرونی از جمله آب [۱۱۵]، اکسیژن [۱۱۷]، نور [۱۱۸، ۱۱۹] یا گرما [۱۲۰] هستند که موجب سرعت‌بخشیدن به ایجاد عوامل تخریب بیرونی می‌شوند. عوامل تخریب داخلی شامل ریزش الکترودها، تغییر شکل شکل‌شناسی و مراکز بازترکیب هستند [۱۲۱]. نور و گرما موجب تغییر شکل شکل‌شناسی لایه فعال [۱۲۲]، ریزش الکترودها و لایه داخلی [۱۲۳] و برهم‌کنش الکترودها با مواد آلی [۱۲۴] می‌شوند.

۴-۱ شکل‌شناسی نیمه‌پایدار و مشکلات لایه‌های بافری

لایه فعال، کامپوزیتی بسیار مهم در سلول‌های خورشیدی آلی است که در آن دو یا سه فاز (فازهای الکترون‌دهنده، الکترون‌پذیرنده و ترکیب الکترون‌دهنده و الکترون‌پذیرنده) وجود دارد. جدایی فاز به دلیل تحرک زیاد مواد آلی، نیمه‌پایدار است. به‌کارگیری افزودنی‌های حلال با دمای جوش زیاد در لایه فعال از اصلی‌ترین راه‌های پیش رو در پژوهش‌های سلول‌های خورشیدی آلی در ده سال اخیر شده است. اگرچه افزودنی‌های حلالی موجب افزایش بازده شده از سوی دیگر موجب کاهش پایداری سامانه با شکل‌گیری شکل‌شناسی ناپایدارتر در لایه فعال نیز می‌شوند [۱۲۸-۱۲۵]. زیرا، با تشکیل فازهای الکترون‌دهنده و پذیرنده بسیار بزرگ در مقیاس‌های چند صد نانومتر و میکرومتر



شکل ۵- عوامل مؤثر بر ناپایداری سلول‌های خورشیدی پلیمری [۱۳۴].
Fig. 5. Effective parameters of the instability of polymer solar cells [134].

بلوری شدن می‌شود، نیز مؤثر است که یکی دیگر از مشکلات تخریب فیزیکی به دلیل گرماست. همچنین، تخریب گرمایی می‌تواند در سطح مشترک لایه فعال-الکتروود [۱۵۴] و لایه بافری [۱۵۶] رخ دهد.

۴-۶ تنش مکانیکی

تنش مکانیکی می‌تواند موجب تخریب در لایه فعال و بافر و سطح مشترک آن‌ها شود. اعمال خطی تنش می‌تواند موجب کرنش مواد آلی شود. پس از اعمال تنش، فیلم‌های متشکل از PCBM:P3HT، حداکثر ۵۰٪ از کارایی خود را حفظ می‌کنند [۱۵۷]. Dauskardt و همکاران دریافتند، مقدار زیاد رطوبت [۱۵۷] و دما [۱۵۸] به نبود انسجام سرعت می‌بخشد. افزون بر این، شکستن لایه فعال و بافری و سطح مشترک میان آن‌ها یکی دیگر از سازوکارهای تخریب مکانیکی است [۱۵۹، ۱۶۰].

۵-۵ ناپایداری لایه فعال نوری

ناپایداری سامانه‌های فوتوولتایی به‌طور عمده از تخریب مواد لایه فعال ناشی می‌شود که ریشه آن نیز به تخریب و اکسایش اجزای پلیمری الکترووددهنده و اجزای کربنی الکترون‌پذیرنده بازمی‌گردد که در برابر رطوبت و گرما به‌مدت طولانی آسیب‌پذیرند [۱۶۱، ۱۶۲].

۵-۱ ناپایداری رطوبتی

تخریب سلول‌های خورشیدی پلیمری در محیط مرطوب مسئله چالش‌برانگیز دیگری است که باید مورد توجه قرار گیرد [۱۶۳]. در سال‌های اخیر، سلول‌های خورشیدی دوبعدی به دلیل پایداری مطلوب بسیار جالب توجه بوده‌اند [۱۶۴]. نم‌گیری نمک‌های آمونیومی مختلف می‌تواند پایداری رطوبتی دوبعدی را تعیین کند [۱۶۵].

۵-۲ ناپایداری فرابنفش

یکی از عوامل اثرگذار بر تخریب سلول‌های خورشیدی پلیمری، پرتو فرابنفش یا همان تابش است [۱۶۶]. تخریب نوری زیر تابش پیوسته یکی از مشکلات اساسی مرتبط با پایداری نوری است [۱۷۰-۱۶۷]. Leijtens و همکاران [۱۷۱] گزارش کردند، سامانه‌های با لایه TiO_2 در معرض تخریب فرابنفش قرار دارند. در واقع، ناپایداری سامانه‌های فوتوولتایی دارای لایه جاذب تیتانیم اکسید به دلیل جذب سطحی مولکول‌های اکسیژن تشدید می‌شود. بنابراین، استفاده از لایه‌های جایگزین با کارایی یکسان همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است [۱۷۱].

دهد که موجب کاهش اثرگذار سطح مشترک لایه فعال می‌شود و به ضرر استخراج بار است [۱۳۸]. از طرفی، نفوذ آب به لایه فعال می‌تواند فینیل-C61-بوتیریک اسید متیل استر (PC61BM) را جابه‌جا کند که سبب کلوخه‌شدن شدید فولرن می‌شود. مقیاس بزرگ جدایی فازها سطوح مشترک دهنده-پذیرنده را کاهش می‌دهد که برای تفکیک اکسیژن مضر است و موجب کاهش شدید ویژگی‌های دستگاه می‌شود [۱۳۹]. در دنیای واقعی، آب و اکسیژن همیشه هم‌زمان به سامانه نفوذ می‌کنند و پایداری آن را کاهش می‌دهند [۱۴۲-۱۴۰].

۴-۴ تابش

سلول خورشیدی سامانه‌ای است که نور را به الکتریسیته تبدیل می‌کند. اما، بسیاری از سلول‌های خورشیدی آلی در برابر تابش ناپایدار هستند. سلول‌های خورشیدی بر پایه پلی(۲-متوکسی-۵-پایه) [۷۰، ۳۰-] دی‌متیل-اکتیلوکسی) [۴، ۱-] فینیل وینیلن (MDMO-PPV/PC61BM) پس از قرارگرفتن در روشنایی پیوسته به مدت ۲۲ h، ۵۰٪ بازده خود را حفظ کرده‌اند [۱۴۳]. دلایل اصلی برای ناپایداری سامانه فوتوولتایی در برابر تابش عبارت از تخریب نورشیمیایی و نورفیزیکی در لایه فعال، لایه بافری و سطح مشترک لایه فعال و الکتروود است. مهم‌ترین تخریب نورشیمیایی واکنش نوراکسایشی در لایه فعال است. پژوهشگران تعدادی واکنش‌های نوراکسایشی مناسب از پذیرنده‌ها و دهنده‌ها را پیشنهاد کرده‌اند [۱۴۷-۱۴۴]. افزون بر واکنش‌های نوراکسایشی در لایه فعال، نور-اولیگومرشدن پذیرنده‌های فولرنی [۱۴۸] و نورکافت دهنده‌های پلیمری [۱۴۹] در لایه فعال دیده شده است که مسئول ناپایداری سلول‌های خورشیدی در برابر تابش به‌شمار می‌آیند. همچنین، واکنش‌های نوراکسایشی می‌تواند در لایه بافری [۱۵۰] و سطوح مشترک لایه فعال و الکتروود [۱۲۴] رخ دهند.

۴-۵ گرما

دمای عملیاتی سلول‌های خورشیدی بسیار زیاد بوده و در لایه فعال آن‌ها، دمای عملیاتی از دمای تجزیه بسیاری از مواد فعال بیشتر است [۱۵۳-۱۵۱]. بنابراین، تخریب فیزیکی یکی از مهم‌ترین تخریب‌های گرمایی در لایه فعال به‌شمار می‌آید [۱۵۴]. Lidzey و همکاران [۱۵۵] رابطه شکل‌شناسی و دماهای گرمادهی را بررسی کردند. وقتی دمای محیط از دمای انتقال شیشه‌ای پلیمرها بیشتر می‌شود، شکل‌شناسی لایه فعال ناپایدار می‌شود. افزایش تحرک پلیمرها در بیش از دمای انتقال شیشه‌ای نه فقط بر مکان‌های تجمع پلیمری اثرگذار است، بلکه در افزایش گرما که موجب تجمع فولرن‌ها و

۳-۵ ناپایداری دمایی

وارون در سلول‌های خورشیدی دهنده-PCBM و نوار انرژی کم با بازده زیاد و سلول‌های خورشیدی آلی کوچک مولکول‌ها، پایداری در برابر هوا را بهبود بخشید. Chang و همکاران [۱۹۴] سلول‌های خورشیدی بر پایه PTB7/PC71BM را با هندسه‌های متداول و وارون ساختند و پایداری آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج نشان داد، هندسه وارون در مقایسه با هندسه متداول دارای پایداری به مراتب بیشتری بوده است.

۳-۶ بهینه‌سازی لایه‌های بافری

۱-۳-۶ لایه انتقال دهنده حفره

لایه بافری PEDOT:PSS بیشترین استفاده در لایه انتقال دهنده حفره را دارد که به‌طور جدی در برابر هوا و تنش‌های مکانیکی ناپایدار است و دلیل آن بیشتر بودن مقدار اسیدینگی است. به‌کارگیری لایه PEDOT:PSS اصلاح شده، اکسید فلزی، گرافن اکسید و مواد پلیمری-آلی به‌عنوان جایگزین می‌توانند به‌طور شایان توجهی پایداری را افزایش دهند [۱۹۷-۱۹۵]. اصلاح لایه PEDOT:PSS با افزودن اجزای مختلف از جمله افزودنی‌های پلیمری، افزودنی‌های حلالی، اکسیدهای فلزی و نانوذرات راه‌حل مناسبی برای افزایش پایداری در برابر هواست [۲۰۱-۱۹۸]. افزون بر تغییر دادن لایه PEDOT:PSS، استفاده از سایر مواد برای جایگزینی این لایه یکی دیگر از راه‌های مؤثر برای بهبود پایداری در برابر هواست. اکسیدهای فلزی همچون MoO_x [۲۰۴-۲۰۲]، نیکل اکسید (NiO_x) [۲۰۶، ۲۰۵]، وانادیم پنتواکسید (V_2O_5) [۲۰۷]، تنگستن اکسید (WO_x) [۲۰۸]، Cu [۲۰۹] و Fe_3O_3 [۲۱۰] مواد انتخابی هستند. گرافن اکسید نیز به‌عنوان لایه انتقال دهنده حفره بهتر برای پایداری در برابر هوا معرفی شده است [۲۱۴-۲۱۱]. افزون بر مواد غیرآلی، مواد آلی نیز می‌توانند به‌عنوان جانشینی برای لایه PEDOT:PSS به‌منظور افزایش پایداری در برابر هوا استفاده شوند [۲۱۶، ۲۱۵]. پایداری مکانیکی یکی دیگر

پایداری دمایی سلول‌های خورشیدی پلیمری نگرانی جدی به‌وجود آورده است که به دمای زیاد و در نتیجه تخریب دستگاه منجر می‌شود [۱۷۲]. Kitamura و همکاران [۱۷۳] تنش‌های دمایی را با استفاده از الکترودهای مایع یونی و پلاتین پوشش یافته با ورقه تیتانیم به‌عنوان الکتروده متقابل بررسی کردند. بهترین سلول‌های خورشیدی پایداری مناسبی را در هر دو شرایط ۱۰۰۰ h آزمایش (در 85°C و ۸۵٪ RH) و ۲۰۰ آزمایش تنش دمایی دوره‌ای (دوره‌های گرمایش-سرمایش بین ۴۰ و 90°C) نشان دادند.

۶- راهکارهای افزایش پایداری سلول‌های خورشیدی پلیمری

۱-۶ مهندسی سامانه لایه فعال

۱-۶-۱ افزودن جزء سوم به کامپوزیت لایه فعال

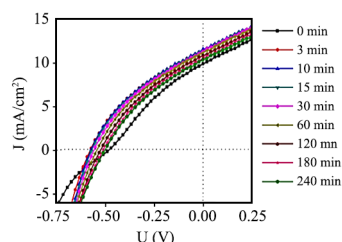
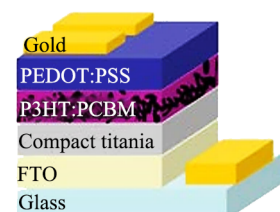
مشقات فولرن می‌توانند بهبود یابند و مانند عوامل ایجاد پیوند عرضی در لایه فعال به‌عنوان سومین کامپوزیت برای افزایش پایداری دمایی و نیز پایداری مکانیکی به‌کار روند [۱۷۶-۱۷۴]. Lipomi و همکاران [۱۷۷] PC71BM را در ترکیب P3HT:PC61BM به‌عنوان جزء سوم برای افزایش پایداری مکانیکی سلول‌های خورشیدی به‌کار بردند. استفاده از سازگارکننده‌ها به‌عنوان جزء سوم در لایه فعال، راه‌حل افزایش هم‌زمان پایداری دمایی و مکانیکی سلول‌های خورشیدی پلیمری است [۱۸۱-۱۷۸].

۲-۱-۶ روش‌های آماده‌سازی

تهیه محلول، اولین گام در ساخت لایه فعال است و در این زمینه راه‌حلی برای افزایش پایداری در برابر نور-هوا و گرما به‌کار گرفته می‌شوند [۱۸۴-۱۸۲]. عمل‌آوری ثانویه، آخرین مرحله در ساخت لایه فعال است و پایداری در برابر گرما به‌خوبی پایداری در برابر نور-هوا می‌تواند با روش‌های ارائه شده در این گام افزایش یابد [۱۸۸-۱۸۵].

۲-۶ استفاده از هندسه وارون

به‌کاربردن هندسه وارون (inverted geometry) یکی از راه‌حل‌های مؤثر برای افزایش شایان توجه پایداری در برابر هوا در سلول‌های خورشیدی پلیمری است [۱۹۲-۱۸۹]. شکل ۶ ساختار هندسه وارون را به‌همراه نمودار جریان-ولتاژ مربوط نشان می‌دهد [۱۹۳]. افزون بر سلول‌های خورشیدی بر پایه PCBM:P3HT، به‌کاربردن هندسه



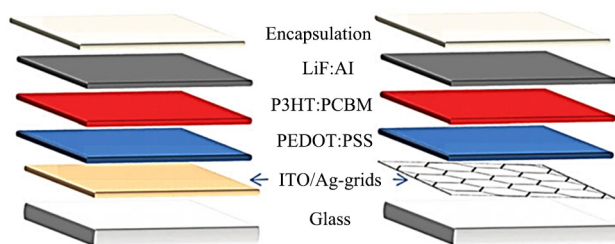
شکل ۶- پیکربندی یک هندسه وارون سلول خورشیدی P3HT:PCBM به‌همراه منحنی‌های جریان-ولتاژ مربوط [۱۹۳].
Fig. 6. An inverted configuration of P3HT:PCBM solar cell accompanied by the current-voltage curves [193].

۶-۵ کپسول دار کردن

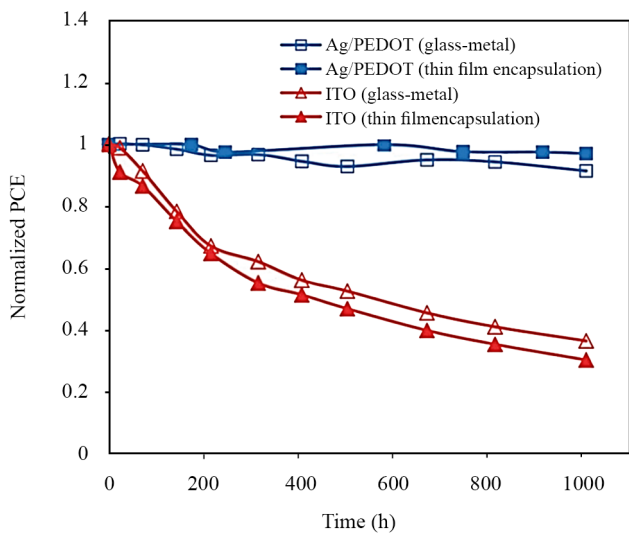
به‌کارگیری مواد آلی و غیرآلی و کمپلکس آلی-غیرآلی برای کپسول‌دار کردن سلول‌های خورشیدی پلیمری یکی از راه‌های مؤثر افزایش پایداری در برابر هواست [۲۵۴-۲۵۷]. رزین‌های اپوکسی و شیشه از رایج‌ترین مواد استفاده‌شده در این زمینه هستند [۲۶۱-۲۵۸]. اما فرایند کپسول‌دار کردن با رزین UV-شیشه معمولاً تنش‌های مکانیکی اضافی را به سلول‌های خورشیدی تحمیل و نیز حلال رزین لایه فعال را تخریب می‌کند. برای جلوگیری از این تنش‌های مکانیکی اضافی و آثار مضر حلال، کمپلکس‌های آلی-غیرآلی دیگری برای کپسول‌دار کردن لایه‌ها به‌کار گرفته شدند [۲۶۴-۲۶۲].

