



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Improving the Adsorption Profile of Perovskite Solar Cells by TiO₂ Nanowires

Abdollah Alizadeh ^{a,*} , Somayeh Kiani ^a, Mohammad Bagher Delghavi ^a, Shabnam Andalibi Miandoab ^b

^a Department of Electrical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran

^b Department of Electrical Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad university, Tabriz, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2023-08-28

Revised: 2024-06-23

Accepted: 2024-11-27

Keywords:

Solar cells;

Perovskite;

TiO₂ Nanowire;

Absorption profile.

ABSTRACT

Because of some advantages of perovskite solar cells, such as good efficiency, simple manufacturing process and cost-effective production, perovskite solar cells has been taken into consideration in recent years. One of the most important issues in advancing of perovskite solar cells, is to improve the quality of the layers and their components in order to increase the light absorption and efficiency. In this article TiO₂ nano-wire has been added to perovskite solar cells to enhance the absorption spectrum. The simulation results show the 2.69% increasing in adsorption profile. Absorption profile has been simulated in the FDTD of Lumerical software.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31584.2518>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: alizadeh@ubonab.ac.ir

How to cite this article:

A. Alizadeh , S. kiani , M. B. Delghavi and S. Andalibi, "Improving the adsorption profile of Perovskite solar cells by TiO₂ nanowires," Journal of Modeling in Engineering, 23 82 (2025): 185-192, doi: 10.22075/jme.2024.31584.2518

شبیه سازی و بهبود جذب سلول خورشیدی پروسکایت بر پایه نانو سیم های TiO_2 عبدالله علیزاده^{۱*}، سمیه کیانی^۱، محمدباقر دلقوی^۱ و شبنم عندلیبی میاندوآب^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۰۶ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۳ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷	
واژگان کلیدی: سلول های خورشیدی، پروسکایت، ساختارهای پروسکایتی، TiO_2 ، طیف جذب.	دانش و فناوری بشری در دهه اخیر، از میان انواع سلول های خورشیدی، به «سلول های خورشیدی پروسکایت» بنابر دلایلی نظیر بازدهی نسبتاً بالا، فرآیند ساخت آسان و هزینه های تولید مقرون به صرفه، نگاهی ویژه داشته است. با این حال، یکی از مهمترین مسائل پیش رو در این نوع از سلول های خورشیدی، کیفیت بخشیدن به لایه ها و اجزای آنها در جهت افزایش بازدهی است. در این مقاله سلول خورشیدی پروسکایت با ساختار متداول معرفی و شبیه سازی شده و سپس با قرار دادن نانو سیم های TiO_2 در لایه جاذب جهت افزایش طیف جذب نوری در لایه پروسکایت، مورد بررسی قرار گرفته است. نشان داده می شود که استفاده از نانوسیم های TiO_2 باعث بهبود طیف جذب می شود. در ادامه برای رسیدن به نتایج بهتر اندازه شعاع نانو سیم ها، فاصله بین آنها و تعداد لایه های آنها مورد بررسی قرار گرفته و ساختار بهینه با بیشترین بازده جذب به عنوان ساختار پیشنهادی معرفی شده است. نتایج نشان می دهد که استفاده از نانوسیم های TiO_2 با شعاع 20nm و فاصله بین آنها 70cm جذب نوری را نسبت به حالت بدون نانو ذرات ۲۶۹٪ افزایش می دهد، محاسبه انتشار نور و مشخصات طیف جذب نوری در سلول خورشیدی معرفی شده توسط FDTD لومریکال انجام شده است.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31584.2518>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

امروزه با استفاده از کلکتورهای خورشیدی و سامانه های فتوولتاییک، انرژی خورشیدی برای گرم کردن و تولید انرژی الکتریکی استفاده می شود. هزینه ساخت بالا و پایین بودن راندمان استفاده از انرژی خورشیدی، از جمله مشکلات گسترش این روش محسوب می شود که تلاش های زیادی در راستای بهبود عملکرد این تجهیزات در حال انجام است. در این راستا نسل های مختلفی از سلول های خورشیدی ساخته و مورد استفاده قرار گرفته اند. هزینه بالای ساخت نسل اول و راندمان پایین نسل دوم، موجب علاقه به انجام پژوهش گسترده در زمینه ساخت سلول های

