نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۶، شماره۱، بهار ۱۴۰۲، صفحه ۶۳-۷۷

مهندسی نقص برای سلول خورشیدی مسطح بازده بالا مبتنی بر پروسکایت سه کاتیونه

محمدرضا کلاهدوز اصفهانی [۱]علی ابراهیمی[۲]، راضیه تیموری[۳]

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱ / ۰۶ / ۲۰

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲ / ۰۷ / ۱۸

کلمات کلیدی:
سلول‌خورشیدی
شبیه‌سازی
پروسکایت
SCAPS

چکیده

پارامترهای سلول خورشیدی با ترکیب کردن دو کاتیون آلی فرمامیدینیوم (FA) و متیل آمونیوم (MA) در سایت A از لایه جذب کننده پروسکایت سه کاتیونه و دو آنیونه شامل Br و I در سایت x توسط شبیه‌سازی با نرم‌افزار SCAPS بررسی شده است. ابتدا چگالی نقص لایه پروسکایت از ۱×۱۰^{۱۳} تا ۱×۱۰^{۱۷} (cm^{-3}) تغییر داده شده و اثر آن بر عملکرد سلول خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس ضخامت لایه جاذب پروسکایت از ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ نانومتر تغییر کرده و برای چگالی نقص‌های مختلف لایه پروسکایت، نحوه و میزان تغییرات پارامترهای سلول خورشیدی دیده شده است. در مرحله بعد با تغییر چگالی نقص‌های فصل مشترک پروسکایت/ETL از ۱×۱۰^{۱۱} تا ۲×۱۰^{۱۳} (cm^{-3})، خازن موجود در فصل مشترک افزایش پیدا کرده که باعث کاهش بازدهی و ضریب‌پرشدگی سلول خورشیدی شده است. در نهایت مقدار طول انتشار حامل‌ها (L) از صفر تا حدود ۴ میکرومتر عوض شده است که با افزایش آن، پارامترهای عملکردی سلول خورشیدی افزایش پیدا کرده‌اند.

۱. دانشیار دانشگاه تهران kolahdouz@ut.ac.ir
۲. دانشجوی دکترا الکترونیک
۳. دانشجوی دکترا نانوفناوری–نانوالکتریک

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

۱. مقدمه

در تئوری، مقدار سوخت‌های فسیلی محدود و انرژی تجدیدپذیر بی‌پایان است. با این حال، این کل داستان نیست. خوشبختانه سوخت‌های فسیلی دائماً تشکیل می‌شوند. هر روز یک بار نفت جدید از گیاهان قدیمی و موجودات مرده ساخته می‌شود. اما متأسفانه ما از سوخت‌های فسیلی بسیار سریع‌تر از آنچه که ایجاد می‌شوند، استفاده می‌کنیم. تقریباً ۴۰۰ میلیون سال طول کشیده است تا سوخت‌های فسیلی یک سیاره تشکیل شود (وو[1] و همکاران, ۲۰۲۱). به دلیل کاهش منابع سوخت فسیلی مانند زغال سنگ و نفت، با در نظر گرفتن برخی محدودیت‌های زیست محیطی مانند اکتشافات پرهزینه مورد نیاز؛ منابع تجدیدپذیر قابل اعتماد، فراوان و برای تولید انرژی ضروری هستند (مینباشی[2] و همکاران, ۲۰۱۸; اتوفی[3] و همکاران, ۲۰۲۰). در سال‌های اخیر، یکی از تولیدات قابل توجه در حوزه انرژی، سلول خورشیدی در نظر گرفته می‌شود (آسیم[4] و همکاران, ۲۰۱۲; اتوفی و همکاران, ۲۰۲۰). سلول‌های خورشیدی پروسکایتی به عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین جاذب‌های کم هزینه برای سلول‌های خورشیدی ظاهر شده‌اند. پروسکایت‌های ترکیبی آلی- معدنی به شکل AMX_3 هستند که در آن A و M دو کاتیون با اندازه‌های مختلف هستند و X آنیونی است که به هر دو کاتیون متصل می‌شود. مکان "A" با یک کاتیون تک ظرفیتی مانند سزیم (Cs^+)، متیل آمونیوم (MA^+)، فرمامیدینیوم (FA^+) پر شده است. یک فلز دو ظرفیتی مانند Sn^{2+}، Pb^{2+} در محل "M" قرار گرفته و در نهایت محل "X" با یک آنیون هالید مانند Cl^-، Br^-، I^- پر شده است (کوجیما[5] و همکاران, ۲۰۰۹; لیو[6] و همکاران, ۲۰۱۳; اسمیت[7] و همکاران, ۲۰۱۴). مواد پروسکایت خواص ویژه‌ای مانند طول انتشار حامل طولانی در محدوده میکرومتر، ضریب جذب بالا و گاف انرژی قابل تنظیم دارند که باعث افزایش راندمان تبدیل توان (PCE) سلول‌های خورشیدی پروسکایت (PSC) تا ۲۵.۵ درصد شده است (تورن-کروز[8] و همکاران, ۲۰۱۸).

پروسکایت در مقایسه با تمام موادهایی که تا امروز برای این کار در نظر گرفته شده خیلی سریع‌تر انرژی خورشید را به الکتریسیته تبدیل می‌کند، ارزان است، ساخت آن‌ها آسان است و می‌تواند در قالب‌های رولی تولید شود. به علاوه می‌توان لایه‌های پروسکایت را روی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی (که در حال حاضر رایج‌تر هستند) قرار داد تا میزان بیش‌تری از انرژی به الکتریسیته تبدیل شود. البته پروسکایت ماده‌ی بسیار ظریف و شکننده‌ای است و در اندک زمانی با رطوبت، هوا، گرما یا تابش شدید خورشید متلاشی می‌شود. دانشمندان طی چند ماه گذشته به دنبال پیدا کردن راهی برای تقویت این ماده بوده‌اند. آن ها دریافته‌اند که با افزودن سزیم به پروسکایت می‌توان مقاومت و استحکام آن را تا حد زیادی افزایش داد. پروسکایت غنی شده با سزیم می‌تواند در حد سلول‌های سیلیکونی بازدهی داشته باشد (حامد عبدی , ۱۳۹۸). مزیت سلول‌های خورشیدی پروسکایت نسبت به سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بازده تبدیل انرژی بالا، ساخت و پردازش آسان آن‌ها است. یکی از نکات جالب در مورد پروسکایت این است که با وجود ثابت بودن فرمول کلی، با تغییر عناصر می‌توان به ترکیبات با ابعاد مختلف دست یافت. یکی از بزرگترین مزایای پروسکایت فلز-هالیدی، گاف انرژی مستقیم و قابل تنظیم با استفاده از تبادل یونی است. استفاده از پروسکایت‌ها که دارای مخلوطی از هالیدها و کاتیون‌ها هستند، به یک اصل مهم در طراحی و مهندسی این مواد تبدیل شده است. با ترکیب کردن کاتیون‌ها و هالیدها مزایای هر کدام با هم ترکیب می‌شود و معایب آن‌ها ازبین می‌رود. بالاترین بازده گزارش شده حدود ۲۱/۳۵ درصد، با پروسکایت‌های مخلوط کاتیون-هالیدها (مخلوطی از کاتیون های FA/MA و هالیدهای Br/I) به دست آمده است. اخیراً از Cs برای ایجاد ترکیبات کاتیونی پیچیده‌تر در پروسکایت استفاده شده است، به عنوان مثال Cs /FA،Cs/MA و Cs/FA/

[1] Wu
[2] Minbashi
[3] Otoufi
[4] Asim
[5] Kojima
[6] Liu
[7] Smith
[8] Turren-Cruz

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

MA. با استفاده از پروسکایت سه کاتیونه می‌توان طول عمر و کارایی سلول‌های خورشیدی پروسکایت را افزایش داد (جئون[1] و همکاران, ۲۰۱۵; پلت[2] و همکاران, ۲۰۱۴; تورن–کروز و همکاران, ۲۰۱۸) (راضیه تیموری و راحله محمدپور , ۱۴۰۰).

