

Improvement of optical characteristics of perovskite solar cell using rutile titanium dioxide three-dimensional photonic crystal structure

N. Fatehi, S. Olyaei*, M. Seifouri, F. Parandin

Professor, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

(Received: 12/03/2024 revised: 22/06/2024 Accepted: 10/07/2024 published: 24/07/2024)

Abstract

Perovskite solar cells have attracted a lot of attention due to their good optical and electrical performance as well as their simple manufacturing process. Photonic crystals have a wide range of applications in solar cells due to their increased light absorption and photonic bandgap. In this study, a perovskite solar cell based on a three-dimensional photonic crystal nanostructured rutile titanium dioxide is designed, which has a better performance compared to many of the solar cell structures proposed so far. By placing a three-dimensional photonic crystal nanostructured rutile titanium dioxide in the active layer of the perovskite solar cell and selecting the proper radius and lattice constant, the absorption rate is increased and a short-circuit current of 27.12 mA/cm² was obtained.

Keywords: Perovskite solar cell, photonic crystal, short-circuit current density, rutile titanium dioxide.

*Corresponding author E-mail: s_olyaei@sru.ac.ir

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

© Authors





علمی - پژوهشی

بهبود مشخصه‌های نوری سلول خورشیدی پروسکایت با استفاده از ساختار کریستال فوتونی

سه‌بعدی روتایل تیتانیوم دی‌اکسید

نارین فاتحی^۱، سعید علیائی^{۲*}، محمود صیفوری^۳، فریبرز پرن‌دین^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استاد، ۳- دانشیار، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران، ایران. ۴- دانشیار، گروه مهندسی برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

(دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۰، انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳)



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

سلول‌های خورشیدی پروسکایت به دلیل عملکرد نوری و الکتریکی خوب و فرآیند ساخت ساده، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. کریستال‌های فوتونی نیز به واسطه افزایش جذب نوری و شکاف باند فوتونی، کاربرد گسترده‌ای در سلول‌های خورشیدی دارند. در این تحقیق یک سلول خورشیدی پروسکایتی مبتنی بر کریستال فوتونی طراحی شده است که نسبت به بسیاری از ساختارهای سلول خورشیدی که تاکنون پیشنهاد شده‌اند عملکرد بهتری داشته است. با قراردادن کریستال فوتونی سه‌بعدی روتایل تیتانیوم دی‌اکسید در لایه فعال سلول خورشیدی پروسکایت و با انتخاب مقادیر مناسب شعاع و ثابت شبکه، میزان جذب افزایش‌یافته و چگالی جریان اتصال کوتاه $12/27 \text{ mA/cm}$ حاصل شده است.

کلیدواژه‌ها: سلول خورشیدی پروسکایت، کریستال فوتونی، چگالی جریان اتصال کوتاه، روتایل تیتانیوم دی‌اکسید.

۱- مقدمه

۳/۸٪ معرفی شد [۹]. تا به حال بیشترین بازدهی تبدیل توان در سلول‌های خورشیدی پروسکایت ۲۹/۱۵٪ گزارش شده است که توسط تیم تحقیقاتی کیوتو در ژاپن در سال ۲۰۲۱ با استفاده از ساختار سلول خورشیدی چند لایه پروسکایت با مواد پیشرفته مانند پروسکایت فلزات سنگین و مواد بهبود یافته انتقال‌دهنده بار به‌دست آمد [۱۰]. به طور معمول، ساختار یک سلول خورشیدی پروسکایت به این صورت است: الکتروود رسانای شفاف / لایه انتقال‌دهنده الکترون / لایه فعال / لایه انتقال‌دهنده حفره / الکتروود فلزی [۱۱].

به منظور افزایش میزان جذب و بازدهی سلول‌های خورشیدی پروسکایت، از روش‌های مختلفی از جمله خواص پلاسمونی [۱۲]–[۱۶]، نانومپله‌های فلزی [۱۷]، کریستال‌های فوتونی [۱۸]–[۲۱] استفاده کرده‌اند. با استفاده از کریستال‌های فوتونی می‌توان نور را مدیریت کرد [۲۲]، [۲۳]. کریستال‌های

بازدهی بالا در ترکیب با هزینه کم مواد و فرآیند ساخت آسان از نکات فروش سلول خورشیدی پروسکایت نسبت به سیلیکون تجاری یا سایر سلول‌های خورشیدی آلی و معدنی است [۱]–[۴]. پروسکایت با استوکیومتری ABX_3 توصیف می‌شود [۵] و می‌تواند ساختار بلوری متفاوتی داشته باشد [۶]. پروسکایت انواع مختلفی دارد که می‌توان از متیل امونیوم لید دیدید^۲ [۱]، فرمامیدینیوم لید دیدید^۳ [۷]، سزیم لید دیدید^۴ [۸] نام برد. اولین ساختار سلول خورشیدی پروسکایت توسط میاساکا با بازدهی

s_olyaee@sru.ac.ir

* رایانامه نویسنده مسئول:

² MAPbI

³ FAPbI

⁴ CsPbI

به ساختار بدون کریستال فوتونی تا ۱/۱۶٪ افزایش جذب نور داشته است [۲۹]. در سال ۲۰۲۳، ساختار کریستال فوتونی با دوره تناوب ۴۵۰ نانومتر ساخته شده و در لایه انتقال دهنده الکترون به کار رفته است و با استفاده از مکانیزم مدیریت و ذخیره نور، نتایج الکتریکی به دست آمده نسبت به ساختار مسطح بهبود یافته و بازدهی تبدیل توان تا ۲٪ افزایش می‌یابد [۳۰].