۶-۶ زنجیرهای جانبی اجزای الکترون‌دهنده

طراحی بهینه زنجیرهای جانبی مواد الکترون‌دهنده نظیر استفاده از



(a)



(b)

شکل ۷- (a) ساختار سلول خورشیدی و (b) نمودار تغییرات بازده با زمان [۲۴۴].

Fig. 7. (a) Solar cell structure and (b) the graphs of PCE alterations versus time [244].

از مشکلات لایه بافری PEDOT:PSS است که راه‌حل‌هایی برای آن در مراجع گزارش شده است [۲۲۰-۲۱۷].

۶-۳ لایه انتقال‌دهنده الکترون

استفاده از اکسید فلزی، فلز پایدار و پلیمرهای انتقال‌دهنده الکترون برای جایگزینی LiF و Ca می‌تواند پایداری در برابر هوا را افزایش دهد [۲۲۴-۲۲۱]. افزون بر LiF و Ca استفاده‌شده در هندسه متداول، ZnO استفاده‌شده در هندسه وارون نیز می‌تواند برای دست‌یابی به پایداری بهتر هوا اصلاح شود [۲۲۸-۲۲۵]. افزون بر اصلاح ZnO، تعویض آن با پلیمرهای انتقال‌دهنده الکترون (از جمله PEI و پلیمرهای بر پایه DPP) یکی دیگر از راه‌های بهبود پایداری در برابر هواست [۲۳۱-۲۲۹]. پایداری نوری کم یکی دیگر از نقص‌های سلول‌های خورشیدی پلیمری دارای لایه ZnO است [۲۳۵-۲۳۲].

۶-۴ استفاده از الکترودهای پایدار

مؤثرترین روش، تعویض الکترودهای بی‌اثر با الکترودهای اکسایشی است که ساختار وارون نامیده می‌شود و در آن الکترودهای بی‌اثر کپسولی می‌شود [۲۳۶، ۲۳۷]. لایه‌های ITO و Al به‌ترتیب بیشترین مواد استفاده‌شده برای الکترودهای شفاف و الکترودهای کدرتر در سلول‌های خورشیدی پلیمری هستند. اما، آن‌ها کاملاً در برابر تنش‌های مکانیکی، تابش و هوا ناپایدارند. به‌کارگیری مواد شفاف مانند فلز و آلیاژ، نانوسیم‌های فلزی، گرافن، پلیمر و ITO اصلاح‌شده به‌جای ITO و فلزات پایدار نظیر Cu، Au و Ag به‌جای Al می‌تواند به‌طور شایان توجهی پایداری را افزایش دهد [۲۳۸، ۲۳۹]. در کنار مواد فلزی پایدار، گرافن [۲۴۱، ۲۴۰] و PEDOT:PSS [۲۴۲، ۲۴۳] نیز می‌توانند به‌عنوان الکترودهای شفاف برای افزایش پایداری مکانیکی استفاده شوند. افزون بر پایداری مکانیکی، پایداری نوری [۲۴۴، ۲۴۵] و پایداری در برابر هوا [۲۴۶-۲۴۹] نیز می‌تواند با استفاده از الکترودهای شفاف پایدار افزایش یابد. مشابه با جایگزینی الکترودهای شفاف، استفاده از مواد پایدار مانند Cu، Au و Ag به‌جای Al به‌عنوان الکترودهای کدرتر روش مؤثری برای افزایش پایداری در برابر هوا به‌شمار می‌آید [۲۵۳-۲۵۰]. شکل ۷ ساختار سلول خورشیدی با الکترودهای پایدار Ag و نمودار تغییرات بازده را با زمان نشان می‌دهد [۲۴۴]. نتایج حاصل نشان داد، پایداری سلول‌های خورشیدی ساخته‌شده با استفاده از لایه‌های آندی Ag/PEDOT:PSS به‌طور شایان توجهی بیشتر از سامانه‌های فوتوولتایی تهیه‌شده بر پایه آندهای متداول ITO بوده است. دلیل آن را می‌توان به تابع کار و ساختار ایده‌آل‌تر لایه‌های آندی جدید نسبت داد [۲۴۴].

عملیاتی طولانی حفظ می‌کند [۲۹۲-۲۹۴]. زنجیرهای جانبی آلکیل به حل‌پذیری و تجمع پلیمرهای الکترون‌دهنده کمک می‌کنند. اما از طرفی، پس از ساخت دستگاه در واقع این زنجیرهای جانبی آلکیل بدون استفاده می‌مانند و پایداری را محدود می‌کنند. بنابراین، تغییر شکل زنجیرهای جانبی آلکیل به زنجیرهای جانبی جداشدنی گرمایی می‌تواند پایداری گرمایی و نوری و پایداری در برابر هوا را افزایش دهد [۲۹۵-۲۹۸]. به طوری که نقش دوگانه‌ای را در حل‌پذیری پلیمر در مرحله تهیه سلول خورشیدی و افزایش پایداری در مرحله جدایی از زنجیرهای اصلی پلیمری ایفا می‌کنند [۲۹۶، ۲۹۷].

۶-۸ ایجاد پیوند عرضی

با بهره‌گیری از واکنش‌های ایجاد پیوند عرضی می‌توان شکل‌شناسی را ثابت نگه داشت. گروه‌های فعال از جمله آلکیل برمید [۲۹۹]، آزید [۲۸۴، ۲۸۵]، وینیل [۴۳] و گلیسید [۳۰۰] می‌توانند در انتهای زنجیرهای جانبی قرار گیرند و به واکنش‌های بعدی در لایه فعال منجر شوند و ساختار بهینه را به وجود آورند. در پژوهش Durrant و همکاران [۱۸۸] زیر تابش نور فرابنفش حین ساخت فیلم، پایداری به دلیل اولیگومر شدن اجزای PCBM افزایش یافته است. با استفاده از فولرن‌های طراحی شده با بخش‌های شبکه‌ای شده می‌توان صورت‌بندی شکل‌شناسی توده لایه فعال یا سطح مشترک آن با الکتروود انتخابی را ثابت نگه داشت [۳۰۱]. شکل ۸ طرح کلی شبکه‌ای شدن اجزای لایه فعال سلول خورشیدی را نشان می‌دهد. در حالت کلی، ایجاد پیوند عرضی میان زنجیرهای پلیمری الکترون‌دهنده، اجزای کربنی الکترون‌پذیرنده و نیز اجزای الکترون‌دهنده و الکترون‌پذیرنده همواره موجب تغییرات شگرفی در شکل‌شناسی لایه فعال و پایداری ابزارهای الکترونیکی شده است.

۶-۹ اسیدهای کاتالیز شده جداشدنی

گسسته شدن زنجیرهای جانبی با گرما اهمیت بسیاری در دست‌یابی به پایداری شکل‌شناسی دارد. از دیدگاه بررسی انرژی، تولید سلول‌های خورشیدی در دمای زیاد مطلوب نیست [۳۰۲]. بنابراین، یافتن روشی که با کاهش دما زنجیرهای جانبی گسسته شوند، اهمیت زیادی دارد. اخیراً استفاده از زنجیرهای جانبی سیلانی روی زنجیر اصلی پلی‌تیوفن، جای استرهای نوع سوم (tertiary esters) را با اسید به عنوان کاتالیزگر در دمای معمولی عوض کرده است [۳۰۳].

۶-۱۰ پایداری شکل‌شناسی

روش‌های مختلفی برای ثابت نگه داشتن شکل‌شناسی نانومقیاس و

زنجیرهای جانبی جداشدنی (cleavable)، زنجیرهای جانبی فضاویژه-نامنظم (regiorandom, RRa) زنجیرهای جانبی با قابلیت ایجاد پیوند عرضی و زنجیرهای جانبی بلند می‌توانند راهکارهای مناسبی برای افزایش پایداری سلول‌های خورشیدی پلیمری باشند. کاهش خاصیت فضاویژگی پلیمر یکی دیگر از راه‌های افزایش پایداری گرمایی است [۲۶۵، ۲۶۶]، اما انتخاب خوبی برای افزایش پایداری نورشیمیایی نیست [۱۰۷، ۱۰۹]. به کارگیری زنجیرهای جانبی با قابلیت پیوند عرضی که می‌تواند شکل‌شناسی لایه فعال را برای تعویض زنجیرهای جانبی آلکیل ثابت نگه دارد، راه‌حلی است که از آن برای افزایش پایداری گرمایی استفاده زیادی شده است. زنجیرهای جانبی عامل‌دار شده با آلکیل برمید (Br) در این زمینه کاربردهای فراوانی دارند [۲۶۷-۲۷۰]. افزون بر سلول‌های خورشیدی بر پایه P3HT:PC61BM، این شیوه می‌تواند برای سلول‌های خورشیدی پلیمر-فولرن با نوار انرژی کم نیز استفاده شود [۲۷۱]. در کنار Br گروه‌های دیگری همچون آلکیل [۲۷۲]، آزید [۲۷۳] و اوکستان‌ها (oxetanes) [۲۷۱] نیز می‌توانند به عنوان گروه‌های واکنش‌پذیر در زنجیرهای جانبی با قابلیت ایجاد پیوند عرضی استفاده شوند. افزون بر به کار بردن زنجیرهای جانبی جداشدنی از نظر دمایی، کنترل کردن فضاویژگی پلیمر، استفاده از زنجیرهای جانبی با قابلیت ایجاد پیوند عرضی و به کار بردن سایر زنجیرهای جانبی می‌تواند با محدود کردن غیرکووالانسی صورت‌بندی [۲۷۴، ۲۷۵]، جلوگیری از نفوذ فولرن [۲۷۶، ۲۷۷] و بهینه‌سازی سطح مشترک میان لایه فعال و الکتروود [۲۷۸، ۲۷۹] پایداری گرمایی را افزایش دهد. پایداری مکانیکی نیز می‌تواند با مهندسی زنجیرهای جانبی پلیمر الکترون‌دهنده کنترل شود [۲۸۰، ۲۸۱].

۶-۷ زنجیرهای جانبی جداشدنی

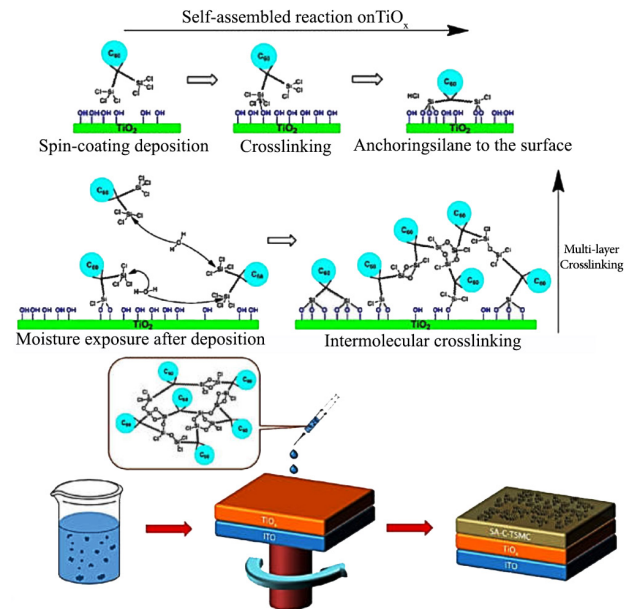
زنجیرهای جانبی اولین محلی هستند که مورد حمله انواع اکسیژن‌های واکنش‌پذیر قرار می‌گیرند که سرانجام آن به تخریب ساختارهای مزدوج منجر می‌شود [۲۸۲، ۲۸۳]. بررسی‌های متعددی درباره امکان‌سنجی برداشتن زنجیرهای جانبی متمرکز شده‌اند تا لایه فعال در امان بماند [۲۸۴-۲۸۶]. از جمله این مطالعات می‌توان به جداسازی اسیدی زنجیرهای جانبی و جداسازی گرمایی آن‌ها [۲۸۶، ۲۸۷] اشاره کرد. سخت‌نبودن لایه فعال، بهبود نفوذپذیری سلول‌های خورشیدی را نشان می‌دهد که نفوذ مولکول‌های کوچک از جمله اکسیژن و آب را آسان می‌کند. این موضوع می‌تواند به واکنش آن‌ها با پلیمر و الکتروودها منجر شود [۲۸۸-۲۹۱]. حذف گرمایی زنجیرهای جانبی به انسجام بیشتر مواد مزدوج منجر می‌شود و پایداری گرمایی زیاد و خواص فوتوولتایی را در زمان

بخش‌های اکسیدشونده با بخش‌های نوراکسایش پایدار، کنترل بلورینگی پلیمرها، تنظیم استحکام-انعطاف‌پذیری زنجیرهای پلیمری، خودگردایش (self-assembling) زنجیرهای پلیمری و افزایش درجه پلیمرشدن پلیمرها راهکارهای مؤثری برای بهبود پایداری سلول‌های خورشیدی پلیمری به‌شمار می‌آیند [۳۱۱-۳۱۴]. افزایش بلورینگی پلیمرهای الکترون‌دهنده راه دیگری برای افزایش پایداری نورشیمیایی فراهم کرده است [۱۱۰-۱۰۷].

Lipomi و همکاران [۳۱۵] ثابت کردند، بلورینگی پلیمرهای الکترون‌دهنده می‌تواند مطلوبیت مکانیکی را بدون داشتن اثر منفی بر ویژگی‌های نورالکترونیکی افزایش دهد. جایگزین کردن بخش‌های نسبتاً انعطاف‌پذیر با بخش‌های انعطاف‌ناپذیر در پلیمرهای الکترون‌دهنده می‌تواند استحکام ساختارهای مولکولی را افزایش دهد که در دمای انتقال شیشه‌ای با کاهش تحرک زنجیرهای پلیمری نتیجه‌بخش است و در نتیجه، پایداری گرمایی را افزایش می‌دهد [۳۱۶]. کوپلیمرشدن قطعه‌ای که می‌تواند خودگردایش پلیمرها را کاهش دهد، نیز به نوبه خود عملکرد مناسبی برای افزایش پایداری دمایی به‌شمار می‌آید [۳۱۷-۳۱۹]. داده‌های دویعدی و تک‌بعدی پراش پرتو X و نیز شبکه دوکانالی ایجادشده به‌وسیله کوپلیمرهای قطعه‌ای برای انتقال الکترون‌ها و حفره‌ها در شکل‌های ۹ (a) و (b) نشان داده شده‌اند. افزایش شدت پیک‌های پراش در سامانه‌های عمل‌آوری شده نشان‌دهنده افزایش چگالی الکترونی بوده که از تشکیل نواحی خالص از PCBM در اطراف نواحی فازی نانوالیاف P3HT نشأت گرفته است [۳۱۷]. افزون بر این، افزایش درجه پلیمرشدن می‌تواند هم‌زمان پایداری گرمایی، نورشیمیایی و مکانیکی را افزایش دهد [۳۲۰-۳۲۲].

۶-۱۱-۲ الکترون‌گیرنده‌های فولرنی و غیرفولرنی

ساختار شبه‌کره‌ای فولرن‌ها کارایی آن‌ها را بهبود می‌بخشد. اما، پایداری را کاهش می‌دهد. دیمرها در معرض گرما از بین می‌روند و فولرن‌ها به‌راحتی نفوذ کرده و خوشه‌های بزرگی را تشکیل می‌دهند. عوض کردن زنجیرهای جانبی فولرن فرصتی را برای بهبود پایداری گرمایی سلول‌های خورشیدی پلیمری فراهم می‌کند [۳۲۳، ۳۲۴]. افزون بر تعویض زنجیرهای جانبی فولرن، به‌کارگیری مشتقات فولرنی دوجزئی به‌عنوان گیرنده در سلول‌های خورشیدی یکی از روش‌های متداول برای افزایش پایداری است [۳۲۵-۳۲۷]. استفاده از مواد غیرفولرنی [۳۲۸-۳۳۰] به‌عنوان گیرنده در سلول‌های خورشیدی پلیمری از راهکارهای دیگر افزایش پایداری نورشیمیایی و گرمایی است [۳۳۱-۳۳۴]. افزون بر افزایش پایداری نورشیمیایی و گرمایی، عملکرد گیرنده‌های غیرفولرنی در افزایش پایداری مکانیکی نیز شایان توجه بوده است [۳۳۵].



شکل ۸- طرح‌واره ایجاد پیوند عرضی میان اجزای لایه فعال در سلول خورشیدی [۳۰۱].