برای توسعه سلول‌های خورشیدی پروسکایت بسیار کارآمد و پایدار، نقص‌ها در لایه جاذب پروسکایت باید کنترل شوند. حتی پس از فرآیند دقیق ساخت، یکسری نقص‌های اجتناب ناپذیری به وجود می‌آیند (مهجبین[3] و همکاران, ۲۰۲۰). نقص‌ها باعث ایجاد بازترکیب غیر تابشی (کیم[4] و همکاران, ۲۰۱۲)، مهاجرت یونی (شا[5] و همکاران, ۲۰۱۵)، به دام انداختن بارها (لی[6] و همکاران, ۲۰۱۲) و پراکندگی (یانگ[7] و همکاران, ۲۰۱۷) در سلول‌های خورشیدی پروسکایت می‌شوند. همچنین باعث محدود شدن بازده در PSCها می‌شوند (سام و متئوز[8] , ۲۰۱۴) و آن‌ها بر پایداری طولانی مدت سلول‌ها تأثیر می‌گذارند(اسنیث[9] , ۲۰۱۳). دو نوع نقص وجود دارد که به عنوان سطوح کم عمق یا عمیق شناخته می‌شوند. نقص‌های سطحی خیلی مانع بازده نمی‌شوند زیرا معمولاً یک نوع حامل را به دام می‌اندازند که بیشتر آزاد می‌شود. نقص‌های عمیق نزدیک به مرکز گاف انرژی نامناسب هستند زیرا هر دو نوع حامل را به دام می‌اندازند و زمان کافی را برای بازترکیب حامل بار می‌دهند (چودهوری[10] و همکاران, ۲۰۲۰; جوشی[11] و همکاران, ۲۰۱۶; کیرنی[12] و همکاران, ۲۰۱۸). بنابراین برای توسعه ساخت PSCهای با بازده بالا باید نقص‌ها در لایه جاذب پروسکایت به شکلی موثر کنترل شوند. فصل مشترک‌ها نقش مهمی در عملکرد سلول دارند. نقص‌های فصل مشترک و واکنش‌های سطحی، به طور معمول مسئول بازترکیب غیر تابشی بار در سطح می‌باشند. تقریباً اکثر نقص‌های بدنه[13]، نقص نقطه‌ای[14] هستند که معمولاً نقص‌های سطحی هستند. اما بیشتر نقص‌های فصل مشترک مانند نقص‌های موجود در سطح، نقص‌های با ابعاد بزرگ‌اند که معمولاً نقص‌های عمیق می‌باشند. بنابراین انتظار می‌رود که نقص‌های فصل مشترک در مقایسه با نقص‌های بدنه، سهم بسیار بیشتری در تلفات بازترکیب غیر تابشی داشته باشند زیرا تعداد زیادی نقص عمیق در فصل مشترک‌ها به جای بدنه لایه پروسکایت وجود دارد. نقص‌های نقطه‌ای در بدنه پروسکایت‌ها به مرزهای grain یا سطح لایه پروسکایت منتقل می‌شوند بنابراین باید در فصل مشترک در نظر گرفته شوند (ب. چن[15] و همکاران, ۲۰۱۹ ; ج. چن و پارک[16] , ۲۰۱۹; هان[17] و همکاران , ۲۰۱۹). حامل‌های به دام افتاده بر اثر نقص‌ها در سطح مشترک جمع می‌شوند که منجر به بازترکیب غیر تابشی سطحی، خم شدن نوار باند، تغییر میدان الکتریکی داخلی، تغییر در تراز سطح انرژی و غیره می‌شوند. همه این‌ها برای جداسازی حامل و تزریق بار مضر هستند. در نهایت این‌ها PCE و ثبات را بدتر می‌کنند. همچنین دلیل اصلی هیسترزیس نمودار جریان–ولتاژ درPSCها، بارهای انباشته شده در فصل مشترک‌ها می‌باشند که می‌توانند جریان خازنی را با فرآیند به دام انداختن بار تولید کنند (ران[18] و همکاران, ۲۰۱۸; ه.وانگ[19] و همکاران, ۲۰۱۹; س.وانگ و همکاران, ۲۰۱۸) (راضیه تیموری و راحله محمدپور , ۱۴۰۰).

ضخامت لایه پروسکایت یکی از پارامترهای اصلی برای دستیابی به راندمان بالای PSCها است. ضخامت باید برای جذب تعداد زیادی فوتون کافی باشد. یک لایه پروسکایت بیش از حد ضخیم، مراکز بازترکیبی بیشتری ایجاد می‌کند و به دلیل کاهش میدان الکتریکی

[1] Jeon
[2] Pellet
[3] Mahjabin
[4] Kim
[5] Sha
[6] Lee
[7] Yang
[8] Sun and Mathews
[9] Snaith
[10] Chowdhury
[11] Joshi
[12] Kearney
[13] bulk
[14] point defect
[15] Chen
[16] Park
[17] Han
[18] Ran
[19] Wang

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

در پروسکایت، انتقال حامل‌های بار تولید شده توسط نور را متوقف می‌کند که پارامترهای خروجی سلول خورشیدی را کاهش می‌دهد. مقدار بهینه ضخامت باید با طول انتشار (طول عمر) حامل‌های بار و ضخامت پروسکایت مطابقت داشته باشد (مالیکوو[1] و همکاران, ۲۰۱۶). برای مثال در این مقاله (ژانگ[2] و همکاران, ۲۰۱۶)، برای سلول خورشیدی با لایه جاذب پروسکایت $CH_3NH_3PbI_3$ مقدار بهینه ضخامت لایه پروسکایت حدود ۳۰۰ نانومتر بدست آمده است.

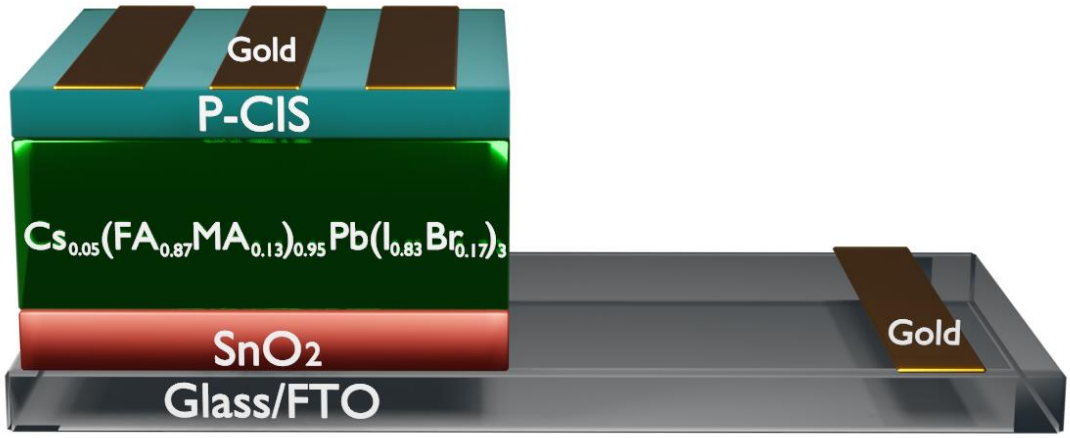
در این تحقیق شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار SCAPS-1D که یک برنامه تک بعدی برای شبیه‌سازی سلول‌های خورشیدی لایه نازک می‌باشد، انجام شده است. این نرم‌افزار در دانشگاه خنت–بلژیک در بخش الکترونیک سیستم‌های اطلاعاتی (ELIS) توسعه یافته است و در ابتدا برای ساختار خانواده‌های $CuInSe_2$ و CdTe ایجاد شد (بورجلمن[3] و همکاران, ۲۰۰۰, ۲۰۰۴). در این مقاله ابتدا پارامترهای ولتاژ مدار باز (V_{oc})، جریان اتصال کوتاه (J_{sc})، بازدهی (PCE) و ضریب پرشدگی (FF) برای سلول خورشیدی با لایه جاذب پروسکایت سه کاتیونه و دو آنیونه $Cs_{0.05}(FA_{0.87}MA_{0.13})_{0.95}Pb(I_{0.83}Br_{0.17})_3$ بدست آمده و نمودارهای نایکوئیست، بازده کوانتومی، نمودار باند و چگالی جریان–ولتاژ آن مورد بررسی قرار گرفته است. سپس اثر افزایش چگالی نقص‌های لایه جاذب پروسکایت برعملکرد سلول خورشیدی دیده شده است. در مرحله بعد با افزایش ضخامت لایه پروسکایت برای چگالی نقص‌های گوناگون، چگونگی تغییر پارامترهای عملکردی سلول بررسی شده است. بعد از این با بررسی پارامترهای سلول و خازن موجود در فصل مشترک، مقدار بهینه‌ای برای چگالی نقص‌های موجود در فصل مشترک پروسکایت/ETL بدست آمده است. در نهایت اثر طول انتشارهای مختلف حامل در لایه جاذب پروسکایت بر عملکرد سلول خورشیدی مطالعه شده است.