در این تحقیق از یک ساختار کریستال فوتونی سه‌بعدی کره‌ای جهت بهبود جذب نوری در لایه جاذب سلول خورشیدی پروسکایتی استفاده شده است. با تغییر شعاع و ثابت شبکه کریستال فوتونی ساختار مورد نظر بهبود یافته و میزان جذب افزایش می‌یابد؛ بنابراین، تولید زوج الکترون حفره بیشتری را شاهد خواهیم بود و در نتیجه چگالی جریان اتصال کوتاه افزایش می‌یابد.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق از ماژول FDTD به منظور تحلیل نوری ساختار استفاده شده است. ساختار کریستال فوتونی دوبعدی استوانه‌ای دارای ارتفاعی برابر با ارتفاع لایه جاذب است. با افزایش ارتفاع لایه جاذب و استوانه‌های کریستال فوتونی، جذب افزایش می‌یابد؛ اما از طرفی میزان باز ترکیب نیز بیشتر می‌شود که مطلوب نیست؛ بنابراین، میزان ارتفاع استوانه‌ها ۵۰۰ نانومتر و ساختار شبکه کریستال فوتونی شش ضلعی در نظر گرفته می‌شود. تمام خصوصیات مواد به کار برده شده در سلول خورشیدی پیشنهادی در جدول (۱) آمده است.

از FTO به عنوان الکترود رسانای شفاف، از TiO_2 به عنوان لایه انتقال‌دهنده الکترون یا لایه مسدودکننده حفره‌ها، از SpiroOMeTAD به عنوان لایه انتقال‌دهنده حفره یا لایه مسدودکننده الکترون‌ها و از Al به عنوان الکترود پشتی استفاده شده است که البته نقش بازتابگر را نیز دارد. به این صورت که فوتون‌هایی که از ساختار عبور کرده و به این لایه رسیدند، به داخل ساختار بازتاب می‌شوند و شانس دوباره‌ای جهت جذب شدن پیدا می‌کنند. در نهایت نیز از ماده $CH_3NH_3PbI_3$ به عنوان لایه جاذب استفاده شده است.

در شکل (۱) تصویری از سلول خورشیدی پروسکایت مبتنی بر ساختار کریستال فوتونی دوبعدی پیشنهادی رسم شده است. حضور متناوب کره‌های روتایل تیتانیوم دی‌اکسید در بستر پروسکایت، یک ساختار کریستال فوتونی تشکیل می‌دهد. در شکل (۲)، میزان جذب در طول موج‌های مختلف با ضخامت‌های مختلف مواد مورد استفاده در سلول خورشیدی نشان داده شده است.

شکل (۲) طیف جذبی مواد TiO_2 ، FTO، SpiroOMeTAD و perovskite را برای ضخامت‌های مختلف نشان می‌دهد. هدف از

فوتونی موادی هستند که ضرایب شکست آن‌ها به‌طور متناوب تغییر می‌کند [۲۴]. بارزترین ویژگی کریستال‌های فوتونی، شکاف باند فوتونی است که نور در این محدوده اجازه انتشار ندارد [۲۵]. در لبه شکاف باند فوتونی، سرعت گروهی فوتون‌ها به صفر نزدیک می‌شود، که می‌تواند یک موج ایستاده را تشکیل دهد و اثر "فوتون آهسته" ایجاد کند. با استفاده از این اثر می‌توان برهم‌کنش بین نور و ماده را افزایش داد [۲۶]. با افزایش برهم‌کنش نور و ماده، نور مدت زمان بیشتری در ساختار، ساکن خواهد ماند و از این طریق میزان جذب در لایه فعال افزایش می‌یابد.

در سال ۲۰۱۹، استفاده از کریستال فوتونی نیم‌کره‌ای سلول خورشیدی پروسکایت جهت بهبود مشخصه‌های نوری پیشنهاد شد. با استفاده از چاپ نانوماده‌ی متخلخل تیتانیوم‌دی‌اکسید با اندازه‌ی کریستال فوتونی که توسط ذرات پلی‌استری کلونیدی کنترل می‌شود، ارائه شد. نتایج شبیه‌سازی، نشان می‌دهد که کریستال فوتونی باعث می‌شود بازدهی سلول ۱۵/۲٪ شود [۲۷]. در سال ۲۰۱۹، اثر اضافه کردن تعداد لایه‌های مختلف ساختار کریستال فوتونی به لایه فعال به‌صورت عددی بررسی شد و به نتایج مثبتی دست یافتند که ضریب افزایش فوتونی تا ۶/۴٪ افزایش پیدا کرد. در این پژوهش، سازوکار فیزیکی که پشت این افزایش جذب است، تحریک موده‌های شبه‌هدایت شده در داخل ساختارهای فوتونی از طریق تحریک تشدیدهای فانو است [۱۹]. در سال ۲۰۲۰، از دو لایه انتقال‌دهنده الکترون جدید برای سلول خورشیدی پروسکایت ساختار کریستال فوتونی دوبعدی معرفی شد که توانایی انتقال بار را بهبود بخشیدند و بازدهی را از ۱۰/۲٪ به ۱۶/۸٪ بهبود دادند [۱۸]. همچنین در این سال، مطالعه‌ای بر روی تاثیر مثبت طراحی لایه فعال سلول خورشیدی پروسکایتی با استفاده از یک قسمت یکنواخت و یک قسمت اوپال انجام شد. در این پژوهش از یک رویکرد الگوریتم ژنتیک برای تعیین ترکیب بهینه استفاده کردند. ترکیب بهینه، بازده کوانتوم داخلی ۹۸/۱٪ را فراهم می‌کند، که تقریباً ۲٪ بیشتر از ساختار لایه فعال بدون آرایه کریستال فوتونی است [۲۸].