نسل سوم از جمله سلول های خورشیدی پروسکایت شده است. لذا سلول های خورشیدی پروسکایت به عنوان یک فناوری نوید بخش به منظور تبدیل نور خورشید به الکتریسیته موثر، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۱-۶]. همچنین نانو ساختارها و نانو ذرات به منظور بهبود جذب نور در لایه جاذب و ایجاد طیف جذب نور وسیع تر، مورد بررسی قرار گرفته اند. سلول های خورشیدی پروسکایتی یکی از انواع سلول های خورشیدی نسل سوم است که بر پایه ترکیباتی با ساختار پروسکایت می باشد. برای اولین بار در سال ۲۰۰۹، پروسکایت های متیل آمونیوم سرب ($\text{CH}_3 \text{NH}_3 \text{PbX}_3$, $\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$)، به عنوان

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: alizadeh@ubonab.ac.ir

۱. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب، بناب، ایران

۲. گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی تبریز، تبریز، ایران

استناد به این مقاله:

نوری در نواحی مختلف سلول خورشیدی پروسکایت استفاده شده است. با بدست آوردن توزیع میدان معادله زیر برای بدست آوردن بازده کوانتومی (QE) بکار گرفته شده است:

$$QE(\lambda) = \frac{1}{P_{in}} \int \frac{1}{2} c \epsilon_0 n \alpha |E(x, y, z)|^2 dx dy dz \quad (۱)$$

بطوریکه P_{in} توان نور نرمالیزه وارد شده، c سرعت نور، ϵ_0 ضریب گذردهی در خلا، n قسمت حقیقی ضریب شکست لایه‌های مختلف، α ضریب جذب انرژی متناسب با طول موج $(\alpha = 4\pi k/\lambda)$ که k قسمت موهومی ضریب شکست لایه‌ها، λ طول موج و E توزیع میدان الکتریکی به دست آمده از روش FDTD در مکانهای مختلف را نشان می‌دهند.

برای بدست آوردن نتایج دقیقی از محاسبات سعی شده است از حداقل سائز قابل قبول مش‌بندی (0.2nm) برای نواحی مختلف استفاده شود. مشخصات نوری و ویژگی‌های ضریب شکست لایه‌ها و مواد مختلف از رفرنس‌های معتبر انتخاب شده‌اند [۱۰ و ۱۴]. ساختار سلول خورشیدی در نظر گرفته شده توسط منبع نور موج تخت در محدوده طول موج $\lambda = 300\text{nm} - 800\text{nm}$ در راستای عمود بر سطح یعنی در راستای محور Y مورد تابش قرار گرفته است. شرایط مرزی در نظر گرفته شده در راستای محور Y به صورت PML (Perfectly matched layer) و برای مرزهای X پی‌ریودیک در نظر گرفته شده است. در ادامه با در دست بودن بازده کوانتومی مطابق معادله زیر جریان اتصال کوتاه محاسبه شده است:

$$J_{SC} = \frac{q}{hc} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \lambda QE(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (۲)$$

در این رابطه q بار واحد الکترون، h ثابت پلانک و $S(\lambda)$ مطابق طیف خورشید (AM 1.5G) در نظر گرفته شده است. همچنین λ_{max} باتوجه به شکاف باند ماده جاذب پروسکایت و λ_{min} مطابق کم‌ترین طول موج طیف تابشی خورشید (300 نانو متر) تعیین می‌شود.

ساختار مورد استفاده در این مقاله، که در محیط FDTD نرم افزار لومریکال شبیه‌سازی شده در شکل (۱) آورده شده است.