۲. ساختار سلول خورشیدی پروسکایت مورد شبیه‌سازی

شکل ۱ ساختار سلول خورشیدی پروسکایت شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. اجزای اصلی ساختار به صورت FTO/SnO_2(ETL)/Triple-cations Perovskite absorber/P-CIS(HTL)/Gold می‌باشد. SnO_2 لایه انتقال دهنده الکترون و لایه انتقال دهنده حفره به صورت P-CIS می‌باشد. لایه به صورت $Cs_{0.05}(FA_{0.87}MA_{0.13})_{0.95}Pb(I_{0.83}Br_{0.17})_3$ است. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود از طلا به عنوان الکترود استفاده شده است. پارامترهای تنظیم شده مواد برای شبیه‌سازی دستگاه، با دقت از مطالعات تجربی گزارش شده استخراج شده است. برخی از پارامترهای اساسی مربوط به مشخصات الکترونیکی دستگاه برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار SCAPS، در **Error! Reference source not found.** آورده شده و برای بازترکیب نقص از یک مدل توسعه یافته بر اساس نظریه شاکلی–رید–هال استفاده شده است. پارامترهای N_A، N_D، ε_r و χ به ترتیب چگالی پذیرنده[4]، چگالی دهنده[5]، ضریب دی الکتریک و الکترون‌خواهی می‌باشند و N_t تراکم نقص‌ها در مواد است. سطح انرژی نقص در مرکز شکاف انرژی قرار دارد و نوع نقص آن آمفوتریک است. در فصل مشترک[6] میان پروسکایت/P-CIS و SnO_2/پروسکایت تراکم نقص (N_t) به اندازه 1×10^{10} cm^{-2} و به صورت خنثی تعریف شده است. تمام شبیه‌سازی‌ها تحت استاندارد AM1.5 در دمای اتاق انجام شد.

[1] Malyukov
[2] Zhang
[3] Burgelman
[4] acceptor density
[5] donor density
[6] interface

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



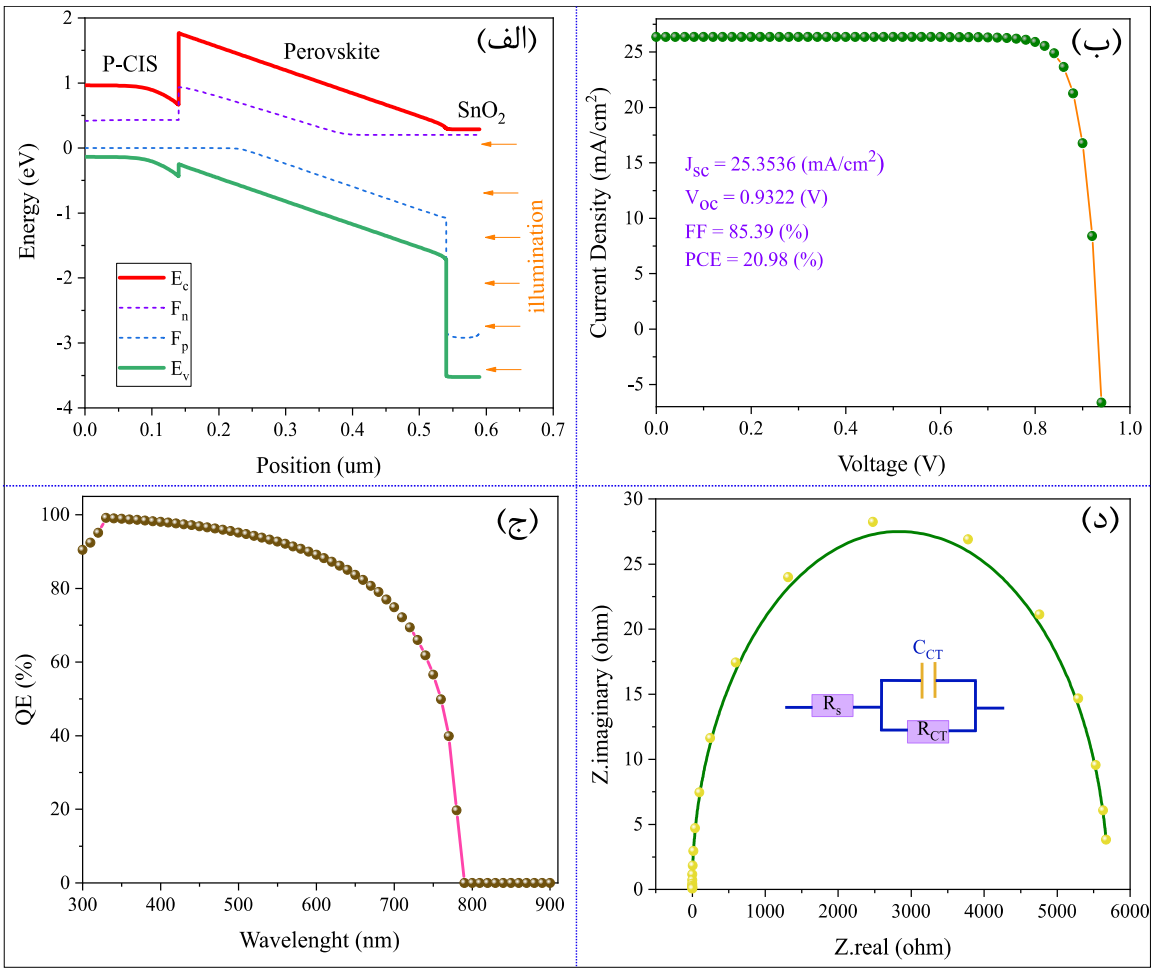
شکل ۱. شماتیک سلول خورشیدی پروسکایت شبیه‌سازی شده.

جدول ۱: پارامترهای مواد که در شبیه‌سازی عددی با SCAPS استفاده شده است.

Parameters	**P-CIS**	**$Cs_{0.05}(FA_{0.87}MA_{0.13})_{0.95}Pb(I_{0.83}Br_{0.17})_3$**	**SnO_2**
Thickness(μm)	۰/۱۴	۰/۴	۰/۰۵
$N_A(cm)^{-3}$	۹×۱۰^{۱۶}	۲/۱۴×۱۰^{۱۷}	۰
$N_D(cm)^{-3}$	۱×۱۰^{۱}	۲/۱۴×۱۰^{۱۷}	۹/۵۳×۱۰^{۱۸}
ε_r	۱۳/۶	۳۰	۱۰۰
$\chi(eV)$	۴/۶	۳/۵ تا ۳/۹۰۵	۳/۴۹۹
$E_g(eV)$	۱/۱	۱/۵۸۵	۳/۸۱
$\mu_n/\mu_p(cm^2/V_s)$	۲۵/۲۵	۵۰/۵۰	۶×۱۰$^{-۲}$/۶×۱۰$^{-۲}$
$N_t(cm^{-3})$	۱×۱۰^{۱۳}	۵×۱۰^{۱۴}	۲×۱۰^{۱۴}

در شکل ۲-الف نمودار باند برای لایه‌های سلول خورشیدی پروسکایتی نشان داده شده که طبق آن می‌توان به جهت تابش نور و ترتیب قرار گرفتن لایه‌ها در کنار یکدیگر پی‌برد. در شکل ۲-ب چگالی جریان بر حسب ولتاژ رسم شده است. طبق این شکل مقدار ولتاژ مدار باز ۰/۹۳ ولت است و مقدار جریان اتصال کوتاه (J_{sc}) برابر ۲۵/۳۵ (mA/cm^2) می‌باشد. همچنین مقدار PCE به ۲۰/۹۸ درصد و FF به ۸۵/۳۹ درصد رسیده است. بازده یک سلول خورشیدی با بازده کوانتومی داخلی (IQE) و بازده کوانتومی خارجی (EQE) اندازه‌گیری می‌شود. EQE عملکرد نوری سلول خورشیدی را به همراه نسبت بار تولید شده با توجه به فوتون‌های نور فرودی می‌گیرد. در حالی که IQE نسبت الکترون‌های جمع آوری شده به عنوان جریان نوری به تعداد فوتون‌های جذب شده با طول موج خاص است. IQE بخشی از طول موج

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



شکل ۲. الف) نمودار باند ب) چگالی جریان برحسب ولتاژ ج) بازده کوانتومی د) نایکوئیست