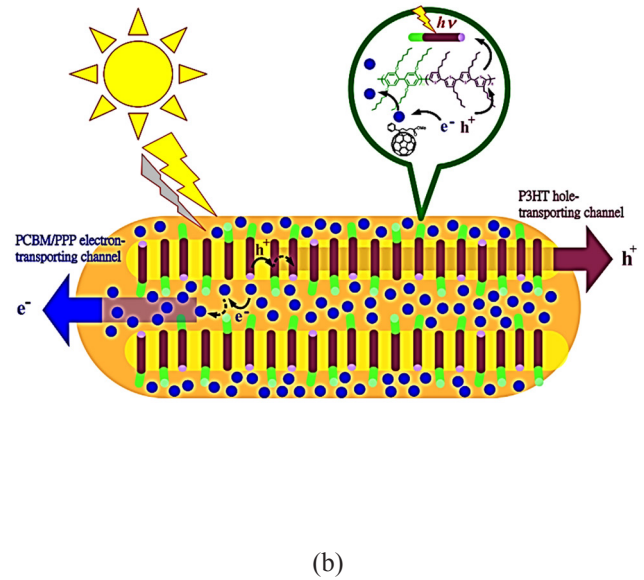
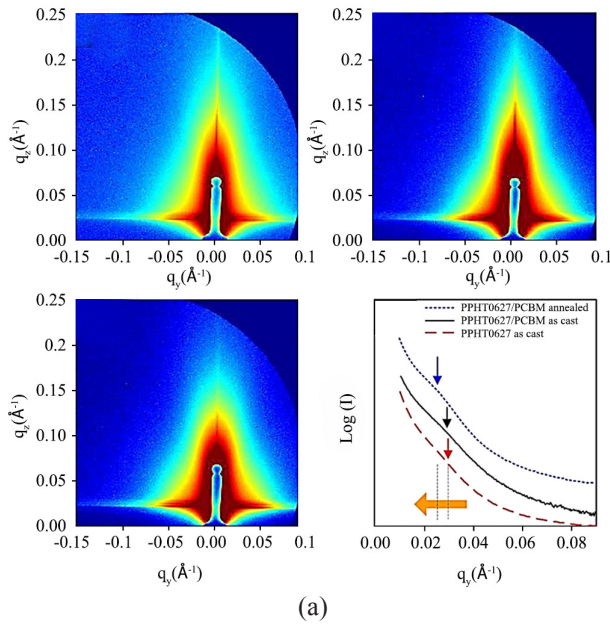
Fig. 8. Scheme of cross-linking between the constituents of active layer in a solar cell [301].

جلوگیری از ایجاد حوزه‌ها در مقیاس میکرونی تحت تنش‌های دمایی گزارش شده‌اند. به‌عنوان مثال، از پلیمرهایی با دمای انتقال شیشه‌ای زیاد با هدف جلوگیری از نفوذ فولرن در نزدیکی دماهای انتقال شیشه‌ای پلیمر استفاده شده است [۲۹۴]. در دماهای کمتر از دمای انتقال شیشه‌ای پلیمرهای مختلف، به‌دلیل نبود حرکات‌های کوئوردیناسیونی قطعه‌ای، زنجیرهای پلیمری حالت صلب داشته و در نتیجه، به‌شدت مانع از نفوذ عوامل خارجی از جمله فولرن‌ها می‌شوند. افزون بر ممانعت از نفوذ فولرن، راه‌های زیادی برای ثابت نگه‌داشتن شکل‌شناسی ارائه شده‌اند. این راه‌ها شامل استفاده از ترکیبات سه‌گانه با سازگارکننده‌ها از جمله کوپلیمرهای قطعه‌ای [۳۰۴]، مشتقات فولرن بی‌شکل [۳۰۵]، ساختارهای الکترون‌پذیرنده-دهنده با برهم‌کنش‌های ابرمولکولی بهبودیافته [۳۰۶، ۳۰۷] و زنجیرهای جانبی عامل‌دار شده روی پلیمرها یا پلیمرهای جداسازی گرمایی [۳۰۸] هستند. در کارهای پژوهشی دیگری، از ابرمولکول‌های تهیه‌شده بر پایه پلیمرهای مزدوج و نانولوله‌های کربن و مشتقات گرافنی برای افزایش پایداری سلول‌های فوتوولتایی پلیمری بهره گرفته شده است [۳۰۹، ۳۱۰].

۶-۱۱ طراحی مواد لایه فعال

۶-۱۱-۱ ساختار الکترون‌دهنده‌ها

طراحی مناسب ساختار مولکولی مواد الکترون‌دهنده نظیر تعویض



شکل ۹- (a) داده‌های دوبعدی و تک‌بعدی پراکندگی پرتو X و (b) شبکه دوکانالی ایجادشده به‌وسیله کوپلیمرهای قطعه‌ای برای انتقال الکترون‌ها و حفره‌ها [317].

Fig. 9. (a) Two dimensional and one dimensional X-ray scattering and (b) a double channel prepared by the block copolymers for transferring the electrons and holes [317].

وارون، بهینه‌سازی لایه‌های بافری، استفاده از الکترودهای پایدار، کپسول‌دار کردن، دستکاری زنجیرهای جانبی اجزای الکترون‌دهنده، بهره‌گیری از زنجیرهای جانبی جداشدنی، ایجاد پیوند عرضی، تعبیه اسیدهای کاتالیزشده جداشدنی، پایداری شکل‌شناسی و طراحی مواد لایه فعال هستند. استفاده از هر یک از روش‌های نام‌برده بسته به نوع سلول خورشیدی ساخته‌شده، پلیمر مزدوج الکترون‌دهنده، جزء کربنی الکترون‌پذیرنده، مصرف نهایی مدنظر، هزینه‌های طراحی و ساخت و عمر مفید مورد نیاز می‌تواند به نوبه خود راهگشای افزایش پایداری در سامانه‌های فوتوولتایی پلیمری باشد. امید است، گام‌های محکم‌تری از سوی پژوهشگران و جوامع بشریت در جهت استفاده از انرژی‌های پاک و پایان‌ناپذیر برداشته شود.

۷- نتیجه‌گیری

در کنار عملکرد سلول‌های خورشیدی، پایداری گرمایی، مکانیکی و رطوبتی آن‌ها موضوع بسیار مهمی به‌شمار می‌آید. از این میان، سلول‌های خورشیدی پلیمری به‌دلیل داشتن حساسیت زیاد و پیکربندی متشکل از مواد تخریب‌پذیر و اکسیدشونده توجه زیادی را در بحث پایداری و عملکرد جلب کرده‌اند. در این مقاله، عوامل اثرگذار بر عملکرد ضعیف و ناپایداری سلول‌های خورشیدی پلیمری و نیز راهکارهای گزارش‌شده برای ارتقا پایداری آن‌ها جمع‌بندی شده است. این راهکارها عبارت از افزودن جزء سوم به کامپوزیت لایه فعال، روش‌های آماده‌سازی بهینه، استفاده از هندسه

۸- مراجع

1. Helgesen M., Søndergaard R., and Krebs F.C., Advanced Materials and Processes for Polymer Solar Cell Devices, *J. Mater. Chem.*, **20**, 36-60, 2010.
2. Haehnlein S., Bayer P., and Blum P., International Legal Status of the Use of Shallow Geothermal Energy, *Renew. Sust. Energy Rev.*, **14**, 2611-2625, 2010.
3. Lund J.W., Freeston D.H., and Boyd T.L., Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review, *Geothermics*, **40**, 159-180, 2011.
4. Yüksel I., Hydropower for Sustainable Water and Energy

- Development, *Renew. Sust. Energy Rev.*, **14**, 462-469, 2010.
5. Gokcol C., Dursun B., Alboyaci B., and Sunan E., Importance of Biomass Energy as Alternative to Other Sources in Turkey, *Energy Policy*, **37**, 424-431, 2009.
 6. Keru G., Ndungu P.G., and Nyamori V.O., A Review on Carbon Nanotube/Polymer Composites for Organic Solar Cells, *Int. J. Energy Res.*, **38**, 1635-1653, 2014.
 7. Lee C.M., Chang S.P., Chang S.J., and Wu C.I., Fabrication of High-Efficiency Silicon Solar Cells by Ion Implant Process, *Int. J. Electrochem. Sci.*, **8**, 7634-7645, 2013.
 8. Ma W., Aoyama S., Okamoto H., and Hamakawa Y., A Study of Interface Properties in a-Si Solar Cells with $\mu\text{-Si (C)}$, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **41**, 453-463, 1996.
 9. Tawada Y., Okamoto H., and Hamakawa Y., a-SiC:H/a-Si:H Heterojunction Solar Cell Having More than 7.1% Conversion Efficiency, *Appl. Phys. Lett.*, **39**, 237-239, 1981.
 10. Wang K., He W., Wu L., Xu G., Ji S., and Ye C., On the Stability of CdSe Quantum Dot-Sensitized Solar Cells, *RSC Adv.*, **4**, 15702-15708, 2014.
 11. Law M., Beard M.C., Choi S., Luther J.M., Hanna M.C., and Nozik A.J., Determining the Internal Quantum Efficiency of PbSe Nanocrystal Solar Cells with the Aid of an Optical Model, *Nano Lett.*, **8**, 3904-3910, 2008.
 12. Liu C., Li Y., Wei L., Wu C., Chen Y., Mei L., and Jiao J., CdS Quantum Dot-Sensitized Solar Cells Based on Nano-Branched TiO_2 Arrays, *Nanoscale Res. Lett.*, **9**, 2014.
 13. Selinsky R.S., Ding Q., Faber M.S., Wright J.C., and Jin S., Quantum Dot Nanoscale Heterostructures for Solar Energy Conversion, *Chem. Soc. Rev.*, **42**, 2963-2985, 2013.
 14. Nazeeruddin M.K., Baranoff E., and Grätzel M., Dye-Sensitized Solar Cells: A Brief Overview, *Sol. Energy*, **85**, 1172-1178, 2011.
 15. Hagfeldt A., Brief Overview of Dye-Sensitized Solar Cells, *Ambio*, **41**, 151-155, 2012.
 16. Roy-Mayhew J.D. and Aksay I.A., Graphene Materials and Their Use in Dye-Sensitized Solar Cells, *Chem. Rev.*, **114**, 6323-6348, 2014.
 17. Lloyd M.T., Anthony J.E., and Malliaras G.G., Photovoltaics from Soluble Small Molecules, *Mater. Today*, **10**, 34-41, 2007.
 18. Cho N., Song K., Lee J.K., and Ko J., Facile Synthesis of Fluorine-Substituted Benzothiadiazole-based Organic Semiconductors and Their Use in Solution-Processed Small-Molecule Organic Solar Cells, *Chem. Eur. J.*, **18**, 11433-11439, 2012.
 19. Huang Q. and Li H., Recent Progress of Bulk Heterojunction Solar Cells Based on Small-Molecular Donors, *Chin. Sci. Bull.*, **58**, 2677-2685, 2013.
 20. Agbolaghi S., Abbasi F., and Gheybi H., High Efficient and Stabilized Photovoltaics via Morphology Manipulating in Active Layer by Rod-Coil Block Copolymers Comprising Different Hydrophilic to Hydrophobic Dielectric Blocks, *Eur. Polym. J.*, **84**, 465-480, 2016.
 21. Agbolaghi S., Nazari M., Zenoozi S., and Abbasi F., The Highest Power Conversion Efficiencies in Poly(3-hexylthiophene)/Fullerene Photovoltaic Cells Modified by Rod-Coil Block Copolymers under Different Annealing Conditions, *J. Mater. Sci., Mater. Electron.*, **28**, 10611-10624, 2017.
 22. Agbolaghi S., Abbasi F., Zenoozi S., and Nazari M., Annealing-Free Multi-Thermal Techniques Comprising Aging, Cycling and Seeding to Enhance Performance of Thick P3HT:PCBM Photovoltaic Cells via Developing Hairy Crystals, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **63**, 285-294, 2017.
 23. Dang D., Zhou P., Duan L., Bao X., Yang R., and Zhu W., An Efficient Method to Achieve a Balanced Open Circuit Voltage and Short Circuit Current Density in Polymer Solar Cells, *J. Mater. Chem. A*, **4**, 8291-8297, 2016.
 24. Li Y., Molecular Design of Photovoltaic Materials for Polymer Solar Cells: Toward Suitable Electronic Energy Levels and Broad Absorption, *Acc. Chem. Res.*, **45**, 723-733, 2012.
 25. Huo L., Liu T., Sun X., Cai Y., Heeger A.J., and Sun Y., Single-Junction Organic Solar Cells Based on a Novel Wide-Bandgap Polymer with Efficiency of 9.7%, *Adv. Mater.*, **27**, 2938-2944, 2015.
 26. Espinosa N., Garcia-Valverde R., Urbina A., and Krebs F.C., A Life Cycle Analysis of Polymer Solar Cell Modules Prepared Using Roll-to-Roll Methods under Ambient Conditions, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **95**, 1293-1302, 2011.
 27. Huang D.M., Mauger S.A., Friedrich S., George S.J., Dumitriu-LaGrange D., Yoon S., and Moulé A.J., The Consequences of Interface Mixing on Organic Photovoltaic Device Characteristics, *Adv. Funct. Mater.*, **21**, 1657-1665, 2011.
 28. Agbolaghi S., Pure and Complex Nanostructures Using Poly[bi(triisopropylsilyl)ethynyl] Benzodithiophene-bis(Decyltetradecyl-thien) Naphthobisthiadiazole], Carbon Nanotubes and Reduced Graphene Oxide for High-Performance Polymer Solar Cells, *Polym. Int.*, **68**, 1688-1697, 2019.

29. Haugeneder A., Neges M., Kallinger C., Spirkel W., Lemmer U., Feldmann J., Scherf U., Harth E., Gügel A., and Müllen K., Exciton Diffusion and Dissociation in Conjugated Polymer/Fullerene Blends and Heterostructures, *Phys. Rev. B*, **59**, 15346, 1999.
30. Arsalani N. and Entezami A.A., The Applications of Electrically Conducting Polymers, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **4**, 94-102, 1991.
31. Daraei N.Z. and Shabani I., Conductive Nanofibrous Scaffolds for Tissue Engineering Applications: A Review, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **32**, 189-210, 2019.
32. Hoppe H., Glatzel T., Niggemann M., Hinsch A., Lux-Steiner M.C., and Sariciftci N.S., Kelvin Probe Force Microscopy Study on Conjugated Polymer/Fullerene Bulk Heterojunction Organic Solar Cells, *Nano Lett.*, **5**, 269-274, 2005.
33. Hoppe H., Glatzel T., Niggemann M., Schwinger W., Schaeffler F., Hinsch A., Lux-Steiner M.C., and Sariciftci N.S., Efficiency Limiting Morphological Factors of MDMO-PPV:PCBM Plastic Solar Cells, *Thin Solid Films*, **511**, 587-592, 2006.
34. Hoppe H. and Sariciftci N.S., Morphology of Polymer/Fullerene Bulk Heterojunction Solar Cells, *J. Mater. Chem.*, **16**, 45-61, 2006.
35. Pivrikas A., Neugebauer H., and Sariciftci N.S., Influence of Processing Additives to Nano-Morphology and Efficiency of Bulk-Heterojunction Solar Cells: A Comparative Review, *Sol. Energy*, **85**, 1226-1237, 2011.
36. Keivanidis P.E., Clarke T.M., Lilliu S., Agostinelli T., Macdonald J.E., Durrant J.R., Bradley D.D., and Nelson J., Dependence of Charge Separation Efficiency on Film Microstructure in Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl):[6,6]-Phenyl-C61 Butyric Acid Methyl Ester Blend Films, *J. Phys. Chem. Lett.*, **1**, 734-738, 2010.
37. Veldman D., Ipek O., Meskers S.C., Sweelssen J., Koetse M.M., Veenstra S.C., Kroon J.M., van Bavel S.S., Loos J., and Janssen R.A., Compositional and Electric Field Dependence of the Dissociation of Charge Transfer Excitons in Alternating Polyfluorene Copolymer/Fullerene Blends, *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 7721-7735, 2008.
38. Yin W. and Dadmun M., A New Model for the Morphology of P3HT/PCBM Organic Photovoltaics from Small-Angle Neutron Scattering: Rivers and Streams, *ACS Nano*, **5**, 4756-4768, 2011.
39. Kim J.H., Kim M., Jinnai H., Shin T.J., Kim H., Park J.H., Jo S.B., and Cho K., Organic Solar Cells Based on Three-Dimensionally Percolated Polythiophene Nanowires with Enhanced Charge Transport, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 5640-5650, 2014.
40. Domanski A.L., Lieberwirth I., Sengupta E., Landfester K., Butt H.J., Berger R., Rauh J., Dyakonov V., and Deibel C., Effect of Morphological Changes on Presence of Trap States in P3HT:PCBM Solar Cells Studied by Cross-Sectional Energy Filtered TEM and Thermally Stimulated Current Measurements, *J. Phys. Chem. C*, **117**, 23495-23499, 2013.
41. Mei B., Qin Y., and Agbolaghi S., Carbon/Graphene Quantum Dot and Conjugated Polymer Nanostructures Impart Unprecedented High Efficiencies in Routine P3HT:PCBM Photovoltaics, *Solar Energy*, **215**, 77-91, 2021.
42. Agbolaghi S., Aghapour S., Charoughchi S., Abbasi F., and Sarvari R., High-Performance Photovoltaics by Double-Charge Transporters Using Graphenic Nanosheets and Triisopropylsilylethynyl/Naphthothiadiazole Moieties, *J. Ind. Eng. Chem.*, **68**, 293-300, 2018.
43. Kozub D.R., Vakhshouri K., Orme L.M., Wang C., Hexemer A., and Gomez E.D., Polymer Crystallization of Partially Miscible Polythiophene/Fullerene Mixtures Controls Morphology, *Macromolecules*, **44**, 5722-5726, 2011.
44. Miyanishi S., Tajima K., and Hashimoto K., Morphological Stabilization of Polymer Photovoltaic Cells by Using Cross-Linkable Poly(3-(5-hexenyl) thiophene), *Macromolecules*, **42**, 1610-1618, 2009.
45. Ouhib F., Tomassetti M., Manca J., Piersimoni F., Spoltore D., Bertho S., Moons H., Lazzaroni R., Desbief, S. Jerome C., and Detrembleur C., Thermally Stable Bulk Heterojunction Solar Cells Based on Cross-Linkable Acrylate-Functionalized Polythiophene Diblock Copolymers, *Macromolecules*, **46**, 785-795, 2013.
46. Lee J.U., Jung J.W., Emrick T., Russell T.P., and Jo W.H., Morphology Control of a Polythiophene–Fullerene Bulk Heterojunction for Enhancement of the High-Temperature Stability of Solar Cell Performance by a New Donor–Acceptor Diblock Copolymer, *Nanotechnology*, **21**, 105201, 2010.
47. Sun Z., Xiao K., Keum J.K., Yu X., Hong K., Browning J., Ivanov I.N., Chen J., Alonzo J., Li D., and Sumpter B.G., PS-*b*-P3HT Copolymers as P3HT/PCBM Interfacial Compatibilizers for High Efficiency Photovoltaics, *Adv. Mater.*, **23**, 5529-5535, 2011.