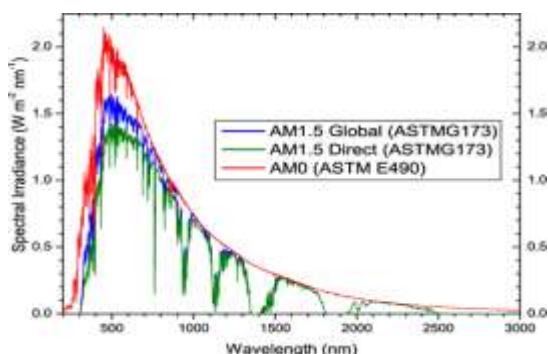
جاذب نور در سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای به کار گرفته شدند [۷]. این نوع سلول‌ها به سرعت به عنوان گزینه مناسبی برای جایگزینی سلول‌های سیلیکانی مطرح شدند. متیل آمونیوم سرب یدید ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) به خاطر داشتن خواصی همچون گاف نواری مناسب، ضریب جذب بالا [۸]، طول نفوذ الکترون -حفره زیاد [۹]، و تحرک پذیری بالای حامل‌های بار [۱۰]، توجه زیادی را در چند سال اخیر به خود جلب کرده است. بازده سلول‌های خورشیدی پروسکایتی خیلی سریع از ۴٪ در سال ۲۰۰۹ [۷]، به ۲۲٪ در سال ۲۰۱۶ [۱۱] و ۲۵.۵٪ در سال ۲۰۲۱ [۱۲]، افزایش یافته است. در سلول‌های خورشیدی پروسکایت متداول لایه TiO_2 به عنوان لایه انتقال دهنده الکترون استفاده شده است [۱۳]. در ساختار معرفی شده در این مقاله علاوه بر لایه TiO_2 به صورت Compact که به عنوان لایه انتقال دهنده الکترون می‌باشد از نانوسیم‌های TiO_2 به صورت افقی با سطح سلول در داخل لایه فعال پروسکایت نیز استفاده شده است. با توجه به اینکه طول نفوذ حاملها در لایه پروسکایت کوتاه است امکان استفاده از آن به تنهایی به صورت لایه ضخیم وجود ندارد و بایستی به طریقی سعی شود مسیر انتقال حاملها به الکتروود مربوطه فراهم شود. در این مقاله با کمک نانو سیم‌های TiO_2 تلاش می‌کنیم علاوه بر اینکه حبس نور در لایه فعال برای افزایش امکان جذب را زیاده‌تر کنیم و نور تابشی را به عمق لایه فعال نیز ارسال کنیم، برای حاملهای تولید شده در قسمتهای عمقی‌تر لایه فعال نیز مسیر انتقال به سمت الکتروود بالایی را فراهم کنیم.

۲- روش کار

در این مقاله برای بررسی انتشار امواج نوری در لایه‌های مختلف سلول‌های خورشیدی پروسکایتی از روش شبیه‌سازی با حل عددی تفاضل محدود در حوزه زمان (Finite Difference Time Domain) توسط بسته FDTD Solution مربوط به نرم افزار لومریکال استفاده شده است. تمامی شبیه‌سازی‌ها در دو بعد نرم افزاری انجام یافته است، و سعی شده است تا حد امکان از کوچکترین مش بندی برای نواحی شبیه‌سازی استفاده شود. در واقع روش FDTD برای گسسته‌سازی و حل عددی معادلات ماکسول جهت محاسبه توزیع میدان‌های الکترو مغناطیس

$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3=400$ Spiro-MeTAD=350nm
 $\text{AU}=100\text{nm}$ می‌باشند. در شبیه‌سازی از شرایط مرزی Periodic در امتداد محور X و شرایط مرزی PML در محور Y استفاده شده است.

در عمل سلولهای خورشیدی بدلیل زاویه تابش نور خورشید، ضخامت‌های متفاوتی از اتمسفر زمین را خواهند دید. بنابراین استفاده از پارامتر AM (Air Mass) که نمایانگر طول موثر عبور نور از اتمسفر نسبت به ضخامت عمودی اتمسفر می‌باشد رایج می‌باشد.

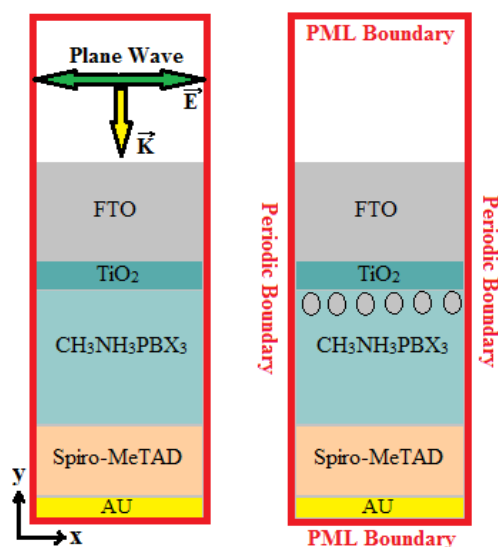


شکل (۲) طیف‌های استاندارد شامل AM0، AM1.5G، AM1.5D، [۱۵]