در سال ۲۰۲۲، از کریستال‌های فوتونی در جهت مدیریت نور در سلول خورشیدی پروسکایت استفاده شده است. به این صورت که از فوتون‌دهای $PbI_2NH_3CH_3$ اوپال معکوس سه‌بعدی در سلول‌های خورشیدی پروسکایت استفاده کردند. با تغییر اندازه منافذ و ضخامت لایه‌ی کریستال فوتونی به ساختار بهینه دست یافتند. این ساختار دارای قطر حدود ۵۰۰ نانومتر است که نسبت

¹ Slow photon

antisymmetric و در راستای y به صورت symmetric انتخاب شده است. اگرچه می‌توان در جهت x و y، شرایط مرزی را به صورت متناوب انتخاب کرد؛ اما زمان شبیه‌سازی چندین برابر بیشتر می‌شود و نیاز به محاسبات بیشتری وجود خواهد داشت. در نهایت در راستای z شرایط مرزی به صورت لایه کاملاً جذب^۱ در نظر گرفته می‌شود. بدیهی است نوری که به این لایه وارد می‌شود به هیچ‌عنوان بازتاب نشده و یا عبور نمی‌کند؛ بلکه تمام نور، جذب این لایه می‌شود.

پس از اعمال شرایط مرزی مناسب، باید منبع تابش نور را اعمال کرد. نور فرودی بر اساس طیف خورشیدی استاندارد AM1.5G در نرم‌افزار تعریف می‌شود و یک منبع موج صفحه‌ای تابش عرضی^۲ در محدوده طول موج ۳۰۰ الی ۱۱۰۰ نانومتر قرار داده می‌شود. ولتاژ مدار باز یک سلول خورشیدی طبق رابطه (۱) تعریف می‌شود و زمانی اتفاق می‌افتد که جریان صفر معادل صفر باشد:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (1)$$

که در آن T، q، k، I_L و I_0 به ترتیب دمای مطلق، بار الکترون، ثابت بولتزمن، جریان اشباع و جریان تولید شده حاصل از نور هستند. جریان اتصال کوتاه یک سلول خورشیدی را می‌توان به صورت رابطه (۲) تعیین کرد و زمانی اتفاق می‌افتد که ولتاژ صفر باشد:

$$J_{sc} = qG(L_n + L_p) \quad (2)$$

که در آن L_p طول انتشار حفره، L_n طول انتشار الکترون و G نرخ تولید است. در نقطه‌ای که بیشترین میزان جریان و ولتاژ را داریم، می‌توان ادعا کرد که توان بیشینه اتفاق افتاده است و توان بیشینه از حاصل ضرب این دو مولفه به دست می‌آید. از تقسیم کردن میزان توان بیشینه بر حاصل ضرب جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز، می‌توان به یکی از مشخصه‌های سلول خورشیدی به نام ضریب پرشدگی دست یافت که طبق رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} J_{sc}} \quad (3)$$

برای محاسبه میزان بازدهی سلول خورشیدی می‌توان از رابطه (۴) استفاده کرد:

$$\eta = \frac{FF \times V_{oc} \times J_{sc}}{P_{AM1.5G}} \quad (4)$$

که در آن $p_{AM1.5G}$ توان نور فرودی از مدل طیف تابش خورشیدی AM1.5G در 100۲ cm/mW است [۲۷]-[۳۱].

این مقایسه، انتخاب مناسب‌ترین ضخامت جهت طراحی سلول خورشیدی پیشنهادی است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه‌ها، میزان جذب افزایش می‌یابد. با مقایسه میزان جذب لایه‌های مختلف درمی‌یابیم که میزان جذب در لایه پروسکایت در محدوده طول موج گسترده‌تری بسیار بیشتر از سایر لایه‌هاست و جاذب بودن پروسکایت در این شکل ثابت شده است. بهتر است که ضخامت لایه پروسکایت نسبت به سایر لایه‌ها بیشتر در نظر گرفته شود. البته در انتخاب میزان ضخامت لایه جاذب نیز باید حساسیت خاصی به خرج دهیم چون با افزایش ضخامت، شانس بازترکیب زوج الکترون-حفره در لایه فعال نیز افزایش داده می‌شود. مواد TiO_2 و SpiroOMeTAD چون دارای بخش موهومی در ضریب شکستشان هستند، بنابراین، خاصیت جذب دارند و این امر در شکل (۲) مشهود است که در طول موج‌های پایین این دو ماده خاصیت جذبی دارند. اما جذب این مواد در حدی نیست که بتوان از آن‌ها به‌عنوان لایه جاذب استفاده کرد. میزان جذب لایه FTO نیز گویای شفاف بودن این ماده است و انتخاب مناسبی به‌عنوان الکتروود رسانای شفاف است.

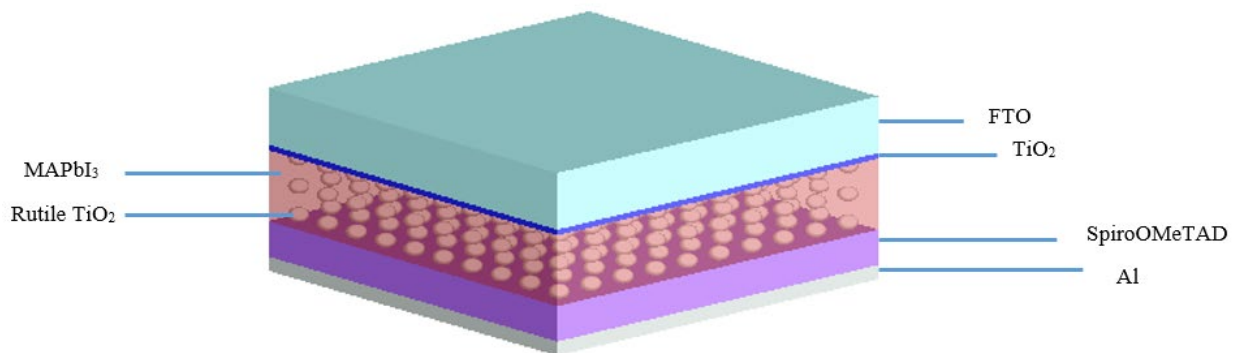
جدول (۱). ویژگی‌ها و ضخامت مواد سلول خورشیدی پروسکایت پیشنهادی