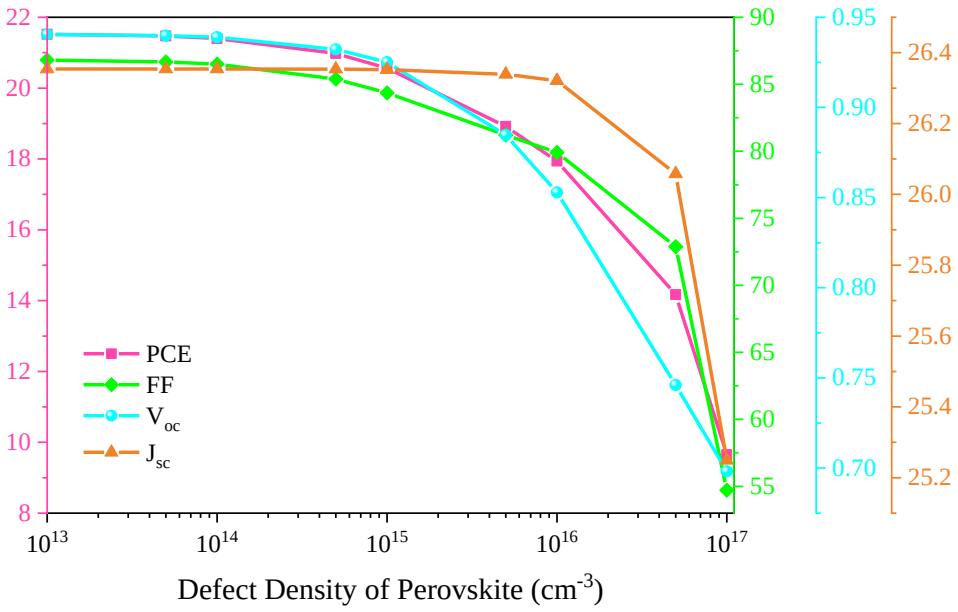
اســت که به جفت الکترون–حفره تبدیل می‌شــود و به عنوان حامل بار از ماده فعال پروســکایت جمع آوری می‌شــود (م. چن و همکاران, ۲۰۱۹; ایکس. ولنگ و همکاران, ۲۰۱۹) (راضـــیه تیموری و راحله محمدپور , ۱۴۰۰). اثر طول موج نور از ۳۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر بر عملکرد لایه فعال پروسکایت در شکل ۲–ج مورد مطالعه قرار گرفته است. دیده می‌شود که بیشترین مقدار بازده کوانتومی در طول موج حدود ۳۵۰ نانومتر رخ می‌دهد و هرچه بازده کوانتومی بالاتر باشد به این معناست که جفت الکترون–حفره بیشتری جمع‌آوری می‌شود. در شکل ۲–د نمودار نایکوئیست و مدار معادل دستگاه شبیه‌سازی شده، نشان داده شده است که حاوی یک خازن شیمیایی (C)، یک مقاومت انتقال بار (R_{CT}) و یک مقاومت سری (R_s) را نمایش می‌دهد. قوس‌ها در فرکانس متوسط بالا عمدتاً به مقاومت انتقال بار (R_{CT}) در فصل مشترک لایه ETL (SnO_2) با لایه پروسکایت نسبت داده می‌شوند. R_s مستقیماً با بازترکیب الکترون و حفره در سلول‌های خورشیدی پروسکایت مرتبط است. مقادیر R_s پایین اثرات مثبتی بر FF دارند. R_s کوچک برای استخراج الکترون مفید است و به طور موثر در برابر بازترکیب بار مقاومت می کند.

۳. نتایج

۳.۱. بررسی اثر چگالی نقص‌های لایه جاذب پروسکایت بر عملکرد سلول خورشیدی

در شکل ۳ تغییرات PCE، FF، V_{oc} و J_{sc} نسبت به افزایش چگالی نقص از ۱×۱۰^{۱۳} تا ۱×۱۰^{۱۷} (cm^{-3}) مشاهده می‌شود. زمانی که نور به سلول خورشیدی پروسکایتی می‌تابد حامل‌ها (الکترون و حفره) توسط نور تولید می‌شوند. این حامل‌ها توسط الکترود جمع آوری

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



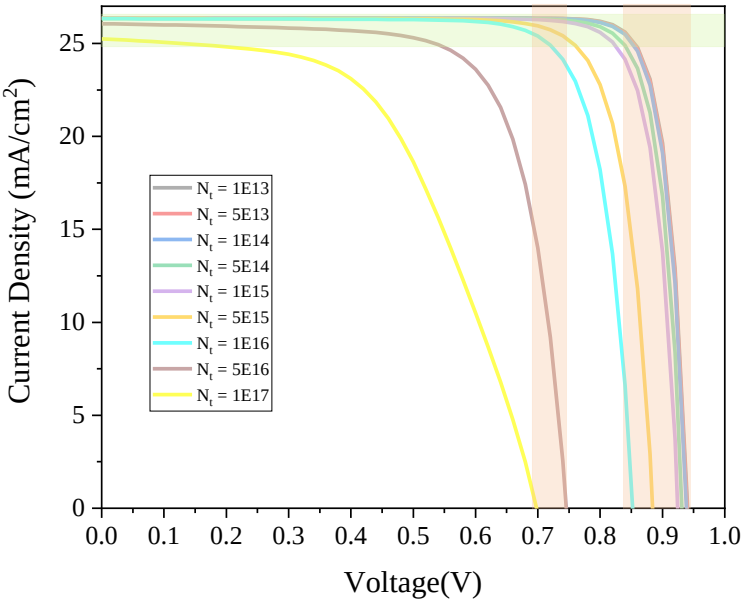
شکل ۳ . پارامترهای عملکردی سلول خورشیدی برحسب چگالی نقص‌های مختلف لایه پروسکایت.

شده و جریان خارجی را ایجاد می‌کنند. با افزایش چگالی نقص‌ها، به هنگام جمع‌آوری حامل‌ها تعدادی از آن‌ها از دست می‌روند. افزایش چگالی نقص‌ها به معنی افزایش بازترکیب است که منجر به کاهش طول نفوذ حامل‌ها همانند طول عمر آن‌ها می‌شود. پس در نتیجه افزایش چگالی نقص‌ها باعث کاهش پارامترهای عملکردی سلول می‌شود. J_{sc} در ابتدا تغییرات چندانی ندارد اما از یک جایی به بعد جریان اتصال کوتاه اندکی افت می‌کند و کاهش می‌یابد. V_{oc} بسیار تحت تأثیر نقص لایه جاذب (پروسکایت) قرار دارد. ولتاژ مدار باز (V_{oc}) هم در ابتدا تغییر محسوسی ندارد اما از یک چگالی نقص به بعد، V_{oc} شروع به کاهش می‌کند و به مقدار حدود ۰.۷ ولت می‌رسد. FF تابعی از V_{oc} و فرآیند بازترکیب در ناحیه تخلیه می‌باشد زیرا بازترکیب تاثیر مستقیم بر مستطیل بودن نمودار بازده کوانتومی دارد و افزایش بازترکیب به معنی دور شدن از حالت ایده‌آل و کاهش ضریب پرشدگی (FF) است. روند تغییرات FF همانند V_{oc} می‌باشد و از ۸۵ درصد به حدود ۵۵ درصد می‌رسد. برای بازده رابطه‌ای به صورت $PCE = V_{oc} \times J_{sc} \times FF$ برقرار است. از آنجایی که هر سه پارامتر V_{oc}، J_{sc} و FF با افزایش چگالی نقص کاهش پیدا می‌کنند پس PCE هم با افزایش چگالی نقص کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۳ در ابتدا PCE تغییر زیادی را حس نکرده است اما از یک چگالی نقص به بعد، PCE شروع به افت می‌کند و به مقدار ٪ ۹/۶۵ می‌رسد. در ***Error! Reference source not found.*** نمودار چگالی جریان برحسب ولتاژ برای چگالی نقص‌های مختلف لایه پروسکایت رسم شده است که با تغییر چگالی نقص‌ها ولتاژ مدار باز تغییرات زیادی دارد ولی جریان اتصال کوتاه تغییرات خیلی کمی تجربه می‌کند. این موضوع در شکل ۳ هم دیده شده بود.