طیف‌های استاندارد شامل AM0 (بدون اتمسفر)، AM1.5D و AM1.5G (تابش مستقیم بدون پراکندگی برای عرض جغرافیایی حدود 48.2°) هستند که در شکل ۲ آورده شده است. در اغلب شبیه‌سازی‌های سلول‌های خورشیدی از طیف AM1.5G استفاده می‌کنند.

۴- نتایج شبیه‌سازی و بحث

همانطور که اشاره شد، برای افزایش جذب لایه پروسکایت و همچنین افزایش محدوده طیف جذب می‌توان از نانو ذرات استفاده کرد. در این تحقیق از نانو سیم‌های TiO_2 به عنوان نانو ذرات در داخل لایه پروسکایت سلول خورشیدی استفاده شده است. نتایج مطالعات ساختار سلول خورشیدی پروسکایت حاوی نانو سیم‌های TiO_2 با نتایج ساختار سلول خورشیدی پروسکایت بدون حضور نانو ذرات مقایسه می‌شود. تاثیر تغییر مشخصات نانو ذرات شامل شعاع نانو ذرات و فاصله از همدیگر و فاصله از لایه بالایی در ادامه آورده می‌شود. در شکل (۳) قسمت مرکزی دو ساختار سلول خورشیدی پروسکایت آورده شده است که در یکی از آنها شش ردیف نانو ذره و در دیگری تنها یک ردیف نانو ذره مورد استفاده قرار گرفته است. نمودار طیف جذب محاسبه شده برای هر کدام از دو ساختار فوق به ازای شعاع 10nm



شکل ۱- ساختار سلول خورشیدی با و بدون نانوسیم‌های TiO_2

ساختار یکبار بدون حضور نانو سیم و یکبار با حضور نانو سیم از ۱ ردیف تا ۶ ردیف با ضخامت ۵۰ تا ۵۰۰ نانومتر و شعاع ۱۰ و ۲۰ نانومتر شبیه‌سازی شده است. لایه جذب موثرترین نقش را در بهبود جذب نور دارد، در این تحقیق، با توجه به نتایج بدست آمده، ضخامت لایه جذب ۴۰۰ نانومتر در نظر گرفته شده است.

۳- ساختار سلول خورشیدی

معمولاً سلول‌های خورشیدی پروسکایت دارای سه لایه اصلی است: لایه انتقال دهنده الکترون (ETL)، لایه جذب پروسکایت و لایه انتقال دهنده حفره (HTL). از متداول ترین مواد قابل استفاده برای ETL می‌توان به TiO_2 ، ZnO [۱۵] و PCBM [۱۶]، همچنین برای لایه جذب پروسکایت ترکیب $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ که در آن X نمایانگر I، Br یا Cl است [۱۷]، همچنین برای لایه HTL نیز Spiro-MeTAD، CuI [۱۸]، CuSCN [۱۹] و یا P_3HT [۲۰] استفاده می‌شود. ساختارهای مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. در این شکل شمای دو بعدی با حضور و بدون حضور نانوذرات TiO_2 را نشان می‌دهند. مطابق شکل (۱)، Compact TiO_2 بعنوان لایه ETL، $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ لایه جذب و Spiro-MeTAD لایه HTL در نظر گرفته شده است. سلول خورشیدی پروسکایت مورد مطالعه در این مقاله بر اساس هندسه سلول خورشیدی پروسکایت متداول طراحی شده است. ضخامت لایه‌ها به ترتیب برای FTO=500nm، Compact $\text{TiO}_2=50\text{nm}$ ، TiO_2 nanowire=50nm