48. Chen J., Yu X., Hong K., Messman J.M., Pickel D.L., Xiao K., Dadmun M.D., Mays J.W., Rondinone A.J., Sumpter B.G., and Kilbey II S.M., Ternary Behavior and Systematic Nanoscale Manipulation of Domain Structures in P3HT/PCBM/P3HT-*b*-PEO Films, *J. Mater. Chem.*, **22**, 13013-13022, 2012.
49. Xiao Y., Zhou S., Su Y., Wang H., Ye L., Tsang S.W., Xie F., and Xu J., Enhanced Efficiency of Organic Solar Cells by Mixed Orthogonal Solvents, *Org. Electron.*, **15**, 2007-2013, 2014.
50. Hernandez J.L., Reichmanis E., and Reynolds J.R., Probing Film Solidification Dynamics in Polymer Photovoltaics, *Org. Electron.*, **25**, 57-65, 2015.
51. Dang M.T., Hirsch L., Wantz G., and Wuest J.D., Controlling the Morphology and Performance of Bulk Heterojunctions in Solar Cells. Lessons Learned from the Benchmark Poly(3-hexylthiophene):[6,6]-Phenyl-C61-Butyric Acid Methyl Ester System, *Chem. Rev.*, **113**, 3734-3765, 2013.
52. Salim T., Wong L.H., Bräuer B., Kukreja R., Foo Y.L., Bao Z., and Lam Y.M., Solvent Additives and Their Effects on Blend Morphologies of Bulk Heterojunctions, *J. Mater. Chem.*, **21**, 242-250, 2011.
53. Moon J.S., Takacs C.J., Cho S., Coffin R.C., Kim H., Bazan G.C., and Heeger A.J., Effect of Processing Additive on the Nanomorphology of a Bulk Heterojunction Material, *Nano Lett.*, **10**, 4005-4008, 2010.
54. Zhang Y., Li Z., Wakim S., Alem S., Tsang S.W., Lu J., Ding J., and Tao Y., Bulk Heterojunction Solar Cells Based on a New Low-Band-Gap Polymer: Morphology and Performance, *Org. Electron.*, **12**, 1211-1215, 2011.
55. Pitliya P., Sun Y., Garza J.C., Liu C., Gong X., Karim A., and Raghavan D., Synthesis and Characterization of Novel Fulleropyrrolidine in P3HT Blended Bulk Heterojunction Solar Cells, *Polymer*, **55**, 1769-1781, 2014.
56. Sakthivel P., Kranthiraja K., Saravanan C., Gunasekar K., Kim H.I., Shin W.S., Jeong J.E., Woo H.Y., and Jin S.H., Carbazole Linked Phenylquinoline-based Fullerene Derivatives as Acceptors for Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells: Effect of Interfacial Contacts on Device Performance, *J. Mater. Chem. A*, **2**, 6916-6921, 2014.
57. Diacon A., Derue L., Lecourtier C., Dautel O., Wantz G., and Hudhomme P., Cross-Linkable Azido C60-Fullerene Derivatives for Efficient Thermal Stabilization of Polymer Bulk-Heterojunction Solar Cells, *J. Mater. Chem. C*, **2**, 7163-7167, 2014.
58. Aloui W., Adhikari T., Nunzi J.M., and Bouazizi A., Effect of Thermal Annealing on the Structural, Optical and Dielectrical Properties of P3HT:PC70BM Nanocomposites, *Mater. Res. Bull.*, **78**, 141-147, 2016.
59. Aziz F., Ismail A.F., Aziz M., and Soga T., Effect of Solvent Annealing on the Crystallinity of Spray Coated Ternary Blend Films Prepared Using Low Boiling Point Solvents, *Chem. Eng. Process.*, **79**, 48-55, 2014.
60. Fu C.M., Jeng K.S., Li Y.H., Hsu Y.C., Chi M.H., Jian W.B., and Chen J.T., Effects of Thermal Annealing and Solvent Annealing on the Morphologies and Properties of Poly(3-hexylthiophene) Nanowires, *Macromol. Chem. Phys.*, **216**, 59-68, 2015.
61. Gupta S.K., Jindal R., and Garg A., Microscopic Investigations into the Effect of Surface Treatment of Cathode and Electron Transport Layer on the Performance of Inverted Organic Solar Cells, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 16418-16427, 2015.
62. Padinger F., Rittberger R.S., and Saricicfci N.S., New Architecture for High Efficiency Polymer Photovoltaic Cells Using Solution-based Titanium Oxide as an Optical Spacer, *Adv. Funct. Mater.*, **13**, 85-88, 2003.
63. Ko C.J., Lin Y.K., and Chen F.C., Microwave Annealing of Polymer Photovoltaic Devices, *Adv. Mater.*, **19**, 3520-3523, 2007.
64. Tzabari L., Wang J., Lee Y.J., Hsu J.W., and Tessler N., Role of Charge Transfer States in P3ht-Fullerene Solar Cells, *J. Phys. Chem. C*, **118**, 27681-27689, 2014.
65. Guilbert A.A., Schmidt M., Bruno A., Yao J., King S., Tuladhar S.M., Kirchartz T., Alonso M.I., Goni A.R., Stingelin N., and Haque S.A., Spectroscopic Evaluation of Mixing and Crystallinity of Fullerenes in Bulk Heterojunctions, *Adv. Funct. Mater.*, **24**, 6972-6980, 2014.
66. Movla H., Rafi A.M., and Rafi N.M., A Model for Studying the Performance of P3HT:PCBM Organic Bulk Heterojunction Solar Cells, *Optik*, **126**, 1429-1432, 2015.
67. Vakhshouri K., Kesava S.V., Kozub D.R., and Gomez E.D., Characterization of the Mesoscopic Structure in the Photoactive Layer of Organic Solar Cells: A Focused Review, *Mater. Lett.*, **90**, 97-102, 2013.
68. Holmes N.P., Nicolaidis N., Feron K., Barr M., Burke K.B., Al-Mudhaffer M., Sista P., Kilcoyne A.D., Stefan M.C., Zhou X., and Dastoor P.C., Probing the Origin of Photocurrent in Nanoparticulate Organic Photovoltaics, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **140**, 412-421, 2015.

69. Nasiri M. and Abbasi F., Relationships between Processing Conditions, Morphology, and I-V Characteristics in P3HT:PCBM Solar Cells, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **26**, 2639-2646, 2015.
70. Nasiri M. and Abbasi F., Effect of 1,8-Diiodooctane on the Performance of P3HT:PCBM Solar Cells, *J. Sol. Energy Eng.*, **137**, 1-5, 2015.
71. Hwang I.W., Cho S., Kim J.Y., Lee K., Coates N.E., Moses D., and Heeger A.J., Carrier Generation and Transport in Bulk Heterojunction Films Processed with 1,8-Octanedithiol as a Processing Additive, *J. Appl. Phys.*, **104**, 033706, 2008.
72. Yang C., Lee J.K., Heeger A.J., and Wudl F., Well-Defined Donor-Acceptor Rod-Coil Diblock Copolymers Based on P3HT Containing C60: The Morphology and Role as a Surfactant in Bulk-Heterojunction Solar Cells, *J. Mater. Chem.*, **19**, 5416-5423, 2009.
73. Chang S.Y., Liao H.C., Shao Y.T., Sung Y.M., Hsu S.H., Ho C.C., Su W.F., and Chen Y.F., Enhancing the Efficiency of Low Bandgap Conducting Polymer Bulk Heterojunction Solar Cells Using P3HT as a Morphology Control Agent, *J. Mater. Chem. A*, **1**, 2447-2452, 2013.
74. De Bettignies R., Bailly S., Guillerez S., Jusselme B., and Berson S., Elaboration of P3HT/CNT/PCBM Composites for Organic Photovoltaic Cells, *Adv. Funct. Mater.*, **17**, 3363-3370, 2007.
75. Plass R., Pelet S., Krueger J., Grätzel M., and Bach U., Quantum Dot Sensitization of Organic-Inorganic Hybrid Solar Cells, *J. Phys. Chem. B*, **106**, 7578-7580, 2002.
76. Beek W.J., Wienk M.M., and Janssen R.A., Hybrid Solar Cells from Regioregular Polythiophene and ZnO Nanoparticles, *Adv. Funct. Mater.*, **16**, 1112-1116, 2006.
77. Liu X.I., Han S.O., Zhang D.A., Requicha A., Thompson M.E., and Zhou C.H., Synthesis and Electronic Properties of Individual Single-walled Carbon Nanotube/Polypyrrole Composite Nanocables, *Adv. Mater.*, **17**, 2727-2732, 2005.
78. Tchmutin I.A., Ponomarenko A.T., Krinichnaya E.P., Kozub G.I., and Efimov O.N., Electrical Properties of Composites Based on Conjugated Polymers and Conductive Fillers, *Carbon*, **41**, 1391-1395, 2003.
79. Goh R.G., Motta N., Bell J.M., and Waclawik E.R., Effects of Substrate Curvature on the Adsorption of Poly(3-hexylthiophene) on Single-walled Carbon Nanotubes, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 053101, 2006.
80. Chen J., Liu H., Weimer W.A., Halls M.D., Waldeck D.H., and Walker G.C., Noncovalent Engineering of Carbon Nanotube Surfaces by Rigid, Functional Conjugated Polymers, *J. Am. Chem. Soc.*, **124**, 9034-9035, 2002.
81. Reese M.O., Gevorgyan S.A., Jørgensen M., Bundgaard E., Kurtz S.R., Ginley D.S., Olson D.C., Lloyd M.T., Morvillo P., Katz E.A., and Elschner A., Consensus Stability Testing Protocols for Organic Photovoltaic Materials and Devices, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **95**, 1253-1267, 2011.
82. Peters C.H., Sachs-Quintana I.T., Mateker W.R., Heumueller T., Rivnay J., Noriega R., Beiley Z.M., Hoke E.T., Salleo A., and McGehee M.D., The Mechanism of Burn-in Loss in a High Efficiency Polymer Solar Cell, *Adv. Mater.*, **24**, 663-668, 2012.
83. Azzopardi B., Emmott C.J., Urbina A., Krebs F.C., Mutale J., and Nelson J., Economic Assessment of Solar Electricity Production from Organic-based Photovoltaic Modules in a Domestic Environment, *Energy Environ. Sci.*, **4**, 3741-3753, 2011.
84. Zuo L., Zhang S., Li H., and Chen H., Toward Highly Efficient Large-Area ITO-Free Organic Solar Cells with a Conductance-Gradient Transparent Electrode, *Adv. Mater.*, **27**, 6983-6989, 2015.
85. Berny S., Blouin N., Distler A., Egelhaaf H.J., Krompiec M., Lohr A., Lozman O.R., Morse G.E., Nanson L., Pron A., and Sauermann T., Solar Trees: First Large-Scale Demonstration of Fully Solution Coated, Semitransparent, Flexible Organic Photovoltaic Modules, *Adv. Sci.*, **3**, 1500342, 2016.
86. Roesch R., Faber T., Von Hauff E., Brown T.M., Lira-Cantu M., and Hoppe H., Procedures and Practices for Evaluating Thin-Film Solar Cell Stability, *Adv. Energy Mater.*, **5**, 1501407, 2015.
87. Turkovic V., Engmann S., Egbe D.A., Himmerlich M., Krischok S., Gobsch G., and Hoppe H., Multiple Stress Degradation Analysis of the Active Layer in Organic Photovoltaics, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **120**, 654-668, 2014.
88. Cao H., He W., Mao Y., Lin X., Ishikawa K., Dickerson J.H., and Hess W.P., Recent Progress in Degradation and Stabilization of Organic Solar Cells, *J. Power Sources*, **264**, 168-183, 2014.
89. Gevorgyan S.A., Madsen M.V., Roth B., Corazza M., Hösel M., Søndergaard R.R., Jørgensen M., and Krebs F.C., Lifetime of Organic Photovoltaics: Status and Predictions, *Adv. Energy Mater.*, **6**, 1501208, 2016.
90. Leijtens T., Bush K., Cheacharoen R., Beal R., Bowring

- A., and McGehee M.D., Towards Enabling Stable Lead Halide Perovskite Solar Cells; Interplay between Structural, Environmental, and Thermal Stability, *J. Mater. Chem. A*, **5**, 11483-11500, 2017.
91. Hamdast A., Agbolaghi S., Zeighami M., Beygi-Khosrowshahi Y., and Sarvari R., Butterfly Nanostructures via Regioregularly Grafted Multi-walled Carbon Nanotubes and Poly(3-hexylthiophene) to Improve Photovoltaic Characteristics, *Polym. Int.*, **68**, 335-343, 2019.
92. Zeighami M., Agbolaghi S., Hamdast A., and Sarvari R., Graphenic Nanosheets Sandwiched between Crystalline Cakes of Poly(3-hexylthiophene) via Simultaneous Grafting/Crystallization and Their Applications in Active Photovoltaic Layers, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **30**, 7018-7030, 2019.
93. Agbolaghi S., Super-Connected Graphenic Nanosheets via Well-Oriented Bridges of Naphthothiadiazole and Benzodithiophene-Containing Donor-Acceptors and Photovoltaic Applications Thereof, *New J. Chem.*, **42**, 20041-20048, 2018.
94. Agbolaghi S., A Step towards High-Performance Photovoltaics via Three-Component P3HT/PANI-graft-rGO Nanocomposites, *Fuller. Nanotub. Car. N.*, **27**, 650-660, 2019.
95. Alizadeh A.A. and Agbolaghi S., Core-Double Shell Nano-hybrids Designed by Multi-walled Carbon Nanotubes, Polyaniline and Polythiophenes in PBDT-DTNT:PC61BM Solar Cells, *J. Electron. Mater.*, **49**, 435-443, 2020.
96. Agbolaghi S., Core-Mantle-Shell Novel Nanostructures for Efficacy Escalating in Poly(3-hexylthiophene):Phenyl-C71-Butyric Acid Methyl Ester Photovoltaics, *Carbon Lett.*, **30**, 45-54, 2020.
97. Agbolaghi S., Charoughchi S., Aghapour S., Abbasi F., Bahadori A., and Sarvari R., Bulk Heterojunction Photovoltaics with Improved Efficiencies Using Stem-Leaf, Shish-Kebab and Double-Fibrillar Nano-Hybrids Based on Modified Carbon Nanotubes and Poly(3-hexylthiophene), *Sol. Energy*, **170**, 138-150, 2018.
98. Agbolaghi S., Core-Shell Super-Structures via Smart Deposition of Naphthothiadiazole and Benzodithiophene-Possessing Polymer Backbones onto Carbon Nanotubes and Photovoltaic Applications Thereof, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **30**, 832-841, 2019.
99. Agbolaghi S., Settled/Unsettled Blend Nanofibers Electrospun from Photoactive Polymeric/Nonpolymeric Constituents in PBDT-DTNT:PCBM Solar Cells, *J. Appl. Polym. Sci.*, **136**, 47591, 2019.
100. Agbolaghi S., Well-Functioned Photovoltaics Based on Nanofibers Composed of PBDT-TIPS-DTNT-DT and Graphenic Precursors Thermally Modified by Polythiophene, Polyaniline and Polypyrrole, *Polym. Int.*, **68**, 1516-1523, 2019.
101. Mohammadi-Arbati E. and Agbolaghi S., Efficiency Above 6% in Poly(3-hexylthiophene):Phenyl-C-Butyric Acid Methyl Ester Photovoltaics via Simultaneous Addition of Poly(3-hexylthiophene) Based Grafted Graphene Nanosheets and Hydrophobic Block Copolymers, *Polym. Int.*, **68**, 1292-1302, 2019.
102. Charoughchi S., Agbolaghi S., Aghapour S., Sarvari R., and Abbasi F., Polymer Wrapping versus Well-Oriented Crystal Growth of Polythiophenes onto Multi-Qall Carbon Nanotubes via Surface Chemical Modification and Regioregularity Deliberation, *New J. Chem.*, **42**, 14469-14480, 2018.
103. Agbolaghi S., Ebrahimi S., Massoumi B., Abbaspour S., Sarvari R., and Abbasi F., Enhanced Properties of Photovoltaic Devices Tailored with Novel Supramolecular Structures Based on Reduced Graphene Oxide Nanosheets Grafted/Functionalized with Thiophenic Materials, *Polym. Sci. B: Polym. Phys.*, **55**, 1877-1889, 2017.
104. Agbolaghi S., Abbaspour S., Massoumi B., Sarvari R., Sattari S., Aghapour S., and Charoughchi S., Conversion of Face-On Orientation to Edge-On/Flat-On in Induced-Crystallization of Poly(3-hexylthiophene) via Functionalization/Grafting of Reduced Graphene Oxide with Thiophene Adducts, *Macromol. Chem. Phys.*, **219**, 1700484, 2018.
105. Aghapour S., Agbolaghi S., Charoughchi S., Sarvari R., and Abbasi F., Novel Conjugated Patterns of PBDT-DTNT and PBDT-TIPS-DTNT-DT Complicated Polymers onto Graphenic Nanosheets, *Polym. Int.*, **68**, 64-70, 2019.
106. Pan J., Jia Z., Chang Y., Hu Y., Zhang G., and Agbolaghi S., Manipulation of PBDT-DTNT: PCBM Photoactive Layers for a Stability Increment by Core-Shell and Core-Mantle-Shell Supramolecules, *New J. Chem.*, **44**, 4206-4216, 2020.
107. Heumueller T., Mateker W.R., Sachs-Quintana I.T., Vandewal K., Bartelt J.A., Burke T.M., Ameri T., Brabec C.J., and McGehee M.D., Reducing Burn-in Voltage Loss in Polymer Solar Cells by Increasing the Polymer Crystallinity, *Energy Environ. Sci.*, **7**, 2974-2980, 2014.
108. Soon Y.W., Shoaee S., Ashraf R.S., Bronstein H., Schroeder B.C., Zhang W., Fei Z., Heeney M., McCulloch I., and