۳.۲. اثر ضخامت لایه جاذب پروسکایت برای چگالی نقص‌های گوناگون

در یک لایه نازک از مواد جاذب پروسکایت، در حالت کلی افزایش ضخامت لایه جاذب به دلیل افزایش جذب نور و به تبع آن افزایش تولید جفت الکترون–حفره موجب افزایش بازده سلول خورشیدی می‌شود. اما در صورتی این اتفاق رخ می‌دهد که ضخامت لایه جاذب بزرگتر

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



شکل ٤ . نمودارهای چگالی جریان برحسب ولتاژ برای چگالی نقص‌های مختلف لایه پروسکایت.

از طول نفوذ الکترون و حفره‌ها نباشد تا الکترون و حفره‌های تولید شده بتوانند قبل از نابودی و بازترکیب شدن به الکترودها برسند و توان و نیرو تولید کنند.

$$R_{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau(p+n\ 2n_i\cosh(\frac{E_i - E_t}{KT}))} \quad (۱)$$

$$\tau = \frac{1}{\sigma \times N_t \times V_{th}} \quad (۲)$$

$$L = \sqrt{D \times \tau} \quad (۳)$$

$$D = \frac{KT}{q}\mu \quad (۴)$$

در روابط (۱) تا (۴) پارامترهای R_{SRH} : بازترکیب شاکلی-رید-هال (ناشی از نقص‌ها است)، N_t: تراکم نقص‌ها، E_t: سطح انرژی نقص‌ها، σ : سطح مقطع تسخیر حامل‌ها[1]، V_{th} : سرعت گرمایی، τ : طول عمر حامل‌ها، L : طول نفوذ حامل‌ها و D : ضریب نفوذ هستند. طبق روابط (۱) تا (۴) با افزایش تراکم نقص‌ها، طول عمر حامل‌ها کاهش پیدا می‌کند که این امر موجب افزایش بازترکیب و کاهش طول نفوذ حامل‌ها می‌شود.

پارامترهای سلول خورشیدی به ازای ضخامت‌های مختلف لایه جاذب پروسکایت از ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ نانومتر برای تراکم‌های نقص متفاوت از ۱ × ۱۰^{۱۳} تا ۱ × ۱۰^{۱۷} (cm^{-3}) بدست آمده و در شکل ۵ نتایج آورده شده است. از آن جایی که با افزایش تراکم نقص میزان طول نفوذ حامل‌ها کاهش می‌یابد پس برای تراکم‌های پایین نقص که طول نفوذ بزرگتری دارند با زیاد کردن ضخامت لایه جاذب، پارامترهای عملکردی سلول خورشیدی تقریبا ثابت می‌مانند و افزایش کمی را تجربه می‌کنند. اما با زیاد شدن تراکم نقص‌ها که منجر به کوچک شدن

[1] carriers capture cross section

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

طول نفوذ حامل‌ها می‌شود، با افزایش ضخامت لایه جاذب پارامترهای عملکردی سلول خورشیدی کاهش می‌یابند. در شکل ۵-(الف) تغییرات PCE نسبت به تغییرات ضخامت برای تراکم نقص‌های مختلف دیده می‌شود. برای تراکم نقص‌های از $۱۰^{۱۳} \times ۱$ تا $۱۰^{۱۴} \times ۵$ (cm^{-3}) با افزایش ضخامت، میزان PCE ابتدا افزایش می‌یابد و سپس کاهش. همان طور که ذکر شد از آنجایی که از یک ضخامتی به بعد مقدار طول نفوذ حامل‌ها از ضخامت لایه جاذب کوچکتر می‌شود باعث کاهش بازده می‌شود. با دقت در شکل ۵-(الف) می‌توان کاهش طول نفوذ حامل‌ها با افزایش تراکم نقص متوجه شد، مثلا در تراکم نقص $۱۰^{۱۳} \times ۱$ cm^{-3} تا ضخامت ۱۰۰۰ نانومتر با افزایش ضخامت افزایش بازده اتفاق می‌افتد و بعد از این ضخامت بازده شروع به کاهش می‌کند. اما در تراکم $۱۰^{۱۴} \times ۵$ cm^{-3} تا ضخامت ۴۰۰ نانومتر با افزایش ضخامت افزایش بازده اتفاق می‌افتد و بعد از این ضخامت بازده شروع به کاهش می‌کند و این امر به وضوح کاهش طول نفوذ حامل‌ها را نشان می‌دهد. از تراکم نقص $۱۰^{۱۵} \times ۱$ cm^{-3} به بعد از همان ابتدا با افزایش ضخامت لایه جاذب کاهش PCE مشاهده می‌شود. در شکل ۵-(ب) تغییرات J_{sc} نسبت به تغییرات ضخامت برای تراکم نقص‌های مختلف دیده می‌شود. این پارامتر هم مثل PCE رفتار می‌کند. از تراکم نقص$۱۰^{۱۳} \times ۱$ تا $۱۰^{۱۶} \times ۱$ (cm^{-3}) تغییرات ضخامت اثر قابل توجهی روی J_{sc} ندارد و افزایش و کاهش خیلی کمی در آن مشاهده می‌شود. اما از تراکم $۱۰^{۱۶} \times ۵$ cm^{-3} به بعد با افزایش ضخامت لایه جاذب کاهش چشمگیری در J_{sc} به وجود می‌آید. در شکل ۵-(ج) تغییرات FF نسبت به تغییرات ضخامت برای تراکم نقص‌های مختلف دیده می‌شود. از تراکم نقص $۱۰^{۱۳} \times ۱$ تا $۱۰^{۱۴} \times ۱$ (cm^{-3}) تغییرات ضخامت اثر قابل توجهی روی FF ندارد اما از تراکم $۱۰^{۱۴} \times ۵$ cm^{-3} به بعد با افزایش ضخامت لایه جاذب FF کاهش می‌یابد. در نهایت شکل ۵-(د) تغییرات V_{oc} نسبت به تغییرات ضخامت برای تراکم نقص‌های مختلف نشان می‌دهد. از تراکم نقص $۱۰^{۱۳} \times ۱$ تا $۱۰^{۱۴} \times ۱$ (cm^{-3}) تغییرات ضخامت اثر قابل توجهی روی V_{oc} ندارد اما از تراکم $۱۰^{۱۴} \times ۵$ cm^{-3} به بعد با افزایش ضخامت لایه جاذب V_{oc} کاهش می‌یابد.