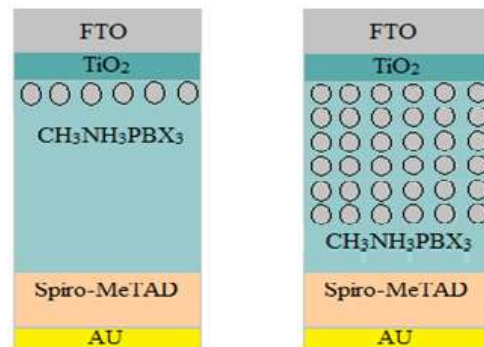
به همین دلیل کاهش ضخامت لایه پروسکایت در کاهش اثرات مضر آن در محیط زیست و کاهش بازترکیب‌های غیر تابشی حامل‌ها و بنابراین بهبود عملکرد سلول خورشیدی پروسکایت موثر خواهد بود. در بررسی دیگری به تأثیرات ضخامت لایه پروسکایت بر روی بازده جذب سلول خورشیدی پروسکایت پرداخته شده است. در این بررسی، ضخامت لایه پروسکایت از ۵۰ تا ۵۰۰ نانومتر تغییر داده می‌شود. برای مقایسه ملموس‌تر منحنی‌ها، از درصد جذب تجمیعی یا عبارتی از سطح زیر منحنی‌ها استفاده شده است. لذا بجای آوردن منحنی جذب، درصد بازده جذب به ازای ضخامت‌های مختلف لایه پروسکایت در جدول ۱ آورده شده است. همانطور که دیده می‌شود، برای ضخامت لایه پروسکایت ۴۰۰ نانومتر با نانوذراتی به شعاع ۲۰ نانومتری، بیشترین میزان جذب نور در ساختار ۶ ردیفه بدست آمده است.

جدول ۱- میزان جذب بر حسب درصد برای ساختار ۶ ردیفه به ازای ضخامت‌های مختلف لایه پروسکایت

ضخامت لایه پروسکایت	با نانو سیم ۱۰ نانومتر	با نانو سیم ۲۰ نانومتر	بدون نانو سیم
50	36.575	33.5178	38.9287
100	50.3616	48.2234	54.3498
150	58.9591	57.3356	60.6668
200	62.3329	56.9404	63.0681
250	64.5075	60.9822	65.0206
300	66.1364	63.7228	66.0818
350	67.1776	66.8621	66.8735
400	66.6483	68.9532	66.9196
450	66.8733	68.1752	67.1214
500	66.5552	67.8858	66.2661

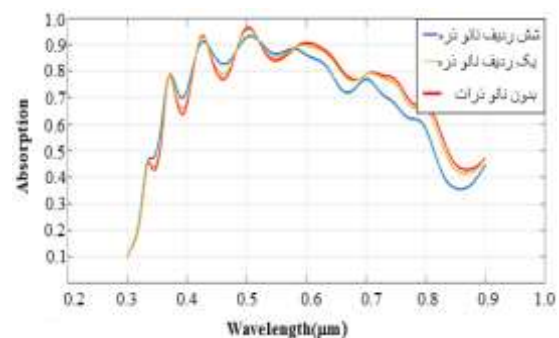
استفاده از نانو ذرات در لایه جاذب باعث افزایش حبس نور و در نتیجه افزایش زمان و ایجاد فرصت برای جذب نور در لایه جاذب خواهد بود. ولی از طرفی اگر تعداد لایه‌های نانو ذرات افزایش یابد با توجه به اینکه حجم لایه جاذب کاهش پیدا میکند؛ بنابراین نقش بازدارنده خواهد داشت و بازده را کاهش خواهد داد. در شبیه‌سازی دیگری، بررسی‌های فوق برای یک لایه نانو سیم انجام شد و نتایج در جدول ۲

در شکل (۴) و به ازای شعاع 20nm در شکل (۵) آورده شده است. برای راحت بودن مقایسه همراه با این نتایج طیف جذب ساختار بدون نانو ذره نیز آورده شده است.