اندازه	مواد	لایه‌ها
۴۰۰ نانومتر	FTO	الکتروود رسانای شفاف
۴۰ نانومتر	TiO_2	انتقال‌دهنده الکترون
۵۰۰ نانومتر	$CH_3NH_3PbI_3$	پروسکایت
۲۵۰ نانومتر	Spiro-OMeTAD	انتقال‌دهنده حفره
۱۰۰ نانومتر	Al	الکتروود فلزی

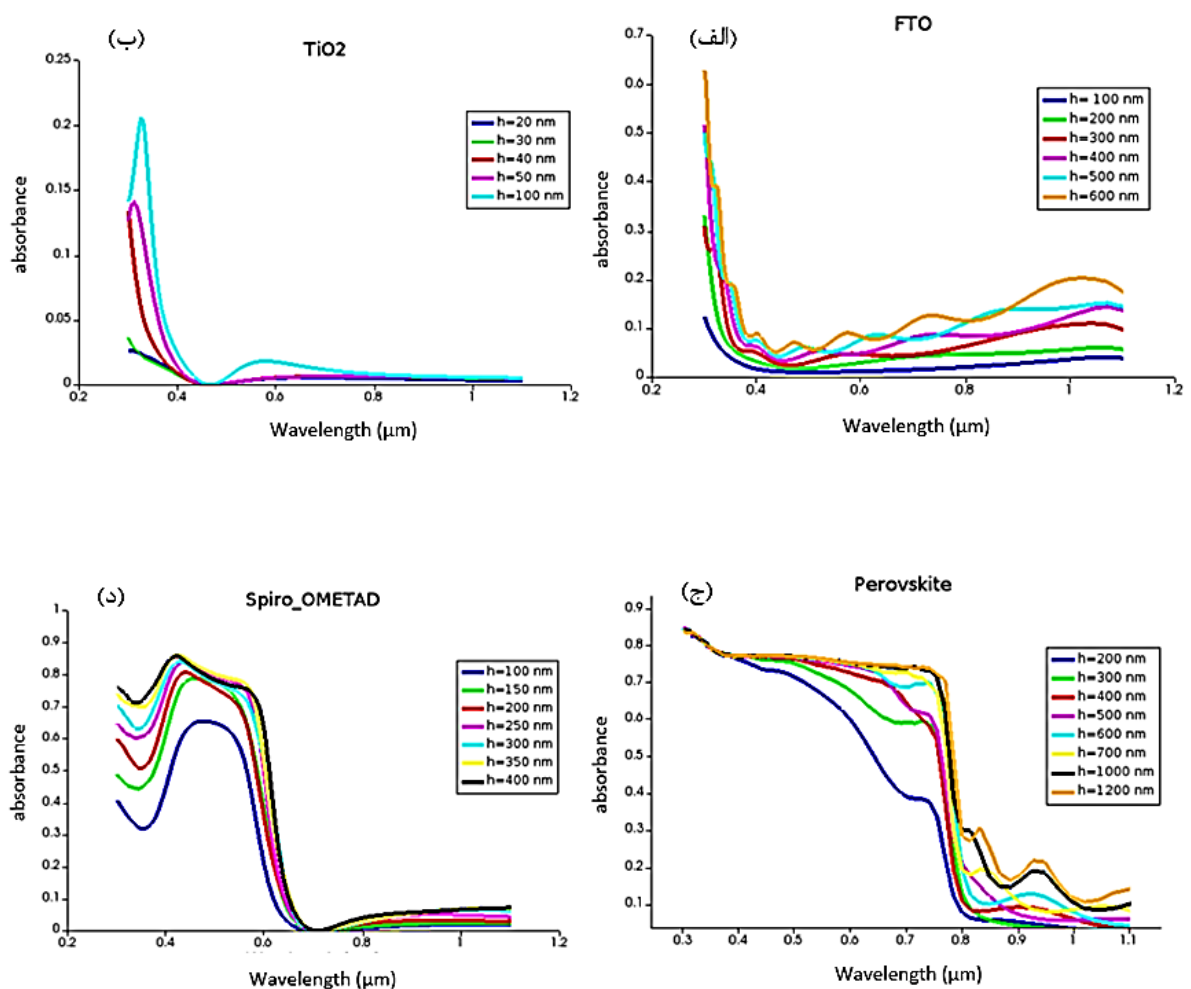
به‌منظور تحلیل نوری ساختار، از نرم‌افزار FDTD استفاده می‌شود که معادلات ماکسول را با بررسی ساختار موردنظر محاسبه می‌کند. پس از تعریف طرح‌واره ساختار موردنظر و ناحیه شبیه‌سازی، باید به تعیین شرایط مرزی پرداخت. این قسمت از شبیه‌سازی بسیار مهم است و در انتخاب شرایط مرزی باید نهایت دقت و حساسیت به کار برده شود. از آنجایی که حل معادلات ماکسول، زمان‌بر بوده و از طرفی در این تحقیق، ساختار به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی و تحلیل می‌شود بنابراین، برای پردازش آن‌ها به سیستمی مجهز به پردازنده قوی نیاز است و لازم است شرایط مرزی طوری انتخاب شود که ساختار را به طور متقارن تحلیل کند. از این رو شرایط مرزی در راستای x به صورت