۳.۳. بررسی اثر چگالی نقص فصل مشترک ETL/پروسکایت

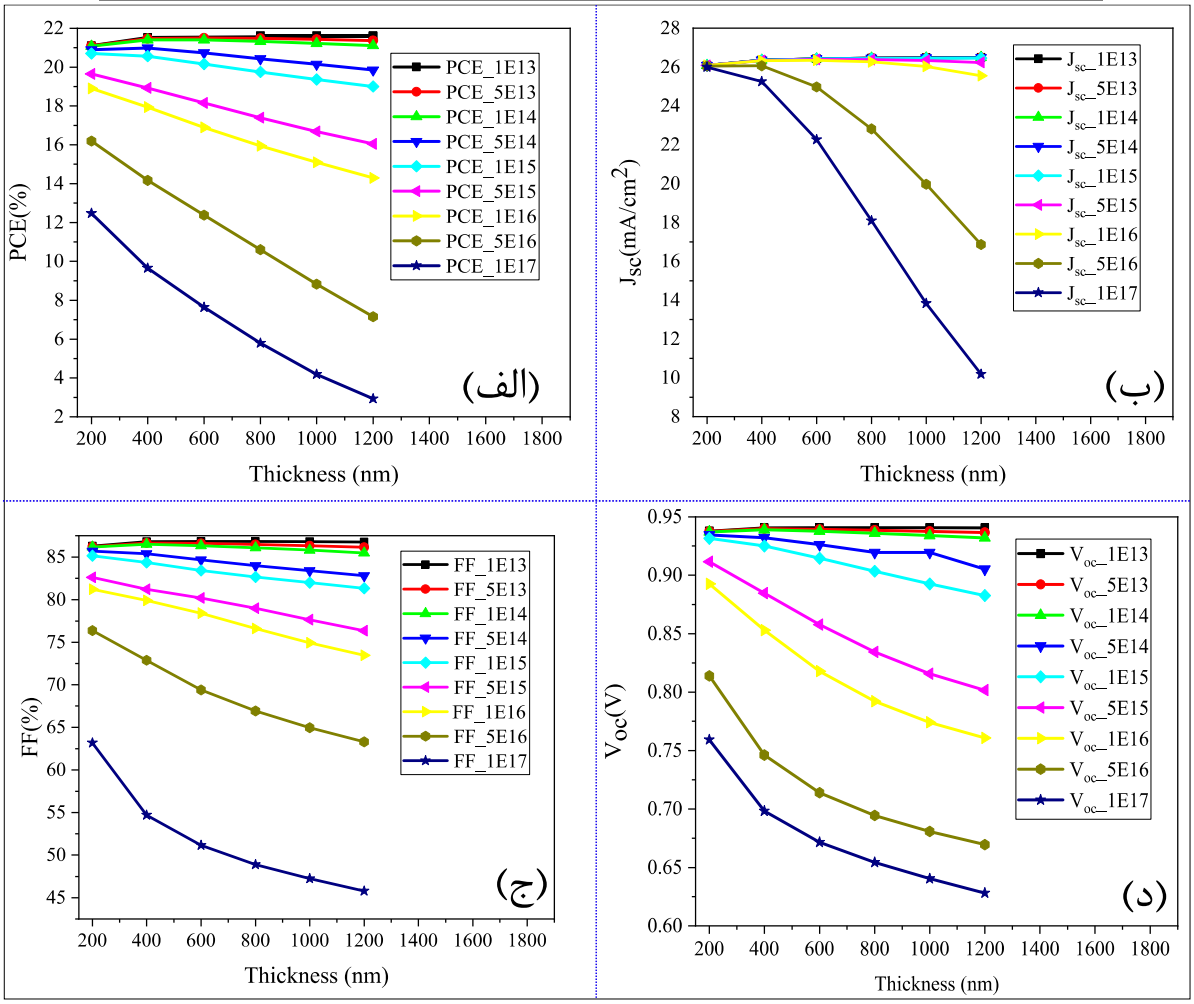
در فصل مشترک لایه انتقال دهنده الکترون/پروسکایت، نقص‌ها را به صورت پذیرنده و توزیع گاوسی در نزدیک بالای E_v تعریف می‌شود. سپس چگالی نقص‌ها از $۱۰^{۱۱} \times ۱$ تا $۱۰^{۱۳} \times ۲$ (cm^{-3}) تغییر داده می‌شوند تا اثر آن روی پارامترهای سلول خورشیدی مشاهده شود. در جدول ۲ مقدار پارامترهای مختلف سلول خورشیدی به ازای افزایش چگالی نقص‌ها در فصل مشترک ETL/پروسکایت دیده می‌شود. با توجه به **Error! Reference source not found.** جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز با افزایش چگالی نقص فصل مشترک تغییرات خیلی کمی دارند. اما با افزایش چگالی نقص و ناخالصی در فصل مشترک، جمع‌آوری بار در فصل مشترک افزایش می‌یابد که این امر موجب افزایش خازن موجود بین ETL/پروسکایت و به طبع آن کاهش رسانایی می‌شود پس درنتیجه PCE و FF به شدت کاهش می‌یابند.

در شکل ۶ نمودار چگالی جریان برحسب ولتاژ برای مقادیر مختلف چگالی نقص در فصل مشترک پروسکایت/ETL رسم شده است که در این شکل هم دیده می‌شود با افزایش چگالی نقص مقادیر ولتاژ مدار و جریان اتصال کوتاه تغییر کمی را تجربه کرده‌اند و داده‌های در **Error! Reference source not found.** را تایید می‌کنند. با افزایش ناخالصی در فصل مشترک، میزان خازن افزایش پیدا می‌کند. نوار پتانسیل مسطح در فصل مشترک، پارامتر مهمی در طراحی سلول خورشیدی است. هرچه نوار پتانسیل مسطح‌تر باشد، انتقال حامل‌های بار در فصل مشترک را آسان‌تر می‌کند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

جدول ۲ . نتایج شبیه‌سازی به ازای مقادیر مختلف چگالی نقص در فصل مشترک ETL/پروسکایت.

N_t	PCE(%)	FF(%)	V_{oc}(V)	J_{sc}(mA/cm^2)
۱.۰۰E+۱۱	۲۰/۹۸	۸۴/۶۸	۰/۹۴	۲۶/۳۵۳۶۴
۱.۰۰E+۱۲	۲۰/۹۸	۸۴/۶۷	۰/۹۴	۲۶/۳۵۳۶۵
۱.۰۰E+۱۳	۲۰/۹۱	۸۴/۵۱	۰/۹۳۹۱	۲۶/۳۵۳
۲.۰۰E+۱۳	۱۷/۸۶	۷۲/۸۵	۰/۹۳۰۲	۲۶/۳۵۸۳۸

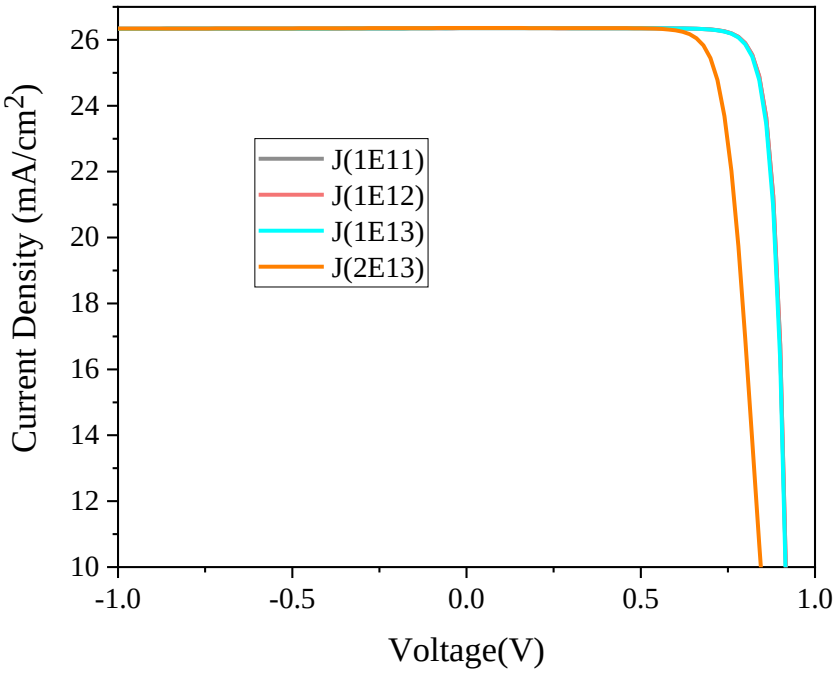


شکل ۵ . تغییرات پارامترهای الف) PCE ب) J_{sc} ج) FF د) V_{oc} نسبت به تغییرات ضخامت لایه جاذب پروسکایت برای تراکم نقص‌های مختلف.

$$\frac{1}{C^2} = \left[\frac{2}{q\varepsilon_0\varepsilon_s N_A A^2}\right]\left[-V_{app} + V_{Fb} - \frac{K_B T}{q}\right] \qquad (۵)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

در رابطه‌ی ۵، q بار حامل، ε_s ضریب گذردهی نیمه‌هادی، ε_0 ضریب گذردهی خلا، N_A چگالی پذیرنده، V_{Fb} پتانسیل نوار مسطح، K_B ثابت بولتزمن و T دما می‌باشد. با توجه فرمول ۵ هرچه میزان چگالی نقص در فصل مشترک افزایش پیدا کند، مقدار $\frac{1}{C^2}$ کاهش یا به عبارت دیگر خازن افزایش پیدا می‌کند. کاهش $\frac{1}{C^2}$ به این معناست که میزان رسانایی لایه فصل مشترک کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۶ . نمودار چگالی جریان برحسب ولتاژ برای مقادیر مختلف چگالی نقص در فصل مشترک