- Durrant J.R., Material Crystallinity as a Determinant of Triplet Dynamics and Oxygen Quenching in Donor Polymers for Organic Photovoltaic Devices, *Adv. Funct. Mater.*, **24**, 1474-1482, 2014.
109. Mateker W.R., Heumueller T., Cheacharoen R., Sachs-Quintana I.T., McGehee M.D., Warnan J., Beaujuge P.M., Liu X., and Bazan G.C., Molecular Packing and Arrangement Govern the Photo-Oxidative Stability of Organic Photovoltaic Materials, *Chem. Mater.*, **27**, 6345-6353, 2015.
110. Soon Y.W., Cho H., Low J., Bronstein H., McCulloch I., and Durrant J.R., Correlating Triplet Yield, Singlet Oxygen Generation and Photochemical Stability in Polymer/Fullerene Blend Films, *Chem. Commun.*, **49**, 1291-1293, 2013.
111. Liu X., Ding P., Yuan Z., Tian H., Jiao Y., and Agbolaghi S., Elevated Air Stability in PBDT-DTNT: PCBM Solar Cells by Focusing on Roles of Fibrillar/Patterned Nanostructures via Graphene/Polymer Constituents, *Sol. Energy*, **198**, 101-112, 2020.
112. Kawano K., Pacios R., Poplavskyy D., Nelson J., Bradley D.D., and Durrant J.R., Degradation of Organic Solar Cells due to Air Exposure, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **90**, 3520-3530, 2006.
113. Norrman K., Gevorgyan S.A., and Krebs F.C., Water-Induced Degradation of Polymer Solar Cells Studied by H₂¹⁸O Labeling, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **1**, 102-112, 2009.
114. Pradhan B., Batabyal S.K., and Pal A.J., Functionalized Carbon Nanotubes in Donor/Acceptor-Type Photovoltaic Devices, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 093106, 2006.
115. Wu M.C., Lin Y.Y., Chen S., Liao H.C., Wu Y.J., Chen C.W., Chen Y.F., and Su W.F., Enhancing Light Absorption and Carrier Transport of P3HT by Doping Multi-wall Carbon Nanotubes, *Chem. Phys. Lett.*, **468**, 64-68, 2009.
116. Ratier B., Nunzi J.M., Aldissi M., Kraft T.M., and Buncel E., Organic Solar Cell Materials and Active Layer Designs-Improvements with Carbon Nanotubes: A Review, *Polym. Int.*, **61**, 342-354, 2012.
117. Guerrero A., Boix P.P., Marchesi L.F., Ripolles-Sanchis T., Pereira E.C., and Garcia-Belmonte G., Oxygen Doping-Induced Photogeneration Loss in P3HT:PCBM Solar Cells, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **100**, 185-191, 2012.
118. Seemann A., Sauermann T., Lungenschmied C., Armbruster O., Bauer S., Egelhaaf H.J., and Hauch J., Reversible and Irreversible Degradation of Organic Solar Cell Performance by Oxygen, *Sol. Energy*, **85**, 1238-1249, 2011.
119. Manceau M., Rivaton A., Gardette J.L., Guillerez S., and Lemaître N., The Mechanism of Photo- and Thermooxidation of Poly(3-hexylthiophene) (P3HT) Reconsidered, *Polym. Degrad. Stab.*, **94**, 898-907, 2009.
120. Ebadian S., Gholamkhash B., Shambayati S., Holdcroft S., and Servati P., Effects of Annealing and Degradation on Regioregular Polythiophene-based Bulk Heterojunction Organic Photovoltaic Devices, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **94**, 2258-2264, 2010.
121. Guerrero A., Pfannmöller M., Kovalenko A., Ripolles T.S., Heidari H., Bals S., Kaufmann L.D., Bisquert J., and Garcia-Belmonte G., Nanoscale Mapping by Electron Energy-Loss Spectroscopy Reveals Evolution of Organic Solar Cell Contact Selectivity, *Org. Electron.*, **16**, 227-233, 2015.
122. Conings B., Bertho S., Vandewal K., Senes A., D'Haen J., Manca J., and Janssen R.A., Modeling the Temperature Induced Degradation Kinetics of the Short Circuit Current in Organic Bulk Heterojunction Solar Cells, *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 81, 2010.
123. Kim H.J., Lee H.H., and Kim J.J., Real Time Investigation of the Interface between a P3HT:PCBM Layer and an Al Electrode during Thermal Annealing, *Macromol. Rapid Commun.*, **30**, 1269-1273, 2009.
124. Williams G., Wang Q., and Aziz H., The Photo-Stability of Polymer Solar Cells: Contact Photo-Degradation and the Benefits of Interfacial Layers, *Adv. Funct. Mater.*, **23**, 2239-2247, 2013.
125. Wang D.H., Pron A., Leclerc M., and Heeger A.J., Additive-Free Bulk-Heterojunction Solar Cells with Enhanced Power Conversion Efficiency, Comprising a Newly Designed Selenophene-Thienopyrrolodione Copolymer, *Adv. Funct. Mater.*, **23**, 1297-1304, 2013.
126. Zawacka N.K., Andersen T.R., Andreasen J.W., Rossander L.H., Dam H.F., Jørgensen M., and Krebs F.C., The Influence of Additives on the Morphology and Stability of Roll-to-Roll Processed Polymer Solar Cells Studied through Ex Situ and In Situ X-Ray Scattering, *J. Mater. Chem. A*, **2**, 18644-18654, 2014.
127. Tournebize A., Rivaton A., Peisert H., and Chassé T., The Crucial Role of Confined Residual Additives on the Photostability of P3HT:PCBM Active Layers, *J. Phys. Chem. C*, **119**, 9142-9148, 2015.
128. Kim W., Kim J.K., Kim E., Ahn T.K., Wang D.H., and Park J.H.,

- Conflicted Effects of a Solvent Additive on PTB7:PC71BM Bulk Heterojunction Solar Cells, *J. Phys. Chem. C*, **119**, 5954-5961, 2015.
129. Sharma A., Andersson G., and Lewis D.A., Role of Humidity on Indium and Tin Migration in Organic Photovoltaic Devices, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **13**, 4381-4387, 2011.
130. Lee S.T., Gao Z.Q., and Hung L.S., Metal Diffusion from Electrodes in Organic Light-Emitting Diodes, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 1404-1406, 1999.
131. Voroshazi E., Uytterhoeven G., Cnops K., Conard T., Favia P., Bender H., Muller R., and Cheynds D., Root-Cause Failure Analysis of Photocurrent Loss in Polythiophene: Fullerene-based Inverted Solar Cells, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 618-623, 2015.
132. Rösch R., Tanenbaum D.M., Jørgensen M., Seeland M., Bärenklau M., Hermenau M., Voroshazi E., Lloyd M.T., Galagan Y., Zimmermann B., and Würfel U., Investigation of the Degradation Mechanisms of a Variety of Organic Photovoltaic Devices by Combination of Imaging Techniques-The ISOS-3 Inter-Laboratory Collaboration, *Energy Environ. Sci.*, **5**, 6521-6540, 2012.
133. Franke R., Maennig B., Petrich A., and Pfeiffer M., Long-Term Stability of Tandem Solar Cells Containing Small Organic Molecules, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **92**, 732-735, 2008.
134. Cheng P. and Zhan X., Stability of Organic Solar Cells: Challenges and Strategies, *Chem. Soc. Rev.*, **45**, 2544-2582, 2016.
135. Norrman K. and Krebs F.C., Lifetimes of Organic Photovoltaics: Using TOF-SIMS and $^{18}\text{O}_2$ Isotopic Labelling to Characterise Chemical Degradation Mechanisms, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **90**, 213-227, 2006.
136. Reese M.O., Nardes A.M., Rupert B.L., Larsen R.E., Olson D.C., Lloyd M.T., Shaheen S.E., Ginley D.S., Rumbles G., and Kopidakis N., Photoinduced Degradation of Polymer and Polymer-Fullerene Active Layers: Experiment and Theory, *Adv. Funct. Mater.*, **20**, 3476-3483, 2010.
137. Schafferhans J., Baumann A., Wagenpfahl A., Deibel C., and Dyakonov V., Oxygen Doping of P3HT:PCBM Blends: Influence on Trap States, Charge Carrier Mobility and Solar Cell Performance, *Org. Electron.*, **11**, 1693-1700, 2010.
138. Züfle S., Neukom M.T., Altazin S., Zinggeler M., Chrapa M., Offermans T., and Ruhstaller B., An Effective Area Approach to Model Lateral Degradation in Organic Solar Cells, *Adv. Energy Mater.*, **5**, 1500835, 2015.
139. Parnell A.J., Cadby A.J., Dunbar A.D., Roberts G.L., Plumridge A., Dalgliesh R.M., Skoda M.W., and Jones R.A., Physical Mechanisms Responsible for the Water-Induced Degradation of PC61BM P3HT Photovoltaic Thin Films, *Polym. Sci. B: Polym. Phys.*, **54**, 141-146, 2016.
140. Krebs F.C., Gevorgyan S.A., and Alstrup J., A Roll-to-Roll Process to Flexible Polymer Solar Cells: Model Studies, Manufacture and Operational Stability Studies, *J. Mater. Chem.*, **19**, 5442-5451, 2009.
141. Norrman K., Madsen M.V., Gevorgyan S.A., and Krebs F.C., Degradation Patterns in Water and Oxygen of an Inverted Polymer Solar Cell, *J. Am. Chem. Soc.*, **132**, 16883-16892, 2010.
142. Balderrama V.S., Estrada M., Han P.L., Granero P., Pallarés J., Ferré-Borrull J., and Marsal L.F., Degradation of Electrical Properties of PTB1:PCBM Solar Cells under Different Environments, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **125**, 155-163, 2014.
143. Pacios R., Chatten A.J., Kawano K., Durrant J.R., Bradley D.D., and Nelson J., Effects of Photo-Oxidation on the Performance of Poly[2-methoxy-5-(3',7'-dimethyloctyloxy)-1,4-phenylene vinylene]:[6,6]-Phenyl C61-Butyric Acid Methyl Ester Solar Cells, *Adv. Funct. Mater.*, **16**, 2117-2126, 2006.
144. Tournebize A., Bussière P.O., Wong-Wah-Chung P., Thérias S., Rivaton A., Gardette J.L., Beaupré S., and Leclerc M., Impact of UV-Visible Light on the Morphological and Photochemical Behavior of a Low-Bandgap Poly(2,7-Carbazole) Derivative for Use in High-Performance Solar Cells, *Adv. Energy Mater.*, **3**, 478-487, 2013.
145. Fraga Dominguez I., Topham P.D., Bussiere P.O., Bégué D., and Rivaton A., Unravelling the Photodegradation Mechanisms of a Low Bandgap Polymer by Combining Experimental and Modeling Approaches, *J. Phys. Chem. C*, **119**, 2166-2176, 2015.
146. Ournebize A., Bussiere P.O., Rivaton A., Gardette J.L., Medlej H., Hiorns R.C., Dagron-Lartigau C., Krebs F.C., and Norrman K., New Insights into the Mechanisms of Photodegradation/Stabilization of P3HT:PCBM Active Layers Using Poly(3-hexyl-d 13-thiophene), *Chem. Mater.*, **25**, 4522-4528, 2013.
147. Grisorio R., Allegretta G., Mastroianni P., and Suranna G.P., On the Degradation Process Involving Polyfluorenes and the Factors Governing Their Spectral Stability, *Macromolecules*, **44**, 7977-

- 7986, 2011.
148. Burlingame Q., Tong X., Hankett J., Slootsky M., Chen Z., and Forrest S.R., Photochemical Origins of Burn-in Degradation in Small Molecular Weight Organic Photovoltaic Cells, *Energy Environ. Sci.*, **8**, 1005-1010, 2015.
149. Rivaton A., Chambon S., Manceau M., Gardette J.L., Lemaître N., and Guillerez S., Light-Induced Degradation of the Active Layer of Polymer-based Solar Cells, *Polym. Degrad. Stab.*, **95**, 278-284, 2010.
150. Manor A., Katz E.A., Tromholt T., and Krebs F.C., Electrical and Photo-Induced Degradation of ZnO Layers in Organic Photovoltaics, *Adv. Energy Mater.*, **1**, 836-843, 2011.
151. Cheng P., Shi Q., Lin Y., Li Y., and Zhan X., Evolved Structure of Thiazolothiazole Based Small Molecules Towards Enhanced Efficiency in Organic Solar Cells, *Org. Electron.*, **14**, 599-606, 2013.
152. Dou L., Chen C.C., Yoshimura K., Ohya K., Chang W.H., Gao J., Liu Y., Richard E., and Yang Y., Synthesis of 5H-Dithieno[3,2-b:2',3'-d]pyran as an Electron-Rich Building Block for Donor-Acceptor Type Low-Bandgap Polymers, *Macromolecules*, **46**, 3384-3390, 2013.
153. Zhan X., Tan Z.A., Domercq B., An Z., Zhang X., Barlow S., Li Y., Zhu D., Kippelen B., and Marder S.R., A High-Mobility Electron-Transport Polymer with Broad Absorption and Its Use in Field-Effect Transistors and All-Polymer Solar Cells, *J. Am. Chem. Soc.*, **129**, 7246-7247, 2007.
154. De Gennes P.G. and Gennes P.G., *Scaling Concepts in Polymer Physics*, Cornell University, New York, USA, 1979.
155. Wang T., Pearson A.J., Dunbar A.D., Staniec P.A., Watters D.C., Yi H., Ryan A.J., Jones R.A., Iraqi A., and Lidzey D.G., Correlating Structure with Function in Thermally Annealed PCDTBT:PC70BM Photovoltaic Blends, *Adv. Funct. Mater.*, **22**, 1399-1408, 2012.
156. Vitoratos E., Sakkopoulos S., Dalas E., Paliatas N., Karageorgopoulos D., Petraki F., Kennou S., and Choulis S.A., Thermal Degradation Mechanisms of PEDOT:PSS, *Org. Electron.*, **10**, 61-66, 2009.
157. Dupont S.R., Novoa F., Voroshazi E., and Dauskardt R.H., Decohesion Kinetics of PEDOT:PSS Conducting Polymer Films, *Adv. Funct. Mater.*, **24**, 1325-1332, 2014.
158. Bruner C., Novoa F., Dupont S., and Dauskardt R., Decohesion Kinetics in Polymer Organic Solar Cells, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 21474-21483, 2014.
159. Dupont S.R., Voroshazi E., Heremans P., and Dauskardt R.H., Adhesion Properties of Inverted Polymer Solar Cells: Processing and Film Structure Parameters, *Org. Electron.*, **14**, 1262-1270, 2013.
160. Brand V., Bruner C., and Dauskardt R.H., Cohesion and Device Reliability in Organic Bulk Heterojunction Photovoltaic Cells, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **99**, 182-189, 2012.
161. Yang J., Siempelkamp B.D., Liu D., and Kelly T.L., Investigation of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Degradation Rates and Mechanisms in Controlled Humidity Environments Using In Situ Techniques, *ACS Nano*, **9**, 1955-1963, 2015.
162. Conings B., Drijkoningen J., Gauquelin N., Babayigit A., D'Haen J., D'Olieslaeger L., Ethirajan A., Verbeeck J., Manca J., Mosconi E., and Angelis F.D., Intrinsic Thermal Instability of Methylammonium Lead Trihalide Perovskite, *Adv. Energy Mater.*, **5**, 1500477, 2015.
163. Kwon Y.S., Lim J., Yun H.J., Kim Y.H., and Park T., A Diketopyrrolopyrrole-Containing Hole Transporting Conjugated Polymer for Use in Efficient Stable Organic-Inorganic Hybrid Solar Cells Based on a Perovskite, *Energy Environ. Sci.*, **7**, 1454, 2014.
164. Koh T.M., Shanmugam V., Schlipf J., Oesinghaus L., Müller-Buschbaum P., Ramakrishnan N., Swamy V., Mathews N., Boix P.P., and Mhaisalkar S.G., Nanostructuring Mixed-Dimensional Perovskites: A Route toward Tunable, Efficient Photovoltaics, *Adv. Mater.*, **28**, 3653-3661, 2016.
165. Zheng H., Liu G., Zhu L., Ye J., Zhang X., Alsaedi A., Hayat T., Pan X., and Dai S., The Effect of Hydrophobicity of Ammonium Salts on Stability of Quasi-2D Perovskite Materials in Moist Condition, *Adv. Energy Mater.*, **8**, 1800051, 2018.
166. Jørgensen M., Norrman K., and Krebs F.C., Stability/Degradation of Polymer Solar Cells, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **92**, 686-714, 2008.
167. Xu R.P., Li Y.Q., Jin T.Y., Liu Y.Q., Bao Q.Y., O'Carroll C., and Tang J.X., In Situ Observation of Light Illumination-Induced Degradation in Organometal Mixed-Halide Perovskite Films, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **10**, 6737-6746, 2018.
168. Ko Y.H., Prabhakaran P., Jalalah M., Lee S.J., Lee K.S., and Park J.G., Correlating Nano Black Spots and Optical Stability in Mixed Halide Perovskite Quantum Dots, *J. Mater. Chem. C*, **6**, 7803-7813, 2018.
169. An R., Zhang F., Zou X., Tang Y., Liang M., Oshchapovskyy I., Liu Y., Honarfar A., Zhong Y., Li C., and Geng H., Photostability