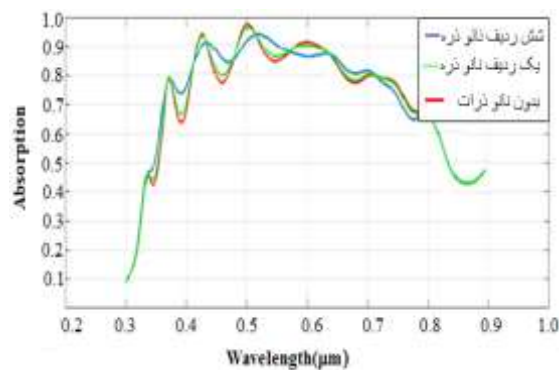


شکل ۳- ساختار با ۶ ردیف نانوذره TiO_2 و با ۱ ردیف نانو ذره TiO_2

اگر چه سلول خورشیدی پروسکایت به دلیل پتانسیل بازده بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند اما وجود سرب در لایه جاذب آن و در عین حال طول نفوذ کوتاه حامل‌های آزاد ایجاد شده از جذب نور، یک چالش برای کاربرد گسترده آن در صنعت محسوب می‌شود.



شکل ۴- میزان جذب لایه جاذب با نانو سیم‌های به شعاع ۱۰ نانومتر برای ساختار ۶ ردیف و ۱ ردیف



شکل ۵- میزان جذب لایه جاذب با نانو سیم‌های به شعاع ۲۰ نانومتر برای ساختار ۶ ردیف و ۱ ردیف

آورده شده است.

جدول ۲- میزان جذب بر حسب درصد برای ساختار ۱ ردیفه به ازای ضخامت‌های مختلف لایه پروسکایت

بدون نانو سیم	با نانو سیم ۲۰ نانومتر	با نانو سیم ۱۰ نانومتر	ضخامت لایه پروسکایت
۳۸.۹۲۸۷	۳۳.۵۱۷۸	۳۶.۵۷۵	۵۰
۵۴.۳۴۹۸	۵۲.۵۱۳۷	۵۴.۲۲۷۰	۱۰۰
۶۰.۶۶۶۸	۶۰.۶۴۹۷	۶۰.۹۱۱۳	۱۵۰
۶۳.۰۶۸۱	۶۴.۰۹۴۴	۶۳.۵۵۹۰	۲۰۰
۶۵.۰۲۰۶	۶۶.۲۴۵۴	۶۵.۵۵۲۸	۲۵۰
۶۶.۰۸۱۸	۶۷.۵۴۴۸	۶۶.۷۷۰۱	۳۰۰
۶۶.۸۷۳۵	۶۸.۶۷۷۵	۶۷.۶۱۱۳	۳۵۰
۶۶.۹۱۹۶	۶۹.۶۰۹۶	۶۷.۵۹۷۸	۴۰۰
۶۷.۱۲۱۴	۶۸.۵۱۹۶	۶۸.۰۶۱۹	۴۵۰
۶۶.۲۶۶۱	۶۷.۴۹۱۲	۶۷.۱۱۹۹	۵۰۰

تغییرات درصد جذب لایه جذب پروسکایت به صورت تابعی از ضخامت لایه پروسکایت در سه حالت بدون نانو ذره، در حضور نانو سیم‌های TiO_2 (با شعاع ۱۰ نانومتر و شعاع ۲۰ نانومتر) یکبار برای شش لایه نانو سیم و بار دیگر برای یک ردیف نانو سیم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تغییر ضخامت در جدول های ۱ و ۲ و همچنین برای هر حالت به ازای طول موجهای مختلف در شکل های ۴ و ۵ آورده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، سلول‌های خورشیدی PSC ترکیبی آلی-غیر آلی مبتنی بر نانوسیم‌های TiO_2 ، شبیه‌سازی شده و مشخصات جذب و توزیع میدان در لایه پروسکایت با کمک روش حل عددی FDTD محاسبه شده است. با تغییر پارامترهای اندازه و تعداد لایه‌های نانو ذرات TiO_2 و همچنین ضخامت لایه پروسکایت، نتایج بدست آمده از مدل شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. به طور کلی نانوساختارهای TiO_2 با استفاده از دو روش هیدروترمال یا الکتروشیمیایی تهیه می‌شوند [۲۱]. در روش‌های هیدروترمال، بسیاری از نانولوله‌های TiO_2 منفرد سنتز می‌شوند. در حالی که، در روش الکتروشیمیایی، که آنودیزاسیون نیز نامیده می‌شود، نانولوله‌های TiO_2 بسیار مرتب و منظم بدون دیفرمیشن‌های احتمالی سنتز