^۱ Perfect matched layer (PML)

^۲ Transverse Electric (TE)



شکل (۱). طرح‌واره سلول خورشیدی مبتنی بر کریستال فوتونی پیشنهادی



شکل (۲). میزان جذب در ضخامت‌های مختلف لایه‌های سلول خورشیدی: (الف) FTO، (ب) TiO₂، (ج) Perovskite، (د) SpiroOMETAD

کریستال فوتونی پیشنهادی ارائه می‌شود. میزان جذب سلول خورشیدی در شعاع‌ها و ثابت شبکه‌های مختلف کریستال فوتونی در شکل (۳)، قابل مشاهده است. در شکل ۳ (الف) میزان جذب به‌عنوان تابعی از طول‌موج در طیف ۳۰۰ الی ۱۱۰۰ نانومتر در شعاع‌های متفاوت قابل مشاهده است. در این طیف طول‌موج با افزایش شعاع کره‌ها، میزان جذب افزایش می‌یابد. علت این امر این است که در ساختار کریستال فوتونی پیشنهادی، هر چه

۳- نتایج و بحث

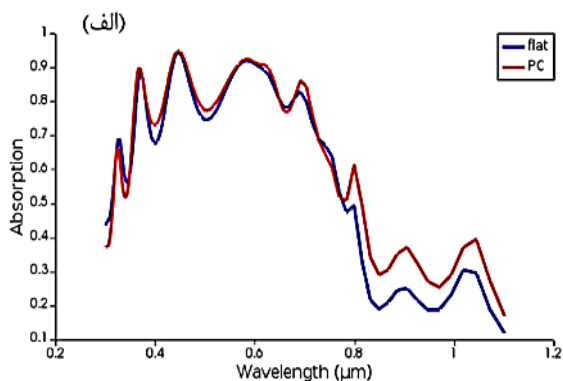
همان‌طور که اشاره شد، در ساختار پیشنهادی از ترکیب کریستال فوتونی سه‌بعدی کره‌ای تیتانیوم دی‌اکسید در لایه فعال سلول خورشیدی استفاده شده است. از این‌رو، جهت بهبود میزان جذب، شعاع‌ها و ثابت شبکه‌های مختلفی بررسی می‌شود و بهترین ترکیبی که بیشترین میزان جذب را دارد به‌عنوان ترکیب

پروسکایت مسطح به‌عنوان تابعی از طول موج در طیف ۳۰۰ الی ۱۱۰۰ نانومتر مقایسه کرده، واضح است که میزان جذب در سلول خورشیدی با حضور کریستال فوتونی افزایش یافته است. عملکرد بهینه در شعاع ۲۰ نانومتری و ثابت شبکه ۵۰ نانومتری به‌دست می‌آید. این افزایش جذب، می‌تواند به بهبود پارامترهای الکتریکی منجر شود. افزایش میزان جذب در فاصله ۸۰۰ الی ۱۱۰۰ نانومتر کاملاً مشهود است.

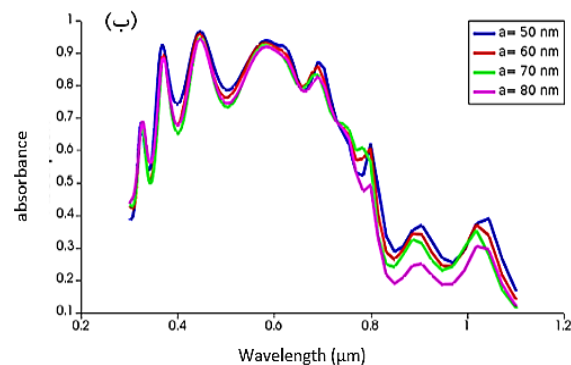
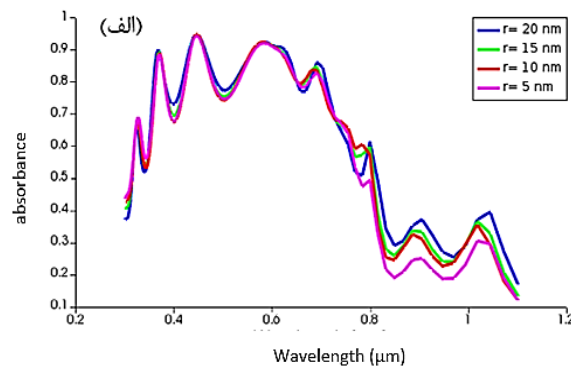
حضور کریستال فوتونی در لایه جذب، منجر به، به دام انداختن نور می‌شود و در نتیجه نور مدت‌زمان بیشتری در ساختار ساکن می‌شود و تولید زوج الکترون حفره افزایش می‌یابد؛ بنابراین، تعداد حامل بیشتری می‌تواند به اتصالات سلول خورشیدی برسند و در نهایت میزان جریان اتصال کوتاه و جذب افزایش می‌یابد. در شکل ۴ (ب)، مقایسهٔ میزان بازتاب در دو ساختار سلول خورشیدی که از طریق حل معادلات ماکسول به‌دست آمده، نمایش داده شده است. در ساختار با حضور کریستال فوتونی نسبت به ساختار مسطح، به‌واسطه جذب بیشتر و به دام افتادن نور، میزان نور بازتابی کمتر است؛ زیرا بخش زیادی از نور فرودی به‌محض وارد شدن به ساختار کریستال فوتونی، در لایه فعال به‌دام‌افتاده و امکان خارج شدن و بازتاب را نخواهد داشت.