- and Photodegradation Processes in Colloidal CsPbI₃ Perovskite Quantum Dots, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **10**, 39222-39227, 2018.
170. Huang S., Li Z., Wang B., Zhu N., Zhang C., Kong L., Zhang Q., Shan A., and Li L., Morphology Evolution and Degradation of CsPbBr₃ Nanocrystals under Blue Light-Emitting Diode Illumination, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 7249-7258, 2017.
171. Leijtens T., Eperon G.E., Pathak S., Abate A., Lee M.M., and Snaith H.J., Overcoming Ultraviolet Light Instability of Sensitized TiO₂ with Meso-Superstructured Organometal Tri-Halide Perovskite Solar Cells, *Nat. Commun.*, **4**, 2885, 2013.
172. Wang J., Chen Y., Liang M., Ge G., Zhou R., Sun Z., and Xue S., A New Thermal-Stable Truxene-based Hole-Transporting Material for Perovskite Solar Cells, *Dyes Pigm.*, **125**, 399-406, 2016.
173. Matsui H., Okada K., Kitamura T., and Tanabe N., Thermal Stability of Dye-Sensitized Solar Cells with Current Collecting Grid, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **93**, 1110-1115, 2009.
174. He D., Du X., Zhang W., Xiao Z., and Ding L., Improving the Stability of P3HT/PC61BM Solar Cells by a Thermal Crosslinker, *J. Mater. Chem. A*, **1**, 4589-4594, 2013.
175. Derue L., Dautel O., Tournebize A., Drees M., Pan H., Berthumeyrie S., Pavageau B., Cloutet E., Chambon S., Hirsch L., and Rivaton A., Thermal Stabilisation of Polymer-Fullerene Bulk Heterojunction Morphology for Efficient Photovoltaic Solar Cells, *Adv. Mater.*, **26**, 5831-5838, 2014.
176. Rumer J.W., Ashraf R.S., Eisenmenger N.D., Huang Z., Meager I., Nielsen C.B., Schroeder B.C., Chabynyc M.L., and McCulloch I., Dual Function Additives: A Small Molecule Crosslinker for Enhanced Efficiency and Stability in Organic Solar Cells, *Adv. Energy Mater.*, **5**, 1401426, 2015.
177. Savagatrup S., Rodriguez D., Printz A.D., Sieval A.B., Hummelen J.C., and Lipomi D.J., [70] PCBM and Incompletely Separated Grades of Methanofullerenes Produce Bulk Heterojunctions with Increased Robustness for Ultra-Flexible and Stretchable Electronics, *Chem. Mater.*, **27**, 3902-3911, 2015.
178. Kim H.J., Kim J.H., Ryu J.H., Kim Y., Kang H., Lee W.B., Kim T.S., and Kim B.J., Architectural Engineering of Rod-Coil Compatibilizers for Producing Mechanically and Thermally Stable Polymer Solar Cells, *ACS Nano*, **8**, 10461-10470, 2014.
179. Raïssi M., Erothu H., Ibarboure E., Cramail H., Vignau L., Cloutet E., and Hiorns R.C., Fullerene-Capped Copolymers for Bulk Heterojunctions: Device Stability and Efficiency Improvements, *J. Mater. Chem. A*, **3**, 18207-18221, 2015.
180. Raja R., Liu W.S., Hsiow C.Y., Rwei S.P., Chiu W.Y., and Wang L., Terthiophene-C60 Dyads as Donor/Acceptor Compatibilizers for Developing Highly Stable P3HT/PCBM Bulk Heterojunction Solar Cells, *J. Mater. Chem. A*, **3**, 14401-14408, 2015.
181. Wang S., Qu Y., Li S., Ye F., Chen Z., and Yang X., Improved Thermal Stability of Polymer Solar Cells by Incorporating Porphyrins, *Adv. Funct. Mater.*, **25**, 748-757, 2015.
182. Park H., Lee K.Y., Kim W., Shin H.W., Wang D.H., Ahn T.K., and Park J.H., Discrepancy of Optimum Ratio in Bulk Heterojunction Photovoltaic Devices: Initial Cell Efficiency vs Long-Term Stability, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **5**, 1612-1618, 2013.
183. Bertho S., Campo B., Piersimoni F., Spoltore D., D'Haen J., Lutsen L., Maes W., Vanderzande D., and Manca J., Improved Thermal Stability of Bulk Heterojunctions Based on Side-Chain Functionalized Poly(3-alkylthiophene) Copolymers and PCBM, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **110**, 69-76, 2013.
184. Oh J.Y., Shin M., Lee H.W., Lee Y.J., Baik H.K., and Jeong U., Enhanced Air Stability of Polymer Solar Cells with a Nanofibril-based Photoactive Layer, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 7759-7765, 2014.
185. Li N. and Brabec C.J., Air-Processed Polymer Tandem Solar Cells with Power Conversion Efficiency Exceeding 10%, *Energy Environ. Sci.*, **8**, 2902-2909, 2015.
186. Wong H.C., Li Z., Tan C.H., Zhong H., Huang Z., Bronstein H., McCulloch I., Cabral J.T., and Durrant J.R., Morphological Stability and Performance of Polymer-Fullerene Solar Cells under Thermal Stress: The Impact of Photoinduced PC60BM Oligomerization, *ACS Nano*, **8**, 1297-1308, 2014.
187. Huang W., Gann E., Xu Z.Q., Thomsen L., Cheng Y.B., and McNeill C.R., A Facile Approach to Alleviate Photochemical Degradation in High Efficiency Polymer Solar Cells, *J. Mater. Chem. A*, **3**, 16313-16319, 2015.
188. Li Z., Wong H.C., Huang Z., Zhong H., Tan C.H., Tsoi W.C., Kim J.S., Durrant J.R., and Cabral J.T., Performance Enhancement of Fullerene-based Solar Cells by Light Processing, *Nat. Commun.*, **4**, 2227, 2013.
189. Lim F.J., Krishnamoorthy A., and Ho G.W., Device Stability and Light-Soaking Characteristics of High-Efficiency Benzodithiophene-Thienothiophene Copolymer-based Inverted

- Organic Solar Cells with F-TiO_x Electron-Transport Layer, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 12119-12127, 2015.
190. Lee S.H., Seo J.W., and Lee J.Y., Stable Inverted Small Molecular Organic Solar Cells Using a p-Doped Optical Spacer, *Nanoscale*, **7**, 157-165, 2015.
191. Hao M., Luo G., Shi K., Xie G., Wu K., Wu H., Yu G., Cao Y., and Yang C., Dithieno[3,2-b: 2',3'-d]pyridin-5(4 H)-One-based Polymers with a Bandgap up to 2.02 eV for High Performance Field-Effect Transistors and Polymer Solar Cells with an Open-Circuit Voltage up to 0.98 V and an Efficiency up to 6.84%, *J. Mater. Chem. A*, **3**, 20516-20526, 2015.
192. Hao X., Wang S., Sakurai T., Masuda S., and Akimoto K., Improvement of Stability for Small Molecule Organic Solar Cells by Suppressing the Trap Mediated Recombination, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 18379-18386, 2015.
193. Wang W., Schaffer C.J., Song L., Körstgens V., Pröller S., Indari E.D., Wang T., Abdelsamie A., Bernstorff S., and Müller-Buschbaum P., In Operando Morphology Investigation of Inverted Bulk Heterojunction Organic Solar Cells by GISAXS, *J. Mater. Chem. A*, **3**, 8324-8331, 2015.
194. Chang Y.M. and Leu C.Y., Conjugated Polyelectrolyte and Zinc Oxide Stacked Structure as an Interlayer in Highly Efficient and Stable Organic Photovoltaic Cells, *J. Mater. Chem. A*, **1**, 6446-6451, 2013.
195. Wang F., Tan Z.A., and Li Y., Solution-Processable Metal Oxides/Chelates as Electrode Buffer Layers for Efficient and Stable Polymer Solar Cells, *Energy Environ. Sci.*, **8**, 1059-1091, 2015.
196. Chueh C.C., Li C.Z., and Jen A.K.Y., Recent Progress and Perspective in Solution-Processed Interfacial Materials for Efficient and Stable Polymer and Organometal Perovskite Solar Cells, *Energy Environ. Sci.*, **8**, 1160-1189, 2015.
197. Yip H.L. and Jen A.K.Y., Recent Advances in Solution-Processed Interfacial Materials for Efficient and Stable Polymer Solar Cells, *Energy Environ. Sci.*, **5**, 5994-6011, 2012.
198. Wang Y., Luo Q., Wu Q., Wang Q., Zhu H., Chen L., Li Y.Q., Luo L., Ma C.Q., and Mo O S.P., PEDOT: PSS Hybrid Hole Transporting Layer for Inverted Polymer Solar Cells, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 7170-7179, 2015.
199. Roth B., dos Reis Benatto G.A., Corazza M., Søndergaard R.R., Gevorgyan S.A., Jørgensen M., and Krebs F.C., The Critical Choice of PEDOT:PSS Additives for Long Term Stability of Roll-to-Roll Processed OPVs, *Adv. Energy Mater.*, **5**, 1401912, 2015.
200. Lee J.J., Lee S.H., Kim F.S., Choi H.H., and Kim J.H., Simultaneous Enhancement of the Efficiency and Stability of Organic Solar Cells Using PEDOT:PSS Grafted with a PEGME Buffer Layer, *Org. Electron.*, **26**, 191-199, 2015.
201. Hou X., Li Q., Cheng T., Yu L., Wang F., Lin J., Dai S., Li Y., and Tan Z.A., Improvement of the Power Conversion Efficiency and Long Term Stability of Polymer Solar Cells by Incorporation of Amphiphilic Nafion Doped PEDOT:PSS as a Hole Extraction Layer, *J. Mater. Chem. A*, **3**, 18727-18734, 2015.
202. Yi Q., Zhai P., Sun Y., Lou Y., Zhao J., Sun B., Patterson B., Luo H., Zhang W., Jiao L., and Wang H., Aqueous Solution-Deposited Molybdenum Oxide Films as an Anode Interfacial Layer for Organic Solar Cells, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 18218-18224, 2015.
203. Sun Y., Takacs C.J., Cowan S.R., Seo J.H., Gong X., Roy A., and Heeger A.J., Efficient, Air-Stable Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells Using MoO_x as the Anode Interfacial Layer, *Adv. Mater.*, **23**, 2226-2230, 2011.
204. Hu X., Chen L., and Chen Y., Universal and Versatile MoO₃-based Hole Transport Layers for Efficient and Stable Polymer Solar Cells, *J. Phys. Chem. C*, **118**, 9930-9938, 2014.
205. Manders J.R., Tsang S.W., Hartel M.J., Lai T.H., Chen S., Amb C.M., Reynolds J.R., and So F., Solution-Processed Nickel Oxide Hole Transport Layers in High Efficiency Polymer Photovoltaic Cells, *Adv. Funct. Mater.*, **23**, 2993-3001, 2013.
206. Zhai Z., Huang X., Xu M., Yuan J., Peng J., and Ma W., Greatly Reduced Processing Temperature for a Solution-Processed NiO_x Buffer Layer in Polymer Solar Cells, *Adv. Energy Mater.*, **3**, 1614-1622, 2013.
207. Cho S.P., Yeo J.S., Kim D.Y., Na S.I., and Kim S.S., Brush Painted V₂O₅ Hole Transport Layer for Efficient and Air-Stable Polymer Solar Cells, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **132**, 196-203, 2015.
208. Qiu M., Zhu D., Bao X., Wang J., Wang X., and Yang R., WO₃ with Surface Oxygen Vacancies as an Anode Buffer Layer for High Performance Polymer Solar Cells, *J. Mater. Chem. A*, **4**, 894-900, 2016.
209. Lien H.T., Wong D.P., Tsao N.H., Huang C.I., Su C., Chen K.H., and Chen L.C., Effect of Copper Oxide Oxidation State on the Polymer-based Solar Cell Buffer Layers, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 22445-22450, 2014.