۳.٤. بررسی اثر طول انتشار[1] حامل‌ها بر پارامترهای عملکردی سلول خورشیدی

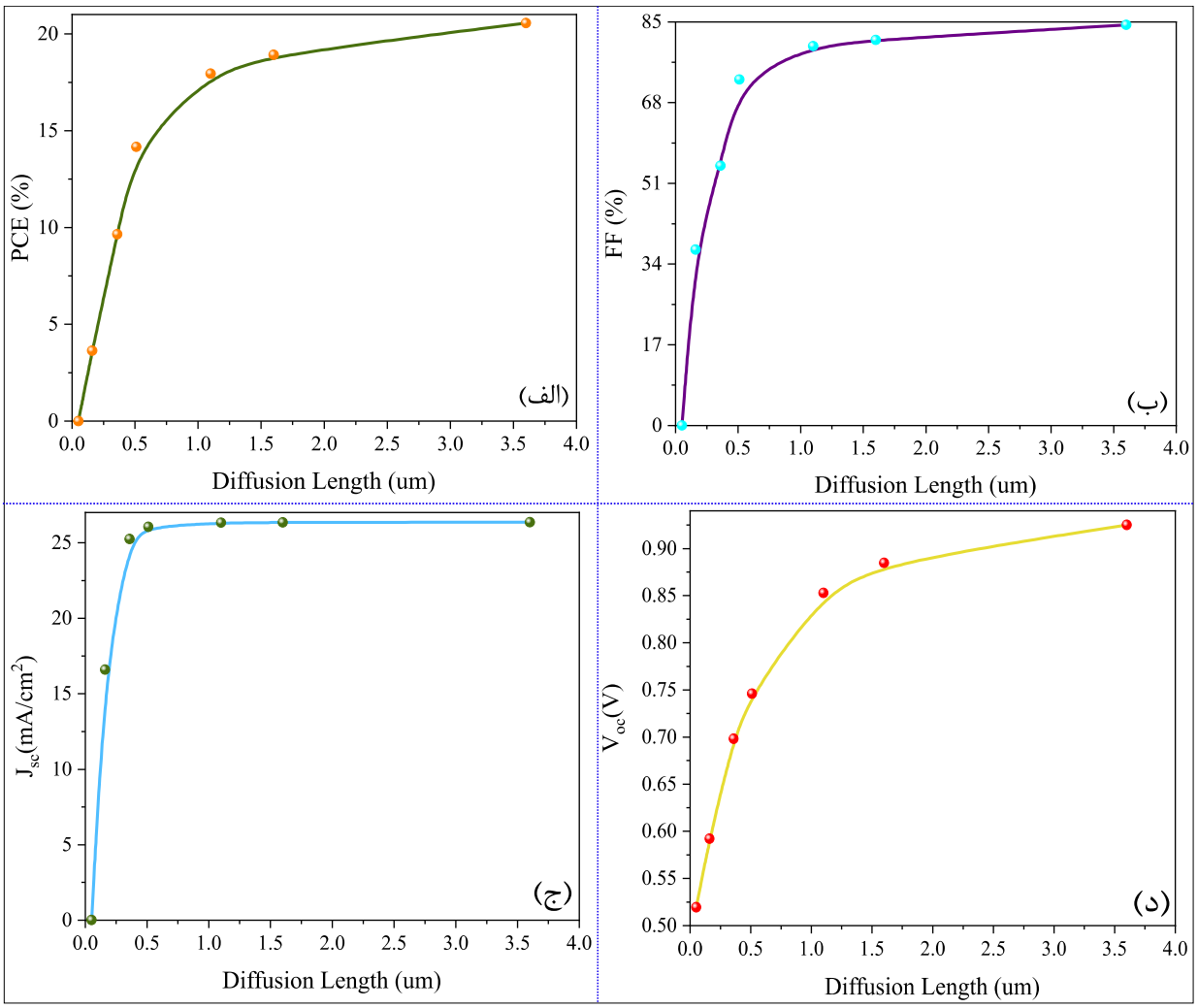
انتظار می‌رود که با بهبود فرآیند رشد لایه‌های پروسکایتی با grainهای بزرگ، کارایی دستگاه افزایش می‌یابد. grainهای بزرگ در واقع منجر به طول انتشار طولانی می‌شوند، که افزایش طول انتشار می‌تواند منجر به راندمان بالا شود. در شکل ۷ پارامترهای سلول خورشیدی پروسکایتی تابعی از طول انتشار حامل (L) لایه جاذب پروسکایت رسم شده است. L از ۰/۰۵۱ تا ۳/۶ میکرومتر با تغییر N_t لایه پروسکایت از ۱×۱۰^{۱۵} تا ۵×۱۰^{۱۸} (cm^{-3}) تغییر یافته است. دیده می‌شود همه پارامترهای دستگاه به L وابسته هستند و روند منحنی تقریبا یکسانی دارند. در شکل ۷–الف تغییرات PCE برحسب L آمده است که دیده می‌شود با افزایش مقدار L بازدهی سلول افزایش و از یک جایی به بعد این میزان افزایش کمتر شده و تقریبا به سمت اشباع شدن حرکت می‌کند. همین روند در شکل ۷–ب و شکل ۷–د به ترتیب برای FF و V_{oc}دیده می‌شود. در شکل ۷–ج تغییرات J_{sc} برحسب L آورده شده است که دیده می‌شود از L برابر ۰/۵ میکرومتر به بعد اشباع شده و تا حدودی مقادیر ثابتی دارد.

٤. نتیجه گیری

ابتدا پارامترهای سلول خورشیدی با لایه جاذب پروسکایت $Cs_{0.05}(FA_{0.87}MA_{0.13})_{0.95}Pb(I_{0.83}Br_{0.17})_3$ با استفاده از پروژه‌های شبیه سازی و تجربی دیگر بدست آمد و ساختار موردنظر در نرم‌افزار SCAPS شبیه‌سازی گردید و نمودار باند، چگالی جریان برحسب ولتاژ، بازده کوانتومی و نایکوئیست برای سلول رسم و بررسی شد. با افزایش چگالی نقص‌های لایه جاذب پروسکایت، پارامترهای عملکردی سلول خورشیدی مثل

[1] Diffusion Length

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



شکل ۷ . بررسی اثر طول انتشارهای مختلف حامل در لایه پروسکایت بر پارامترهای عملکردی سلول خورشیدی الف) PCE ب) FF ج) J_{sc} د) V_{oc}.

ضریب پرشدگی (FF)، بازدهی و ولتاژ مدار باز به شدت کاهش پیدا کرده‌اند ولی چگالی جریان کاهش خیلی کمی تجربه کرد که می‌توان آن‌را ثابت در نظر گرفت. برای بررسی اثر ضخامت لایه جاذب پروسکایت در چگالی نقص‌های مختلف بر روی عملکرد سلول خورشیدی، ضخامت لایه جاذب پروسکایت از ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ نانومتر برای چگالی نقص‌های ۱×۱۰^{۱۳} تا ۱×۱۰^{۱۷} (cm^{-3}) تغییر یافت.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی، مشاهده شد که برای چگالی‌های پایین نقص که منجر به طول نفوذ بزرگتری می‌شوند، با زیاد کردن ضخامت لایه جاذب پروسکایت پارامترهای عملکردی سلول خورشیدی تقریبا ثابت مانده و افزایش خیلی کمی را تجربه کرده‌اند. اما با زیاد شدن چگالی نقص‌ها که منجر به کوچک شدن طول نفوذ حامل‌ها می‌شوند، با افزایش ضخامت لایه جاذب پارامترهای عملکردی سلول خورشیدی کاهش یافته‌اند. در ادامه مسیر، اثر چگالی نقص‌های فصل مشترک بین ETL و لایه جاذب پروسکایت بر عملکرد سلول خورشیدی و خازن موجود در فصل مشترک بررسی شد. چگالی نقص‌های پذیرنده در فصل مشترک از ۱×۱۰^{۱۱} تا ۲×۱۰^{۱۳} (cm^{-3}) تغییر یافته‌اند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی با افزایش چگالی نقص‌ها در فصل مشترک ETL/پروسکایت، V_{oc} و J_{sc} تقریبا ثابت مانده و به ترتیب برابر ۰/۹۴ ولت و ۲۶/۳۵۳ (mA/cm^2) بدست آمده‌اند. درحالی که منجر به کاهش بازدهی و ضریب پرشدگی به ترتیب از ۲۰/۹۸ تا ۱۷/۸۶ درصد و ۸۴/۶۸ تا ۷۵/۸۲ درصد شد. در نتیجه ۱×۱۰^{۱۲} (cm^{-3}) حالت بهینه‌ای برای چگالی نقص فصل مشترک ETL/پروسکایت در نظر گرفته شد. در نهایت هم طول انتشار حامل از ۰/۰۵۱ تا ۳/۶ میکرومتر تغییر یافت و اثر آن در لایه جاذب پروسکایت بر عملکرد سلول خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت که به طور کلی با افزایش طول انتشار حامل، پارامترهای عملکردی سلول خورشیدی پروسکایتی افزایش پیدا کرده‌اند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

منابع

[۱] ح. عبدی, بررسی و ساخت سلول‌های خورشیدی نانوساختار پروسکایتی. دانشگاه تهران, ۱۳۹۸.

[۲] ر. تیموری, مبانی مدل‌سازی سلول‌های خورشیدی. جهاد دانشگاهی تهران, ۱۴۰۰.