جدول (۲). مقادیر شعاع و ثابت شبکه‌های مختلف کریستال فوتونی

شعاع (nm)	ثابت شبکه (nm)	جریان اتصال کوتاه (mA/cm ²)
سلول خورشیدی مسطح	سلول خورشیدی مسطح	۲۵/۱۱
۵	۵۰	۲۵/۱۱
۱۰		۲۵/۹۵
۱۵		۲۶/۳۶
۲۰		۲۷/۱۲
۲۰	۵۰	۲۷/۱۲
	۶۰	۲۶/۸۱
	۷۰	۲۶/۳۸
	۸۰	۲۶/۱۹



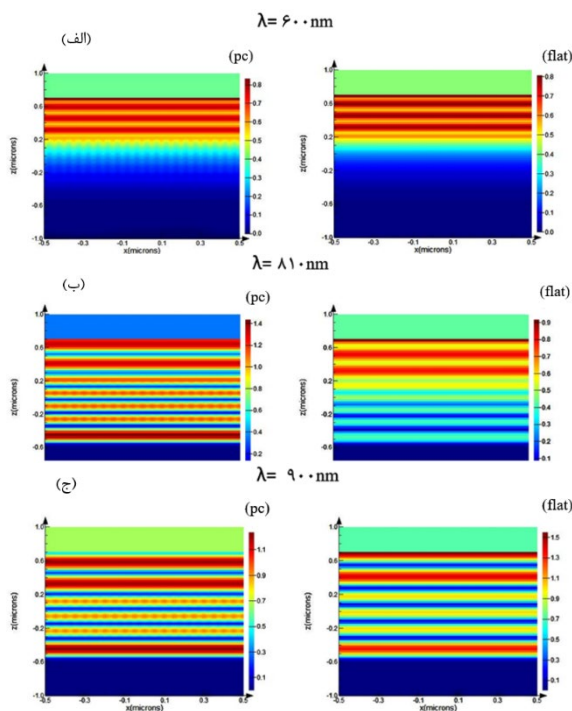
شعاع کره‌ها افزایش یابد تعداد فوتون بیشتری می‌تواند وارد حالت فوتون آهسته شود. به بیان دیگر، طبق شکل ۳ (ب)، هر چه ثابت شبکه بیشتر شود، برهم‌کنش نور و ماده کم‌تر می‌شود و فوتون‌های کمتری وارد حالت فوتون آهسته می‌شوند.



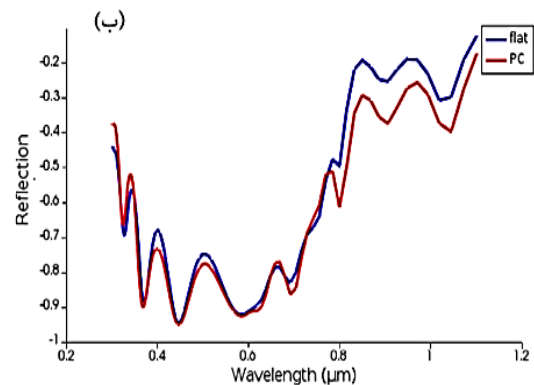
شکل (۲). میزان جذب سلول خورشیدی در الف) شعاع‌ها، ب) ثابت شبکه‌های مختلف کریستال فوتونی

میزان جریان اتصال کوتاه، رابطه مستقیم با میزان جذب دارد. به این صورت که میزان جذب بالاتر، جریان اتصال کوتاه بیشتری را نتیجه می‌دهد. در این بخش میزان جذب و چگالی جریان اتصال کوتاه برای شعاع‌ها و ثابت شبکه‌های مختلف بررسی شده است. بهترین نتیجه مربوط به ساختار کریستال فوتونی کره‌ای سه‌بعدی از جنس روتایل تیتانیوم دی‌اکسید با شعاع کره ۲۰ نانومتر و ثابت شبکه ۵۰ نانومتر است. با قراردادن ساختار کریستال فوتونی موردنظر در لایه فعال سلول خورشیدی به افزایش هفت‌درصدی در چگالی جریان اتصال کوتاه نسبت به ساختار مسطح دست یافتیم. در این صورت میزان چگالی جریان اتصال کوتاه، ۲۷/۱۲ mA/cm² محاسبه شده است درحالی‌که این مشخصه در حالت بدون حضور کریستال فوتونی، ۲۵/۱۱ mA/cm² است. در جدول (۲)، مقادیر شعاع و ثابت شبکه‌های مختلف کریستال فوتونی بررسی شده است.

طبق شکل ۴ (الف)، که میزان جذب سلول خورشیدی پروسکایت با حضور کریستال فوتونی را با سلول خورشیدی



شکل (۵). نمایه توزیع میدان الکترومغناطیسی در ساختار مسطح و ساختار با حضور کریستال فوتونی در طول موج‌های (الف) ۶۰۰ نانومتر، (ب) ۸۱۰ نانومتر، (ج) ۹۰۰ نانومتر



شکل (۴). مقایسه (الف) میزان جذب در ساختار مسطح و کریستال فوتونی، (ب) میزان بازتاب در ساختار مسطح و کریستال فوتونی

با قراردادن ساختار کریستال فوتونی سه‌بعدی پیشنهادی در لایه فعال سلول خورشیدی، نور از ضریب شکست‌هایی که به طور متناوب تغییر می‌کنند عبور می‌کند و این امر موجب شکل‌گیری شکاف باند فوتونی در ساختار می‌شود و سرعت نور در نزدیکی شکاف باند فوتونی به شدت کاهش می‌یابد. کاهش سرعت نور موجب می‌شود که فوتون‌ها مدت‌زمان طولانی‌تری در لایه فعال حضور داشته باشند و بنابراین در ساختار پیشنهادی سرعت نور در طیف طول‌موج ۸۰۰ الی ۱۱۰۰ نانومتر به شدت کاهش یافته است. بادقت به نمایه‌های توزیع میدان الکترومغناطیسی در طول‌موج‌های ۸۱۰، ۹۰۰ نانومتر نیز این امر مشهود است.