210. Wang K., Ren H., Yi C., Liu C., Wang H., Huang L., Zhang H., Karim A., and Gong X., Solution-Processed Fe₃O₄ Magnetic Nanoparticle Thin Film Aligned by an External Magnetostatic Field as a Hole Extraction Layer for Polymer Solar Cells, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **5**, 10325-10330, 2013.
211. Yusoff A.R., Kim H.P., and Jang J., High Performance Organic Photovoltaics with Zinc Oxide and Graphene Oxide Buffer Layers, *Nanoscale*, **6**, 1537-1544, 2014.
212. Kim S.H., Lee C.H., Yun J.M., Noh Y.J., Kim S.S., Lee S., Jo S.M., Joh H.I., and Na S.I., Fluorine-Functionalized and Simultaneously Reduced Graphene Oxide as a Novel Hole Transporting Layer for Highly Efficient and Stable Organic Photovoltaic Cells, *Nanoscale*, **6**, 7183-7187, 2014.
213. Chen L., Du D., Sun K., Hou J., and Ouyang J., Improved Efficiency and Stability of Polymer Solar Cells Utilizing Two-Dimensional Reduced Graphene Oxide: Graphene Oxide Nanocomposites as Hole-Collection Material, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 22334-22342, 2014.
214. Liu J., Durstock M., and Dai L., Graphene Oxide Derivatives as Hole- and Electron-Extraction Layers for High-Performance Polymer Solar Cells, *Energy Environ. Sci.*, **7**, 1297-1306, 2014.
215. Huang J.H. and Lee K.C., Highly Stable, Solution-Processable Phenothiazine Derivative as Hole Collection Material for Organic Solar Cells, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 7680-7685, 2014.
216. Noh Y.J., Park S.M., Yeo J.S., Kim D.Y., Kim S.S., and Na S.I., Efficient PEDOT:PSS-Free Polymer Solar Cells with an Easily Accessible Polyacrylonitrile Polymer Material as a Novel Solution-Processable Anode Interfacial Layer, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 25032-25038, 2015.
217. Dupont S.R., Oliver M., Krebs F.C., and Dauskardt R.H., Interlayer Adhesion in Roll-to-Roll Processed Flexible Inverted Polymer Solar Cells, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **97**, 171-175, 2012.
218. Kang D.J., Cho H.H., Lee I., Kim K.H., Kim H.J., Liao K., Kim T.S., and Kim B.J., Enhancing Mechanical Properties of Highly Efficient Polymer Solar Cells Using Size-Tuned Polymer Nanoparticles, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 2668-2676, 2015.
219. Savagatrup S., Chan E., Renteria-Garcia S.M., Printz A.D., Zaretski A.V., O'Connor T.F., Rodriguez D., Valle E., and Lipomi D.J., Plasticization of PEDOT:PSS by Common Additives for Mechanically Robust Organic Solar Cells and Wearable Sensors, *Adv. Funct. Mater.*, **25**, 427-436, 2015.
220. Zhu Z., Mankowski T., Balakrishnan K., Shikoh A.S., Touati F., Benammar M.A., Mansuripur M., and Falco C.M., Ultrahigh Aspect Ratio Copper-Nanowire-based Hybrid Transparent Conductive Electrodes with PEDOT:PSS and Reduced Graphene Oxide Exhibiting Reduced Surface Roughness and Improved Stability, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 16223-16230, 2015.
221. Huang J.H., Ibrahim M.A., and Chu C.W., Wet-Milled Anatase Titanium Oxide Nanoparticles as a Buffer Layer for Air-Stable Bulk Heterojunction Solar Cells, *Prog. Photovolt.*, **23**, 1017-1024, 2015.
222. Wang J., Lee Y.J., and Hsu J.W., One-Step Synthesis of ZnO Nanocrystals in n-Butanol with Bandgap Control: Applications in Hybrid and Organic Photovoltaic Devices, *J. Phys. Chem. C*, **118**, 18417-18423, 2014.
223. Nikiforov M.P., Strzalka J., Jiang Z., and Darling S.B., Lanthanides: New Metallic Cathode Materials for Organic Photovoltaic Cells, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **15**, 13052-13060, 2013.
224. Chang Y.M., Zhu R., Richard E., Chen C.C., Li G., and Yang Y., Electrostatic Self-Assembly Conjugated Polyelectrolyte-Surfactant Complex as an Interlayer for High Performance Polymer Solar Cells, *Adv. Funct. Mater.*, **22**, 3284-3289, 2012.
225. Yin Z., Zheng Q., Chen S.C., Cai D., and Ma Y., Controllable ZnMgO Electron-Transporting Layers for Long-Term Stable Organic Solar Cells with 8.06% Efficiency after One-Year Storage, *Adv. Energy Mater.*, **6**, 1501493, 2016.
226. Venkatesan S., Ngo E., Khatiwada D., Zhang C., and Qiao Q., Enhanced Lifetime of Polymer Solar Cells by Surface Passivation of Metal Oxide Buffer Layers, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 16093-16100, 2015.
227. Pang C., Chellappan V., Yim J.H., Tan M.J., Goh G.T.W., Lee S., Zhang J., and de Mello J., Enhanced Performance Using an SU-8 Dielectric Interlayer in a Bulk Heterojunction Organic Solar Cell, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 5219-5225, 2015.
228. Courtright B.A. and Jenekhe S.A., Polyethylenimine Interfacial Layers in Inverted Organic Photovoltaic Devices: Effects of Ethoxylation and Molecular Weight on Efficiency and Temporal Stability, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 26167-26175, 2015.
229. Hu L., Wu F., Li C., Hu A., Hu X., Zhang Y., Chen L., and Chen Y., Alcohol-Soluble n-Type Conjugated Polyelectrolyte as Electron Transport Layer for Polymer Solar Cells, *Macromolecules*, **48**,

- 5578-5586, 2015.
230. Lin Z., Chang J., Zhang J., Jiang C., Wu J., and Zhu C., A Work-Function Tunable Polyelectrolyte Complex (PEI: PSS) as a Cathode Interfacial Layer for Inverted Organic Solar Cells, *J. Mater. Chem. A*, **2**, 7788-7794., 2014.
231. Cai P., Zhong S., Xu X., Chen J., Chen W., Huang F., Ma Y., and Cao Y., Using Ultra-High Molecular Weight Hydrophilic Polymer as Cathode Interlayer for Inverted Polymer Solar Cells: Enhanced Efficiency and Excellent Air-Stability, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **123**, 104-111, 2014.
232. Wu N., Luo Q., Bao Z., Lin J., Li Y.Q., and Ma C.Q., Zinc Oxide: Conjugated Polymer Nanocomposite as Cathode Buffer Layer for Solution Processed Inverted Organic Solar Cells, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **141**, 248-259, 2015.
233. MacLeod B.A., De Villiers B.J.T., Schulz P., Ndione P.F., Kim H., Giordano A.J., Zhu K., Marder S.R., Graham S., Berry J.J., and Kahn A., Stability of Inverted Organic Solar Cells with ZnO Contact Layers Deposited from Precursor Solutions, *Energy Environ. Sci.*, **8**, 592-601, 2015.
234. Kam Z., Wang X., Zhang J., and Wu J., Elimination of Burn-in Open-Circuit Voltage Degradation by ZnO Surface Modification in Organic Solar Cells, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 1608-1615, 2015.
235. Chang J., Lin Z., Jiang C., Zhang J., Zhu C., and Wu J., Improve the Operational Stability of the Inverted Organic Solar Cells Using Bilayer Metal Oxide Structure, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 18861-18867, 2014.
236. Hau S.K., Yip H.L., Baek N.S., Zou J., O'Malley K., and Jen A.K.Y., Air-Stable Inverted Flexible Polymer Solar Cells Using Zinc Oxide Nanoparticles as an Electron Selective Layer, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 225, 2008.
237. Zimmermann B., Würfel U., and Niggemann M., Longterm Stability of Efficient Inverted P3HT:PCBM Solar Cells, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **93**, 491-496, 2009.
238. He M., Jung J., Qiu F., and Lin Z., Graphene-based Transparent Flexible Electrodes for Polymer Solar Cells, *J. Mater. Chem.*, **22**, 24254-24264, 2012.
239. Pang S., Hernandez Y., Feng X., and Müllen K., Graphene as Transparent Electrode Material for Organic Electronics, *Adv. Mater.*, **23**, 2779-2795, 2011.
240. Park H., Chang S., Zhou X., Kong J., Palacios T., and Gradedčak S., Flexible Graphene Electrode-based Organic Photovoltaics with Record-High Efficiency, *Nano Lett.*, **14**, 5148-5154, 2014.
241. Chang H., Wang G., Yang A., Tao X., Liu X., Shen Y., and Zheng Z., A Transparent, Flexible, Low-Temperature, and Solution-Processible Graphene Composite Electrode, *Adv. Funct. Mater.*, **20**, 2893-2902, 2010.
242. Fan X., Wang J., Wang H., Liu X., and Wang H., Bendable ITO-Free Organic Solar Cells with Highly Conductive and Flexible PEDOT:PSS Electrodes on Plastic Substrates, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 16287-16295, 2015.
243. Hau S.K., Yip H.L., Zou J., and Jen A.K.Y., Indium Tin Oxide-Free Semi-Transparent Inverted Polymer Solar Cells Using Conducting Polymer as Both Bottom and Top Electrodes, *Org. Electron.*, **10**, 1401-1407, 2009.
244. Galagan Y., Mescheloff A., Veenstra S.C., Andriessen R., and Katz E.A., Reversible Degradation in ITO-Containing Organic Photovoltaics under Concentrated Sunlight, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **17**, 3891-3897, 2015.
245. Lo M.F., Ng T.W., Mo H.W., and Lee C.S., Direct Threat of a UV-Ozone Treated Indium-Tin-Oxide Substrate to the Stabilities of Common Organic Semiconductors, *Adv. Funct. Mater.*, **23**, 1718-1723, 2013.
246. Mengistie D.A., Ibrahim M.A., Wang P.C., and Chu C.W., Highly Conductive PEDOT:PSS Treated with Formic Acid for ITO-Free Polymer Solar Cells, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 2292-2299, 2014.
247. Heo S.W., Lee E.J., Seong K.W., and Moon D.K., Enhanced Stability in Polymer Solar Cells by Controlling the Electrode Work Function via Modification of Indium Tin Oxide, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **115**, 123-128, 2013.
248. An C.J., Yoo H.W., Cho C., Park J.M., Choi J.K., Jin M.L., Lee J.Y., and Jung H.T., Surface Plasmon Assisted High Performance Top-Illuminated Polymer Solar Cells with Nanostructured Ag Rear Electrodes, *J. Mater. Chem. A*, **2**, 2915-2921, 2014.
249. Yambem S.D., Liao K.S., Alley N.J., and Curran S.A., Stable Organic Photovoltaics Using Ag Thin Film Anodes, *J. Mater. Chem.*, **22**, 6894-6898, 2012.
250. Zhang Z.G., Qi B., Jin Z., Chi D., Qi Z., Li Y.F., and Wang J.Z., Perylene Diimides: A Thickness-Insensitive Cathode Interlayer for High Performance Polymer Solar Cells, *Energy Environ. Sci.*, **2014**, 1966-1973, 2015.
251. Yeom H.R., Heo J., Kim G.H., Ko S.J., Song S., Jo Y., Kim D.S., Walker B., and Kim J.Y., Optimal Top Electrodes for Inverted Polymer Solar Cells, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **17**, 2152-2159, 2015.

252. Tan W.Y., Wang R., Li M., Liu G., Chen P., Li X.C., Lu S.M., Zhu H.L., Peng Q.M., Zhu X.H., and Chen W., Lending Triarylphosphine Oxide to Phenanthroline: A Facile Approach to High-Performance Organic Small-Molecule Cathode Interfacial Material for Organic Photovoltaics Utilizing Air-Stable Cathodes, *Adv. Funct. Mater.*, **24**, 6540-6547, 2014.
253. Khan T.M., Zhou Y., Dindar A., Shim J.W., Fuentes-Hernandez C., and Kippelen B., Organic Photovoltaic Cells with Stable Top Metal Electrodes Modified with Polyethylenimine, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 6202-6207, 2014.
254. Sapkota S.B., Spies A., Zimmermann B., Dürr I., and Würfel U., Promising Long-Term Stability of Encapsulated ITO-Free Bulk-Heterojunction Organic Solar Cells under Different Aging Conditions, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **130**, 144-150, 2014.
255. Elkington D., Cooling N., Zhou X.J., Belcher W.J., and Dastoor P.C., Single-Step Annealing and Encapsulation for Organic Photovoltaics Using an Exothermically-Setting Encapsulant Material, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **124**, 75-78, 2014.
256. Romero-Gomez P., Betancur R., Martinez-Otero A., Elias X., Mariano M., Romero B., Arredondo B., Vergaz R., and Martorell J., Enhanced Stability in Semi-Transparent PTB7/PC71BM Photovoltaic Cells, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **137**, 44-49, 2015.
257. Yamaguchi H., Granstrom J., Nie W., Sojoudi H., Fujita T., Voiry D., Chen M., Gupta G., Mohite A.D., Graham S., and Chhowalla M., Reduced Graphene Oxide Thin Films as Ultrabarriers for Organic Electronics, *Adv. Energy Mater.*, **4**, 1300986, 2014.
258. Garg A., Gupta S.K., Jasieniak J.J., Singh T.B., and Watkins S.E., Improved Lifetimes of Organic Solar Cells with Solution-Processed Molybdenum Oxide Anode-Modifying Layers, *Prog. Photovolt.*, **23**, 989-996, 2015.
259. Aluicio-Sarduy E., Baidak A., Vougioukalakis G.C., and Keivanidis P.E., Phosphorimetric Characterization of Solution-Processed Polymeric Oxygen Barriers for the Encapsulation of Organic Electronics, *J. Phys. Chem. C*, **118**, 2361-2369, 2014.
260. Roesch R., Eberhardt K.R., Engmann S., Gobsch G., and Hoppe H., Polymer Solar Cells with Enhanced Lifetime by Improved Electrode Stability and Sealing, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **117**, 59-66, 2013.
261. Nikiforov M.P., Strzalka J., and Darling S.B., Delineation of the Effects of Water and Oxygen on the Degradation of Organic Photovoltaic Devices, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **110**, 36-42, 2013.
262. Chen N., Kovacic P., Howden R.M., Wang X., Lee S., and Gleason K.K., Low Substrate Temperature Encapsulation for Flexible Electrodes and Organic Photovoltaics, *Adv. Energy Mater.*, **5**, 1401442, 2015.
263. Morlier A., Cros S., Garandet J.P., and Alberola N., Gas Barrier Properties of Solution Processed Composite Multilayer Structures for Organic Solar Cells Encapsulation, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **115**, 93-99, 2013.
264. Lee H.J., Kim H.P., Kim H.M., Youn J.H., Nam D.H., Lee Y.G., Lee J.G., Bin Mohd Yusoff A.R., and Jang J., Solution Processed Encapsulation for Organic Photovoltaics, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **111**, 97-101, 2013.
265. Sivula K., Luscombe C.K., Thompson B.C., and Fréchet J.M., Enhancing the Thermal Stability of Polythiophene: Fullerene Solar Cells by Decreasing Effective Polymer Regioregularity, *J. Am. Chem. Soc.*, **128**, 13988-13989, 2006.
266. Woo C.H., Thompson B.C., Kim B.J., Toney M.F., and Fréchet J.M., The Influence of Poly(3-hexylthiophene) Regioregularity on Fullerene-Composite Solar Cell Performance, *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 16324-16329, 2008.
267. Kim B.J., Miyamoto Y., Ma B., and Fréchet J.M., Photocrosslinkable Polythiophenes for Efficient, Thermally Stable, Organic Photovoltaics, *Adv. Funct. Mater.*, **19**, 2273-2281, 2009.
268. Griffini G., Douglas J.D., Piliago C., Holcombe T.W., Turri S., Fréchet J.M., and Mynar J.L., Long-Term Thermal Stability of High-Efficiency Polymer Solar Cells Based on Photocrosslinkable Donor-Acceptor Conjugated Polymers, *Adv. Mater.*, **23**, 1660-1664, 2011.
269. Yao K., Chen L., Li F., Wang P., and Chen Y., Cooperative Assembly Donor-Acceptor System Induced by Intermolecular Hydrogen Bonds Leading to Oriented Nanomorphology for Optimized Photovoltaic Performance, *J. Phys. Chem. C*, **116**, 714-721, 2012.
270. Khiev S., Derue L., Ayenew G., Medlej H., Brown R., Rubatat L., Hiorns R.C., Wantz G., and Dagrón-Lartigau C., Enhanced Thermal Stability of Organic Solar Cells by Using Photolinkable End-Capped Polythiophenes, *Polym. Chem.*, **4**, 4145-4150, 2013.
271. Yau C.P., Wang S., Treat N.D., Fei Z., Tremolet de Villers B.J., Chabinye M.L., and Heeney M., Investigation of Radical and Cationic Cross-Linking in High-Efficiency, Low Band Gap