می‌شوند. در این روش اندازه، طول، ضخامت و عرض نانولوله های TiO_2 را می‌توان به راحتی در مقیاس‌های دقیق نانومتری به عنوان تابعی از زمان واکنش، ولتاژ و غلظت الکترولیت‌ها کنترل کرد. این روشها با توجه به اینکه در فاز محلول اجرا می‌شوند در صورت کنترل عوامل محیطی پیچیدگی ساخت دیگری نخواهند داشت. تکه‌های نانولوله های TiO_2 سنتز شده توسط آنودیزاسیون برای پراکندگی نور با توجه به تئوری پراکندگی Mie مناسب هستند. به این ترتیب هست که سلول‌های خورشیدی پروسکایت حاوی نانو میله‌های TiO_2 ما افزایش قابل توجهی در چگالی جریان نوری (J_{sc}) نشان داده است که علاوه بر اینکه هدایت بار را افزایش داده، نور خورشید بیشتری را نیز جذب کرده است. مطابق نتایج حاصله، وجود نانو ذرات در لایه جاذب باعث افزایش حبس نور و در نتیجه بهبود جذب نور در سلول‌های خورشیدی پروسکایت می‌شود. مقادیر بهینه برای ضخامت پروسکایت ۴۰۰ نانومتر، شعاع نانو سیم‌ها ۲۰ نانومتر و تعداد یک لایه می‌باشد که در این شرایط ۲.۶۹ درصد بازده جذب را نسبت به ساختار بدون نانوذرات بهبود می‌بخشد.

تقدیر و تشکر

نویسنده این مقاله از هم‌فکری اعضای هیئت تحریریه مجله علمی-پژوهشی مدل سازی در مهندسی دانشگاه سمنان کمال سپاسگزاری را دارند.

تعارض منافع

نویسنده اعلام می‌کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان

عبداله علیزاده و محمد باقر دلقوی اساتید راهنمای پایان نامه سمیه کیانی و شبنم عندلیب مشاور پایان نامه بودند. تعریف موضوع و راهنمایی‌های لازم بیشتر بر عهده عبدالله علیزاده بوده و انجام شبیه‌سازی‌ها بر عهده سمیه کیانی بوده است.

منابع مالی

از منابع مالی هیچ سازمانی استفاده نشده است.