در شکل (۵)، نمایه توزیع میدان الکترومغناطیسی سلول خورشیدی در طول موج‌های ۶۰۰، ۸۱۰ و ۹۰۰ نانومتر تحت تابش نور قطبیده شده TE نشان داده شده است. در این نمایه‌ها، قسمت‌های پررنگ، نشانه حضور میدان الکترومغناطیسی قوی و قسمت‌های کم‌رنگ، نشانه‌ی میدان الکترومغناطیسی ضعیف است. هر چه جذب افزایش یابد، میدان الکترومغناطیسی قوی‌تری در آن نقاط به‌وجود می‌آید و بالعکس. بنابراین در شکل (۵) قسمت (ب) و (ج)، که در محدوده طول‌موج‌های فرورسوخ نزدیک قرار دارند، جذب به‌واسطه حضور ساختار کریستال فوتونی در لایه فعال، افزایش یافته و میدان الکترومغناطیسی قوی‌تر خواهد بود. با توجه به نمایه توزیع میدان الکترومغناطیسی شکل (۵) (الف)، در طول موج ۶۰۰ نانومتر مشخص است که نور در طول موج‌های پایین‌تر توسط لایه فعال جذب نمی‌شود بلکه توسط لایه تیتانیوم دی‌اکسید جذب صورت می‌گیرد. زیرا قسمت پررنگ‌تر که مربوط به جذب بیشتر است در ناحیه مربوط به لایه انتقال دهنده الکترون قرار دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نور در طول موج‌های پایین‌تر توسط لایه انتقال دهنده الکترون جذب شده و در طول موج‌های بالاتر در لایه فعال جذب می‌شود. به مرور با افزایش طول موج، نور وارد لایه جذب می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با قراردادن یک ساختار کریستال فوتونی سه‌بعدی روتایل تیتانیوم دی‌اکسید در لایه جذب، عملکرد سلول خورشیدی پروسکایت بهبود یافت. با تغییر شعاع‌ها و ثابت شبکه‌های مختلف، عملکرد سلول خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت. بهترین عملکرد مربوط به شعاع ۲۰ نانومتر و ثابت شبکه ۵۰ نانومتر بود که جریان اتصال کوتاه، به $27/12 \text{ mA/cm}^2$ افزایش یافت. بهبود ساختار به دلیل استفاده از کریستال‌های فوتونی در لایه جذب سلول خورشیدی بود که منجر به اثر فوتون آهسته شد. با شبیه‌سازی سه‌بعدی، پارامترهای نوری و الکتریکی سلول خورشیدی ارائه شده، مورد بررسی قرار گرفت.

۵- مراجع

- [1] J. Y. Kim, J.-W. Lee, H. S. Jung, H. Shin, and N.-G. Park, "High-efficiency perovskite solar cells," *Chem. Rev.*, vol. 120, no. 15, pp. 7867–7918, 2020. doi: 10.1021/acs.chemrev.0c00107
- [2] N. J. Jeon, J. Noh, W. Yang et al., "Compositional engineering of perovskite materials for high-performance solar cells," *Nature*, vol. 517, no. 7535, pp. 476–480, 2015. doi: 10.1038/nature14133
- [3] M. Liu, M. B. Johnston, and H. J. Snaith, "Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition," *Nature*, vol. 501, no. 7467, pp. 395–398, 2013. doi:

- Ahmadi, and K. Abedi, "Hexagonal array of mesoscopic HTM-based perovskite solar cell with embedded plasmonic nanoparticles," *Phys. Status Solidi*, vol. 255, no. 3, p. 1700291, 2018. doi: 10.1002/pssb.201700291
- [15] E. Ghahremanirad, S. Olyaei, and M. Hedayati, "The influence of embedded plasmonic nanostructures on the optical absorption of perovskite solar cells," in *Photonics*, vol. 6, no. 2, 37, 2019. doi: 10.3390/photonics6020037
- [16] E. Ghahremanirad, S. Olyaei, B. A. Nejjand, P. Nazari, V. Ahmadi, and K. Abedi, "Improving the performance of perovskite solar cells using kesterite mesostructure and plasmonic network," *Sol. Energy*, vol. 169, pp. 498–504, 2018. doi: 10.1016/j.solener.2018.05.012
- [17] S. Lie, A. Bruno, L. H. Wong, and L. Etgar, "Semitransparent perovskite solar cells with >13% efficiency and 27% transparency using plasmonic Au nanorods," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 14, no. 9, pp. 11339–11349, 2022. doi: 10.1021/acsmi.1c22748
- [18] Z. Liu et al., "Improving efficiency and stability of colorful perovskite solar cells with two-dimensional photonic crystals," *Nanoscale*, vol. 12, no. 15, pp. 8425–8431, 2020. doi: 10.1039/d0nr00459f.
- [19] M. Lobet et al., "Efficiency enhancement of perovskite solar cells based on opal-like photonic crystals," *Opt. Express*, vol. 27, no. 22, pp. 32308–32322, 2019. doi: 10.1364/OE.27.032308
- [20] D. H. Choi, S. K. Nam, K. Jung, and J. H. Moon, "2D photonic crystal nanodisk array as electron transport layer for highly efficient perovskite solar cells," *Nano Energy*, vol. 56, pp. 365–372, 2019. doi: 10.1016/j.nanoen.2018.11.050
- [21] L. Hasanah et al., "Dimensional optimization of tio2 nanodisk photonic crystals on lead iodide (MAPBI3) perovskite solar cells by using ftd simulations," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 1, p. 351, 2022, doi: 10.3390/app12010351.
- [22] J. Liu, M. Yao, and L. Shen, "Third generation photovoltaic cells based on photonic crystals," *J. Mater. Chem. C*, vol. 7, no. 11, pp. 3121–3145, 2019. DOI: 10.1039/C8TC05461D
- [23] K. Xie, M. Guo, and H. Huang, "Photonic crystals for sensitized solar cells: fabrication, properties, and applications," *J. Mater. Chem. C*, vol. 3, no. 41, pp. 10665–10686, 2015. DOI: 10.1039/c5tc02121a
- [24] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, "Experimental verification of a negative index of refraction," *Science*, vol. 292, no. 5514, pp. 77–79, 2001. DOI: 10.1126/science.1058847
- [25] C. M. Anderson and K. P. Giapis, "Larger two-dimensional photonic band gaps," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 77, no. 14, p. 2949, 1996. doi: 10.1103/PhysRevLett.77.2949
- [26] W. Liu, H. Ma, and A. Walsh, "Advance in 10.1038/nature12509
- [4] H. Zhou, Q. Chen, G. Li, S. Luo, T.B. Song et al., "Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells," *Science*, vol. 345, no. 6196, pp. 542–546, 2014. doi: 10.1126/science.1254050
- [5] L. Qiu, S. He, L. K. Ono, and Y. Qi, "Progress of surface science studies on ABX3-based metal halide perovskite solar cells," *Adv. Energy Mater.*, vol. 10, no. 13, p. 1902726, 2020. doi: 10.1002/aenm.201902726
- [6] S. Jarin, Y. Yuan, M. Zhang, M. Hu, M. Rana, S. Wang, R. Knibbe, "Predicting the crystal structure and lattice parameters of the perovskite materials via different machine learning models based on basic atom properties," *Crystals*, vol. 12, no. 11, p. 1570, 2022. doi: 10.3390/cryst12111570
- [7] Y. Tang, Z. Gu, C. Fu, Q. Xiao, S. Zhang, et al., "FAPbI3 Perovskite Solar Cells: From Film Morphology Regulation to Device Optimization," *Sol. RRL*, vol. 6, no. 6, p. 2200120, 2022. doi: 10.1002/solr.202200120
- [8] Z. Li, F. Zhou, Q. Wang, L. Ding, and Z. Jin, "Approaches for thermodynamically stabilized CsPbI3 solar cells," *Nano Energy*, vol. 71, p. 104634, 2020. doi: 10.1016/j.nanoen.2020.104634
- [9] A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, and T. Miyasaka, "Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 131, no. 17, pp. 6050–6051, 2009. DOI:10.1021/ja809598r
- [10] J.J. Yoo, G. Seo, M.R. Chua, et al., "Efficient perovskite solar cells via improved carrier management," *Nature*, vol. 590, no. 7847, pp. 587–593, 2021. doi: 10.1038/s41586-021-03285-w
- [11] M. Pandey et al., "Deposition of reduced graphene oxide thin film by spray pyrolysis method for perovskite solar cell," *arXiv Prepr. arXiv:2212.01066*, 2022. doi: 10.3126/jnphysoc.v7i3.42193
- [12] S. Motevasel, S. Olyaei, M. Seifouri, "Investigation and numerical analysis of the effect of size, distance, position, and composition of plasmonic nanostructures on the absorption of perovskite solar cells," *Applied Electromagnetism; Biannual Scientific Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 45–51, 2020 [in persian]. dor: 20.1001.1.26455153.1399.8.2.6.8
- [13] H. Afkham, S. Olyaei, E. Sharifkazemi "Analysis and simulation of influence of the silver ribbon nanoparticle's dimensions and refractive index on the efficiency of plasmonic amorphous silicon solar cell," *Applied Electromagnetism; biannual scientific journal*, vol. 7, no. 1, pp. 9–16, 2019 [in persian]. dor: 20.1001.1.26455153.1398.7.1.2.5
- [14] E. Ghahremanirad, S. Olyaei, B. A. Nejjand, V.

- [29] N. Daem et al., "Inverse Opal Photonic Nanostructures for Enhanced Light Harvesting in CH₃NH₃PbI₃ Perovskite Solar Cells," *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 5, no. 9, pp. 13583–13593, 2022, doi: 10.1021/acsanm.2c03274.
- [30] Y. Bao, D. Wang, W. Hui, L. Gu, L. Chao, and L. Song, "Honeycomb-Type TiO₂ Films Toward a High Tolerance to Optical Paths for Perovskite Solar Cells," *ChemSusChem*, vol. 16, no. 2, p. e202201749, 2023, doi: 10.1002/cssc.202201749.
- [31] C. R. Osterwald and T. J. McMahon, "History of accelerated and qualification testing of terrestrial photovoltaic modules: A literature review," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 17, no. 1, pp. 11–33, 2009. doi: 10.1002/pip.861
- photonic crystal solar cells," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 116, p. 109436, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109436.
- [27] D. I. Kim et al., "Enhancing the optical properties using hemisphere TiO₂ photonic crystal as the electron acceptor for perovskite solar cell," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 487, pp. 409–415, 2019. doi: 10.1016/j.apsusc.2019.05.092
- [28] M. Lobet et al., "Opal-Like photonic structuring of perovskite solar cells using a genetic algorithm approach," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 5, p. 1783, 2020. doi: 10.3390/app10051783