- Solar Cell Polymers, *Adv. Energy Mater.*, **5**, 1401228, 2015.
272. Waters H., Kettle J., Chang S.W., Su C.J., Wu W.R., Jeng U.S., Tsai Y.C., and Horie M., Organic Photovoltaics Based on a Crosslinkable PCPDTBT Analogue; Synthesis, Morphological Studies, Solar Cell Performance and Enhanced Lifetime, *J. Mater. Chem. A*, **1**, 7370-7378, 2013.
273. Carlé J.E., Andreasen B., Tromholt T., Madsen M.V., Norrman K., Jørgensen M., and Krebs F.C., Comparative Studies of Photochemical Cross-Linking Methods for Stabilizing the Bulk Hetero-Junction Morphology in Polymer Solar Cells, *J. Mater. Chem.*, **22**, 24417-24423, 2012.
274. Carlé J.E., Helgesen M., Zawacka N.K., Madsen M.V., Bundgaard E., and Krebs F.C., A Comparative Study of Fluorine Substituents for Enhanced Stability of Flexible and ITO-Free High-Performance Polymer Solar Cells, *Polym. Sci. B: Polym. Phys.*, **52**, 893-899, 2014.
275. Nguyen T.L., Choi H., and Ko S.J., Semi-Crystalline Photovoltaic Polymers with Efficiency Exceeding 9% in a ~300 nm Thick Conventional Single-Cell Device, *Energy Environ. Sci.*, **7**, 3040-3051, 2014.
276. Li Z., Wu F., Lv H., Yang D., Chen Z., Zhao X., and Yang X., Side-Chain Engineering for Enhancing the Thermal Stability of Polymer Solar Cells, *Adv. Mater.*, **27**, 6999-7003, 2015.
277. Morse G.E., Tournebise A., Rivaton A., Chassé T., Taviot-Gueho C., Blouin N., Lozman O.R., and Tierney S., The Effect of Polymer Solubilizing Side-Chains on Solar Cell Stability, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **17**, 11884-11897, 2015.
278. Kesters J., Kudret S., Bertho S., Van den Brande N., Defour M., Van Mele B., Penxten H., Lutsen L., Manca J., Vanderzande D., and Maes W., Enhanced Intrinsic Stability of the Bulk Heterojunction Active Layer Blend of Polymer Solar Cells by Varying the Polymer Side Chain Pattern, *Org. Electron.*, **15**, 549-562, 2014.
279. Kesters J., Verstappen P., Raymakers J., Vanormelingen W., Drijkoningen J., D'Haen J., Manca J., Lutsen L., Vanderzande D., and Maes W., Enhanced Organic Solar Cell Stability by Polymer (PCPDTBT) Side Chain Functionalization, *Chem. Mater.*, **27**, 1332-1341, 2015.
280. Savagatrup S., Makaram A.S., Burke D.J., and Lipomi D.J., Mechanical Properties of Conjugated Polymers and Polymer-Fullerene Composites as a Function of Molecular Structure, *Adv. Funct. Mater.*, **24**, 1169-1181, 2014.
281. Savagatrup S., Printz A.D., Rodriguez D., and Lipomi D.J., Best of Both Worlds: Conjugated Polymers Exhibiting Good Photovoltaic Behavior and High Tensile Elasticity, *Macromolecules*, **47**, 1981-1992, 2014.
282. Chambon S., Manceau M., Firon M., Cros S., Rivaton A., and Gardette J.L., Photo-Oxidation in an $^{18}\text{O}_2$ Atmosphere: A Powerful Tool to Elucidate the Mechanism of UV-Visible Light Oxidation of Polymers—Application to the Photodegradation of MDMO-PPV, *Polymer*, **49**, 3288-3294, 2008.
283. Manceau M., Gaume J., Rivaton A., Gardette J.L., Monier G., and Bideux L., Further Insights into the Photodegradation of Poly(3-hexylthiophene) by Means of X-Ray Photoelectron Spectroscopy, *Thin Solid Films*, **518**, 7113-7118, 2010.
284. Krebs F.C. and Spanggaard H., Significant Improvement of Polymer Solar Cell Stability, *Chem. Mater.*, **17**, 5235-5237, 2005.
285. Bjerring M., Nielsen J.S., Siu A., Nielsen N.C., and Krebs F.C., An Explanation for the High Stability of Polycarboxythiophenes in Photovoltaic Devices—A Solid-State NMR Dipolar Recoupling Study, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **92**, 772-784, 2008.
286. Gevorgyan S.A. and Krebs F.C., Bulk Heterojunctions Based on Native Polythiophene, *Chem. Mater.*, **20**, 4386-4390, 2008.
287. Han X., Chen X., and Holdcroft S., Nanostructured Morphologies and Topologies of π -Conjugated Polymers from Thermally Reactive Polymer Blends, *Adv. Mater.*, **19**, 1697-1702, 2007.
288. Manceau M., Rivaton A., and Gardette J.L., Involvement of Singlet Oxygen in the Solid-State Photochemistry of P3HT, *Macromol. Rapid Commun.*, **29**, 1823-1827, 2008.
289. Lira-Cantu M., Norrman K., Andreasen J.W., and Krebs F.C., Oxygen Release and Exchange in Niobium Oxide MEHPPV Hybrid Solar Cells, *Chem. Mater.*, **18**, 5684-5690, 2006.
290. Norrman K., Larsen N.B., and Krebs F.C., Lifetimes of Organic Photovoltaics: Combining Chemical and Physical Characterisation Techniques to Study Degradation Mechanisms, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **90**, 2793-2814, 2006.
291. Chambon S., Rivaton A., Gardette J.L., and Firon M., Durability of MDMO-PPV and MDMO-PPV:PCBM Blends under Illumination in the Absence of Oxygen, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **92**, 785-792, 2008.
292. Vandenberg J., Conings B., Bertho S., Kesters J., Spoltore

- D., Esiner S., Zhao J., Van Assche G., Wienk M.M., Maes W., and Lutsen L., Thermal Stability of Poly[2-methoxy-5-(2'-phenylethoxy)-1,4-phenylenevinylene](MPE-PPV): Fullerene Bulk Heterojunction Solar Cells, *Macromolecules*, **44**, 8470-8478, 2011.
293. Zhao J., Bertho S., Vandenberg J., Van Assche G., Manca J., Vanderzande D., Yin X., Shi J., Cleij T., Lutsen L., and Van Mele B., Phase Behavior of PCBM Blends with Different Conjugated Polymers, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **13**, 12285-12292, 2011.
294. Bertho S., Janssen G., Cleij T.J., Conings B., Moons W., Gadisa A., D'Haen J., Goovaerts E., Lutsen L., Manca J., and Vanderzande D., Effect of Temperature on the Morphological and Photovoltaic Stability of Bulk Heterojunction Polymer: Fullerene Solar Cells, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **92**, 753-760, 2008.
295. Bundgaard E., Helgesen M., Carlé J.E., Krebs F.C., and Jørgensen M., Advanced Functional Polymers for Increasing the Stability of Organic Photovoltaics, *Macromol. Chem. Phys.*, **214**, 1546-1558, 2013.
296. Helgesen M., Madsen M.V., Andreasen B., Tromholt T., Andreasen J.W., and Krebs F.C., Thermally Reactive Thiazolo [5,4-d] Thiazole Based Copolymers for High Photochemical Stability in Polymer Solar Cells, *Polym. Chem.*, **2**, 2536-2542, 2011.
297. Manceau M., Helgesen M., and Krebs F.C., Thermo-Cleavable Polymers: Materials with Enhanced Photochemical Stability, *Polym. Degrad. Stab.*, **95**, 2666-2669, 2010.
298. Verstappen P., Kesters J., D'Olieslaeger L., Drijkoningen J., Cardinaletti I., Vangerven T., Bruijnaers B.J., Willems R.E., D'Haen J., Manca J.V., and Lutsen L., Simultaneous Enhancement of Solar Cell Efficiency and Stability by Reducing the Side Chain Density on Fluorinated PCPDTQx Copolymers, *Macromolecules*, **48**, 3873-3882, 2015.
299. Yao K., Chen L., Hu T., and Chen Y., Photocrosslinkable Liquid-Crystalline Polymers for Stable Photovoltaics by Adjusting Side-Chains Spacing and Fullerene Size to Control Intercalation, *Org. Electron.*, **13**, 1443-1455, 2012.
300. Drees M., Hoppe H., Winder C., Neugebauer H., Sariciftci N.S., Schwinger W., Schäffler F., Topf C., Scharber M.C., Zhu Z., and Gaudiana R., Stabilization of the Nanomorphology of Polymer-Fullerene "Bulk Heterojunction" Blends Using a Novel Polymerizable Fullerene Derivative, *J. Mater. Chem.*, **15**, 5158-5163, 2005.
301. Liang W.W., Chang C.Y., Lai Y.Y., Cheng S.W., Chang H.H., Lai Y.Y., Cheng Y.J., Wang C.L., and Hsu C.S., Formation of Nanostructured Fullerene Interlayer through Accelerated Self-Assembly and Cross-Linking of Trichlorosilane Moieties Leading to Enhanced Efficiency of Photovoltaic Cells, *Macromolecules*, **46**, 4781-4789, 2013.
302. Helgesen M., Sørensen T.J., Manceau M., and Krebs F.C., Photochemical Stability and Photovoltaic Performance of Low-Band Gap Polymers Based on Dithiophene with Different Bridging Atoms, *Polym. Chem.*, **2**, 1355-1361, 2011.
303. Bundgaard E., Hagemann O., Bjerring M., Nielsen N.C., Andreasen J.W., Andreasen B., and Krebs F.C., Removal of Solubilizing Side Chains at Low Temperature: A New Route to Native Poly(thiophene), *Macromolecules*, **45**, 3644-3646, 2012.
304. Renaud C., Mougner S.J., Pavlopoulou E., Brochon C., Fleury G., Deribew D., Portale G., Cloutet E., Chambon S., Vignau L., and Hadziioannou G., Block Copolymer as a Nanostructuring Agent for High-Efficiency and Annealing-Free Bulk Heterojunction Organic Solar Cells, *Adv. Mater.*, **24**, 2196-2201, 2012.
305. Zhang Y., Yip H.L., Acton O., Hau S.K., Huang F., and Jen A.K.Y., A Simple and Effective Way of Achieving Highly Efficient and Thermally Stable Bulk-Heterojunction Polymer Solar Cells Using Amorphous Fullerene Derivatives as Electron Acceptor, *Chem. Mater.*, **21**, 2598-2600, 2009.
306. Liao M.H., Tsai C.E., Lai Y.Y., Cao F.Y., Wu J.S., Wang C.L., Hsu C.S., Liao I., and Cheng Y.J., Morphological Stabilization by Supramolecular Perfluorophenyl-C60 Interactions Leading to Efficient and Thermally Stable Organic Photovoltaics, *Adv. Funct. Mater.*, **24**, 1418-1429, 2014.
307. Hadi A., Hekmatshoar M.H., Abbasi F., and Agbolaghi S., A Focus on Charge Carrier Recombination and Energy Conversion Efficiency in Nanohybrid Photovoltaics, *J. Iran. Chem. Soc.*, **17**, 2233-2242, 2020.
308. Petersen M.H., Gevorgyan S.A., and Krebs F.C., Thermocleavable Low Band Gap Polymers and Solar Cells therefrom with Remarkable Stability toward Oxygen, *Macromolecules*, **41**, 8986-8994, 2008.
309. Xiao C., Zhang G., and Agbolaghi S., Stability of Poly(3-Hexylthiophene): Phenyl-C71-Butyric Acid Methyl Ester Solar Cells Modified by Pre-designed Supramolecular

- Nanostructures, *J. Electron. Mater.*, 1-13, 2020.
310. Yuan Q., Zhang Z., Li L., Agbolaghi S., and Mousavi S., Improved Stability in P3HT:PCBM Photovoltaics by Incorporation of Well-Designed Polythiophene/Graphene Compositions, *Polym. Int.*, **69**, 833-846, 2020.
311. Carlé J.E., Helgesen M., Madsen M.V., Bundgaard E., and Krebs F.C., Upscaling from Single Cells to Modules- Fabrication of Vacuum- and ITO-Free Polymer Solar Cells on Flexible Substrates with Long Lifetime, *J. Mater. Chem. C*, **2**, 1290-1297, 2014.
312. Ryu T.I., Yoon Y., Kim J.H., Hwang D.H., Ko M.J., Lee D.K., Kim J.Y., Kim H., Park N.G., Kim B., and Son H.J., Simultaneous Enhancement of Solar Cell Efficiency and Photostability via Chemical Tuning of Electron Donating Units in Diketopyrrolopyrrole-based Push-Pull Type Polymers, *Macromolecules*, **47**, 6270-6280, 2014.
313. Constantinou I., Lai T.H., Zhao D., Klump E.D., Deininger J.J., Lo C.K., Reynolds J.R., and So F., High Efficiency Air-Processed Dithienogermole-based Polymer Solar Cells, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 4826-4832, 2015.
314. Wood S., Wade J., Shahid M., Collado-Fregoso E., Bradley D.D., Durrant J.R., Heeney M., and Kim J.S., Natures of Optical Absorption Transitions and Excitation Energy Dependent Photostability of Diketopyrrolopyrrole (DPP)-based Photovoltaic Copolymers, *Energy Environ. Sci.*, **8**, 3222-3232, 2015.
315. Printz A.D., Savagatrup S., Burke D.J., Purdy T.N., and Lipomi D.J., Increased Elasticity of a Low-Bandgap Conjugated Copolymer by Random Segmentation for Mechanically Robust Solar Cells, *RSC Adv.*, **4**, 13635-13643, 2014.
316. Müller C., On the Glass Transition of Polymer Semiconductors and Its Impact on Polymer Solar Cell Stability, *Chem. Mater.*, **27**, 2740-2754, 2015.
317. Lee Y.H., Chen W.C., Chiang C.J., Kau K.C., Liou W.S., Lee Y.P., Wang L., and Dai C.A., A New Strategy for Fabricating Organic Photovoltaic Devices with Stable D/A Double-Channel Network to Enhance Performance Using Self-Assembling All-Conjugated Diblock Copolymer, *Nano Energy*, **13**, 103-116, 2015.
318. Gao D., Hollinger J., and Seferos D.S., Selenophene-Thiophene Block Copolymer Solar Cells with Thermostable Nanostructures, *ACS Nano*, **6**, 7114-7121, 2012.
319. Lin Y., Lim J.A., Wei Q., Mannsfeld S.C., Briseno A.L., and Watkins J.J., Cooperative Assembly of Hydrogen-Bonded Diblock Copolythiophene/Fullerene Blends for Photovoltaic Devices with Well-Defined Morphologies and Enhanced Stability, *Chem. Mater.*, **24**, 622-632, 2012.
320. Kong J., Song S., Yoo M., Lee G.Y., Kwon O., Park J.K., Back H., Kim G., Lee S.H., Suh H., and Lee K., Long-Term Stable Polymer Solar Cells with Significantly Reduced Burn-in Loss, *Nat. Commun.*, **5**, 1-8, 2014.
321. Papadopoulos P., Floudas G., Chi C., and Wegner G., Molecular Dynamics of Oligofluorenes: A Dielectric Spectroscopy Investigation, *J. Chem. Phys.*, **120**, 2368-2374, 2004.
322. Bruner C. and Dauskardt R., Role of Molecular Weight on the Mechanical Device Properties of Organic Polymer Solar Cells, *Macromolecules*, **47**, 1117-1121, 2014.
323. Park S.H., Yang C., Cowan S., Lee J.K., Wudl F., Lee K., and Heeger A.J., Isomeric Iminofullerenes as Acceptors in Bulk Heterojunction Organic Solar Cells, *J. Mater. Chem.*, **19**, 5624-5628, 2009.
324. Kim S.O., Chung D.S., Cha H., Jang J.W., Kim Y.H., Kang J.W., Jeong Y.S., Park C.E., and Kwon S.K., Thermally Stable Organic Bulk Heterojunction Photovoltaic Cells Incorporating an Amorphous Fullerene Derivative as an Electron Acceptor, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **95**, 432-439, 2011.
325. Distler A., Sauermann T., Egelhaaf H.J., Rodman S., Waller D., Cheon K.S., Lee M., and Guldi D.M., The Effect of PCBM Dimerization on the Performance of Bulk Heterojunction Solar Cells, *Adv. Energy Mater.*, **4**, 1300693, 2014.
326. Meng X., Zhang W., Tan Z.A., Li Y., Ma Y., Wang T., Jiang L., Shu C., and Wang C., Highly Efficient and Thermally Stable Polymer Solar Cells with Dihydonaphthyl-based [70] Fullerene Bisadduct Derivative as the Acceptor, *Adv. Funct. Mater.*, **22**, 2187-2193, 2012.
327. Chen S., Ye G., Xiao Z., and Ding L., Efficient and Thermally Stable Polymer Solar Cells Based on a 54 π -Electron Fullerene Acceptor, *J. Mater. Chem. A*, **1**, 5562-5566, 2013.
328. Lin Y. and Zhan X., Non-Fullerene Acceptors for Organic Photovoltaics: An Emerging Horizon, *Mater. Horiz.*, **1**, 470-488, 2014.
329. Anthony J.E., Facchetti A., Heeney M., Marder S.R., and Zhan X., n-Type Organic Semiconductors in Organic Electronics, *Adv. Mater.*, **22**, 3876-3892, 2010.
330. Facchetti A., Polymer Donor-Polymer Acceptor (All-Polymer) Solar Cells, *Mater. Today*, **16**, 123-132, 2013.

331. Cheng P., Bai H., Zawacka N.K., Andersen T.R., Liu W., Bundgaard E., Jørgensen M., Chen H., Krebs F.C., and Zhan X., Roll-Coated Fabrication of Fullerene-Free Organic Solar Cells with Improved Stability, *Adv. Sci.*, **2**, 1500096, 2015.
332. Lin Y., Zhang Z.G., Bai H., Wang J., Yao Y., Li Y., Zhu D., and Zhan X., High-Performance Fullerene-Free Polymer Solar Cells with 6.31% Efficiency, *Energy Environ. Sci.*, **8**, 610-616, 2015.
333. Holliday S., Ashraf R.S., Nielsen C.B., Kirkus M., Röhr J.A., Tan C.H., Collado-Fregoso E., Knall A.C., Durrant J.R., Nelson J., and McCulloch I., A Rhodanine Flanked Nonfullerene Acceptor for Solution-Processed Organic Photovoltaics, *J. Am. Chem. Soc.*, **137**, 898-904, 2015.
334. Li S., Liu W., Shi M., Mai J., Lau T.K., Wan J., Lu X., Li C.Z., and Chen H., A Spirobifluorene and Diketopyrrolopyrrole Moieties Based Non-Fullerene Acceptor for Efficient and Thermally Stable Polymer Solar Cells with High Open-Circuit Voltage, *Energy Environ. Sci.*, **9**, 604-610, 2016.
335. Kim T., Kim J.H., Kang T.E., Lee C., Kang H., Shin M., Wang C., Ma B., Jeong U., Kim T.S., and Kim B.J., Flexible, Highly Efficient All-Polymer Solar Cells, *Nat. Commun.*, **6**, 1-7, 2015.