مراجع

- [1] Green, Martin A., Anita Ho-Baillie, and Henry J. Snaith. "The emergence of perovskite solar cells." *Nature photonics* 8, no. 7 (2014): 506-514.
- [2] Snaith, Henry J. "Perovskites: the emergence of a new era for low-cost, high-efficiency solar cells." *The journal of physical chemistry letters* 4, no. 21 (2013): 3623-3630.
- [3] Ghahremanirad, Elnaz, Saeed Olyaei, and Maryam Hedayati. "The influence of embedded plasmonic nanostructures on the optical absorption of perovskite solar cells." In *Photonics*, vol. 6, no. 2, p. 37. MDPI, 2019.
- [4] Ghahremanirad, Elnaz, Saeed Olyaei, Bahram Abdollahi Nejand, Pariya Nazari, Vahid Ahmadi, and Kambiz Abedi. "Improving the performance of perovskite solar cells using kesterite mesostructure and plasmonic network." *Solar Energy* 169 (2018): 498-504.
- [5] Ghahremanirad, Elnaz, Saeed Olyaei, Bahram A. Nejand, Vahid Ahmadi, and Kambiz Abedi. "Hexagonal array of mesoscopic HTM-based perovskite solar cell with embedded plasmonic nanoparticles." *physica status solidi (b)* 255, no. 3 (2018): 1700291.
- [6] Ghahremanirad, Elnaz, Agustín Bou, Saeed Olyaei, and Juan Bisquert. "Inductive loop in the impedance response of perovskite solar cells explained by surface polarization model." *The journal of physical chemistry letters* 8, no. 7 (2017): 1402-1406.
- [7] Im, Jeong-Hyeok, Chang-Ryul Lee, Jin-Wook Lee, Sang-Won Park, and Nam-Gyu Park. "6.5% efficient perovskite quantum-dot-sensitized solar cell." *Nanoscale* 3, no. 10 (2011): 4088-4093.
- [8] Baudrit, Mathieu, and Carlos Algara. "Tunnel diode modeling, including nonlocal trap-assisted tunneling: a focus on III-V multijunction solar cell simulation." *IEEE transactions on electron devices* 57, no. 10 (2010): 2564-2571.
- [9] Kim, Hui-Seon, Jin-Wook Lee, Natalia Yantara, Pablo P. Boix, Sneha A. Kulkarni, Subodh Mhaisalkar, Michael Gratzel, and Nam-Gyu Park. "High efficiency solid-state sensitized solar cell-based on submicrometer rutile TiO₂ nanorod and CH₃NH₃PbI₃ perovskite sensitizer." *Nano letters* 13, no. 6 (2013): 2412-2417.
- [10] Asadzade, Amir, and Shabnam Andalibi Miandoab. "Design and simulation of 3D perovskite solar cells based on titanium dioxide nanowires to achieve high-efficiency." *Solar Energy* 228 (2021): 550-561.
- [11] Liu, Dianyi, and Timothy L. Kelly. "Perovskite solar cells with a planar heterojunction structure prepared using room-temperature solution processing techniques." *Nature photonics* 8, no. 2 (2014): 133-138.
- [12] Xu, Yang, Yi Wang, Jichao Yu, Bingjie Feng, Hai Zhou, Jun Zhang, Jinxia Duan et al. "Performance improvement of perovskite solar cells based on pcbm-modified ZnO-nanorod arrays." *IEEE Journal of Photovoltaics* 6, no. 6 (2016): 1530-1536.
- [13] Da, Yun, Yimin Xuan, and Qiang Li. "Quantifying energy losses in planar perovskite solar cells." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 174 (2018): 206-213.
- [14] Jiménez-Solano, Alberto, Sol Carretero-Palacios, and Hernán Míguez. "Absorption enhancement in methylammonium lead iodide perovskite solar cells with embedded arrays of dielectric particles." *Optics express* 26, no. 18 (2018): A865-A878.
- [15] Wang, Kuo-Chin, Jun-Yuan Jeng, Po-Shen Shen, Yu-Cheng Chang, Eric Wei-Guang Diao, Cheng-Hung Tsai, Tzu-Yang Chao et al. "P-type mesoscopic nickel oxide/organometallic perovskite heterojunction solar cells." *Scientific reports* 4, no. 1 (2014): 4756.
- [16] Docampo, Pablo, James M. Ball, Mariam Darwich, Giles E. Eperon, and Henry J. Snaith. "Efficient organometal trihalide perovskite planar-heterojunction solar cells on flexible polymer substrates." *Nature communications* 4, no. 1 (2013): 2761.
- [17] Liu, Mingzhen, Michael B. Johnston, and Henry J. Snaith. "Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition." *Nature* 501, no. 7467 (2013): 395-398.
- [18] Christians, Jeffrey A., Raymond CM Fung, and Prashant V. Kamat. "An inorganic hole conductor for organo-lead halide perovskite solar cells. Improved hole conductivity with copper iodide." *Journal of the American Chemical Society* 136, no. 2 (2014): 758-764.

- [19] Qin, Peng, Soichiro Tanaka, Seigo Ito, Nicolas Tetreault, Kyohei Manabe, Hitoshi Nishino, Mohammad Khaja Nazeeruddin, and Michael Grätzel. "Inorganic hole conductor-based lead halide perovskite solar cells with 12.4% conversion efficiency." *Nature communications* 5, no. 1 (2014): 3834.
- [20] Löper, Philipp, Michael Stuckelberger, Bjoern Niesen, Jérémie Werner, Miha Filipic, Soo-Jin Moon, Jun-Ho Yum, Marko Topič, Stefaan De Wolf, and Christophe Ballif. "Complex refractive index spectra of CH₃NH₃PbI₃ perovskite thin films determined by spectroscopic ellipsometry and spectrophotometry." *The journal of physical chemistry letters* 6, no. 1 (2015): 66-71.
- [21] Yang, Hwa-Young, Won-Yeop Rho, Seul Ki Lee, Sang Hoon Kim, and Yoon-Bong Hahn. "TiO₂ nanoparticles/nanotubes for efficient light harvesting in perovskite solar cells." *Nanomaterials* 9, no. 3 (2019): 326.