[3] Wu, T., Qin, Z., Wang, Y., Wu, Y., Chen, W., Zhang, S., Cai, M., Dai, S., Zhang, J., & Liu, J. (2021). The main progress of perovskite solar cells in 2020–2021. *Nano-Micro Letters*, *13*(1), 1–18.

[4] Asim, N., Sopian, K., Ahmadi, S., Saeedfar, K., Alghoul, M. A., Saadatian, O., & Zaidi, S. H. (2012). A review on the role of materials science in solar cells. در *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (16, Issue 8, 5834–5847). https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.004

[5] Burgelman, M., Nollet, P., & Degrave, S. (2000). Modelling polycrystalline semiconductor solar cells. *Thin Solid Films*, *361*, 527–532.

[6] Burgelman, M., Verschraegen, J., Degrave, S., & Nollet, P. (2004). Modeling thin-film PV devices. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, *12*(2-3), 143–153.

[7] Chen, B., Rudd, P. N., Yang, S., Yuan, Y., & Huang, J. (2019). Imperfections and their passivation in halide perovskite solar cells. *Chemical Society Reviews*, *48*(14), 3842–3867.

[8] Chen, J., & Park, N. (2019). Causes and solutions of recombination in perovskite solar cells. *Advanced Materials*, *31*(47), 1803019.

[9] Chen, M., Ju, M.-G., Garces, H. F., Carl, A. D., Ono, L. K., Hawash, Z., Zhang, Y., Shen, T., Qi, Y., & Grimm, R. L. (2019). Highly stable and efficient all-inorganic lead-free perovskite solar cells with native-oxide passivation. *Nature Communications*, *10*(1), 1–8.

[10] Chowdhury, M. S., Shahahmadi, S. A., Chelvanathan, P., Tiong, S. K., Amin, N., Techato, K., Nuthammachot, N., Chowdhury, T., & Suklueng, M. (2020). Effect of deep-level defect density of the absorber layer and n/i interface in perovskite solar cells by SCAPS-1D. *Results in Physics*, *16*, 102839.

[11] Han, T., Tan, S., Xue, J., Meng, L., Lee, J., & Yang, Y. (2019). Interface and defect engineering for metal halide perovskite optoelectronic devices. *Advanced Materials*, *31*(47), 1803515.

[12] Jeon, N. J., Noh, J. H., Yang, W. S., Kim, Y. C., Ryu, S., Seo, J., & Seok, S. il. (2015). Compositional engineering of perovskite materials for high-performance solar cells. *Nature*, *517*(7535), 476–480. https://doi.org/10.1038/nature14133

[13] Joshi, P. H., Zhang, L., Hossain, I. M., Abbas, H. A., Kottokkaran, R., Nehra, S. P., Dhaka, M., Noack, M., & Dalal, V. L. (2016). The physics of photon induced degradation of perovskite solar cells. *AIP Advances*, *6*(11), 115114.

[14] Kearney, K., Seo, G., Matsushima, T., Adachi, C., Ertekin, E., & Rockett, A. (2018). Computational analysis of the interplay between deep level traps and perovskite solar cell efficiency. *Journal of the American Chemical Society*, *140*(46), 15655–15660.

[15] Kim, H.-S., Lee, C.-R., Im, J.-H., Lee, K.-B., Moehl, T., Marchioro, A., Moon, S.-J., Humphry-Baker, R., Yum, J.-H., & Moser, J. E. (2012). Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9%. *Scientific Reports*, *2*(1), 1–7.

[16] Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. (2009). Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *Journal of the American Chemical Society*, *131*(17), 6050–6051. https://doi.org/10.1021/ja809598r

[17] Lee, M. M., Teuscher, J., Miyasaka, T., Murakami, T. N., & Snaith, H. J. (2012). Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites. *Science*, *338*(6107), 643–647.

[18] Liu, M., Johnston, M. B., & Snaith, H. J. (2013). Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition. *Nature*, *501*(7467), 395–398. https://doi.org/10.1038/nature12509

[19] Mahjabin, S., Haque, M. M., Sobayel, K., Jamal, M. S., Islam, M. A., Selvanathan, V., Assaifan, A. K., Alharbi, H. F., Sopian, K., & Amin, N. (2020). Perceiving of defect tolerance in perovskite absorber layer for efficient perovskite solar cell. *IEEE Access*, *8*, 106346–106353.

[20] Malyukov, S. P., Sayenko, A. v, & Ivanova, A. v. (2016). Numerical modeling of perovskite solar cells with a planar structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *151*(1), 012033.

[21] Minbashi, M., Ghobadi, A., Ehsani, M. H., Rezagholipour Dizaji, H., & Memarian, N. (2018). Simulation of high efficiency SnS-based solar cells with SCAPS. *Solar Energy*, *176*, 520–525. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.058

[22] Otoufi, M. K., Ranjbar, M., Kermanpur, A., Taghavinia, N., Minbashi, M., Forouzandeh, M., & Ebadi, F. (2020). Enhanced performance of planar perovskite solar cells using TiO2/SnO2 and TiO2/WO3 bilayer structures: Roles of the interfacial layers. *Solar Energy*, *208*, 697–707. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.035

[23] Pellet, N., Gao, P., Gregori, G., Yang, T.-Y., Nazeeruddin, M. K., Maier, J., & Grätzel, M. (2014). Mixed-Organic-Cation Perovskite Photovoltaics for Enhanced Solar-Light Harvesting. *Angewandte Chemie*, *126*(12), 3215–3221. https://doi.org/10.1002/ange.201309361

[24] Ran, C., Xu, J., Gao, W., Huang, C., & Dou, S. (2018). Defects in metal triiodide perovskite materials towards high-performance solar cells: origin, impact, characterization, and engineering. *Chemical Society Reviews*, *47*(12), 4581–4610.

[25] Sha, W. E. I., Ren, X., Chen, L., & Choy, W. C. H. (2015). The efficiency limit of CH3NH3PbI3 perovskite solar cells. *Applied Physics Letters*, *106*(22), 221104.

[26] Smith, I. C., Hoke, E. T., Solis-Ibarra, D., McGehee, M. D., & Karunadasa, H. I. (2014). A Layered Hybrid Perovskite Solar-Cell Absorber with Enhanced Moisture Stability. *Angewandte Chemie - International Edition*, *53*(42), 11232–11235. https://doi.org/10.1002/anie.201406466

[27] Snaith, H. J. (2013). Perovskites: the emergence of a new era for low-cost, high-efficiency solar cells. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, *4*(21), 3623–3630.

[28] Sum, T. C., & Mathews, N. (2014). Advancements in perovskite solar cells: photophysics behind the photovoltaics. *Energy & Environmental Science*, *7*(8), 2518–2534.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

[29] Turren-Cruz, S. H., Saliba, M., Mayer, M. T., Juárez-Santiesteban, H., Mathew, X., Nienhaus, L., Tress, W., Erodici, M. P., Sher, M. J., Bawendi, M. G., Grätzel, M., Abate, A., Hagfeldt, A., & Correa-Baena, J. P. (2018). Enhanced charge carrier mobility and lifetime suppress hysteresis and improve efficiency in planar perovskite solar cells. *Energy and Environmental Science*, *11*(1), 78–86. https://doi.org/10.1039/c7ee02901b

[30] Wang, H., Guerrero, A., Bou, A., Al-Mayouf, A. M., & Bisquert, J. (2019). Kinetic and material properties of interfaces governing slow response and long timescale phenomena in perovskite solar cells. *Energy & Environmental Science*, *12*(7), 2054–2079.

[31] Wang, S., Sakurai, T., Wen, W., & Qi, Y. (2018). Energy level alignment at interfaces in metal halide perovskite solar cells. *Advanced Materials Interfaces*, *5*(22), 1800260.

[32] Wang, X., Zhang, T., Lou, Y., & Zhao, Y. (2019). All-inorganic lead-free perovskites for optoelectronic applications. *Materials Chemistry Frontiers*, *3*(3), 365–375.

[33] Yang, W. S., Park, B.-W., Jung, E. H., Jeon, N. J., Kim, Y. C., Lee, D. U., Shin, S. S., Seo, J., Kim, E. K., & Noh, J. H. (2017). Iodide management in formamidinium-lead-halide–based perovskite layers for efficient solar cells. *Science*, *356*(6345), 1376–1379.

[34] Zhang, B., Zhang, M., Pang, S., Huang, C., Zhou, Z., Wang, D., Wang, N., & Cui, G. (2016). Carrier transport in CH3NH3PbI3 films with different thickness for perovskite solar cells. *Advanced Materials Interfaces*, *3*(17), 1600327.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]