مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۲۴، شمارهٔ ۱، بهار ۱۴۰۳
DOI: 10.47176/ijpr.24.4.11795

ساخت لایه‌های نازک اپتیکی اکسید روی و فسفر و مقایسهٔ اثر آنها بر بازده سلول خورشیدی سیلیکونی

سعید صالح‌پور

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندارن، بابلسر

پست الکترونیکی: sd.salehpour@gmail.com

(دریافت مقاله: ۰۸/ ۰۹/ ۱۴۰۲ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۴۰۲/۱۲/۰۳)

چکیده

در تحقیق حاضر، هدف بررسی کارایی فوتولومینسانس نانوذرات فسفر قرمز در افزایش بازده سلول خورشیدی است. فسفر قرمز از طریق کاهش بازتاب سطحی سلول خورشیدی سیلیکونی نیز می‌تواند بازده سلول را افزایش دهد، برای این که تأثیر خاصیت فوتولومینسانس فسفر در افزایش بازده سلول بیشتر نمایان شود قبل از لایه نشانی فسفر، اکسید روی را که خاصیت ضد بازتاب دارد بر سطح سلول لایه‌نشانی کردیم تا بازتاب سطح سلول تا حد ممکن کاهش یابد و نقش خاصیت ضد بازتاب فسفر در افزایش بازده به حداقل برسد، با این روش افزایش بازده حاصل شده از لایه‌نشانی فسفر قرمز را می‌توان مرتبط به خاصیت فوتولومینسانس فسفر قرمز دانست. ابتدا ۵۰nm اکسید روی به روش تبخیر حرارتی فیزیکی بر روی سطح سلول خورشیدی سیلیکونی لایه‌نشانی شد و نتایج طیف‌سنجی نوری از سطح لایه نشان داد که این لایه بازتاب سطح سلول را کاهش داده است. همچنین نتایج اندازه‌گیری بازده سلول تحت تابش استاندارد AM1.5G بر سلول خورشیدی سیلیکونی نشان داد، بازده سلول کاهش یافته است. سپس بر سطح لایهٔ اکسید روی ۹۰ nm فسفر قرمز به روش تبخیر حرارتی فیزیکی لایه‌نشانی شد و نتایج طیف‌سنجی نوری نشان داد که این لایه، مقداری بازتاب سطح سلول را افزایش داده است. نتایج اندازه‌گیری بازده حدود ۳۷ درصد افزایش بازده نسبی را نشان داد. این افزایش بازده را می‌توان به خاطر خاصیت فوتولومینسانس نانوذرات فسفر دانست که با دریافت نور فرابنفش می‌توانند نور مرئی گسیل کنند که برای سلول خورشیدی سیلیکونی جذب بیشتری دارد.

واژه‌های کلیدی: سلول خورشیدی سیلیکونی، بازده، فسفر، بازتاب، اکسید روی

۱. مقدمه

استفاده از انرژی خورشیدی امروزه به دلیل دسترسی آسان و رایگان بودن، تجدیدپذیری و به عنوان یک منبع انرژی پاک جذابیت بسیاری دارد. از طرف دیگر، سوخت‌های فسیلی با مشکلات زیادی، از جمله آلودگی محیطی، تولید گازهای گلخانه‌ای، هزینهٔ بالا و عدم تجدید پذیری همراه است.

تا به حال انواع مختلفی از سلول‌های خورشیدی معرفی شده‌اند [۱]. هدف از معرفی نسل‌های جدید سلول، افزایش بازده سلول‌ها و کاهش هزینهٔ تولید آنها است [۲]. سلول‌های خورشیدی سیلیکونی هرچند یکی از نسل‌های قدیمی سلول‌های خورشیدی هستند ولی سهم قابل توجهی در بازار مصرف دارند. به همین دلیل، بهبود عملکرد این نوع سلول‌های خورشیدی اهمیت کاربردی و اقتصادی دارد.

یک از دلایلی که می‌توان برای بازده پایین سلول خورشیدی سیلیکونی برشمرد هدر رفتن انرژی نور فرابنفش به دلیل بیشتر بودن انرژی آن از انرژی گاف نواری سیلیکون (۱/۱۲ الکترون ولت) است. انرژی اضافه به صورت انرژی جنبشی جفت

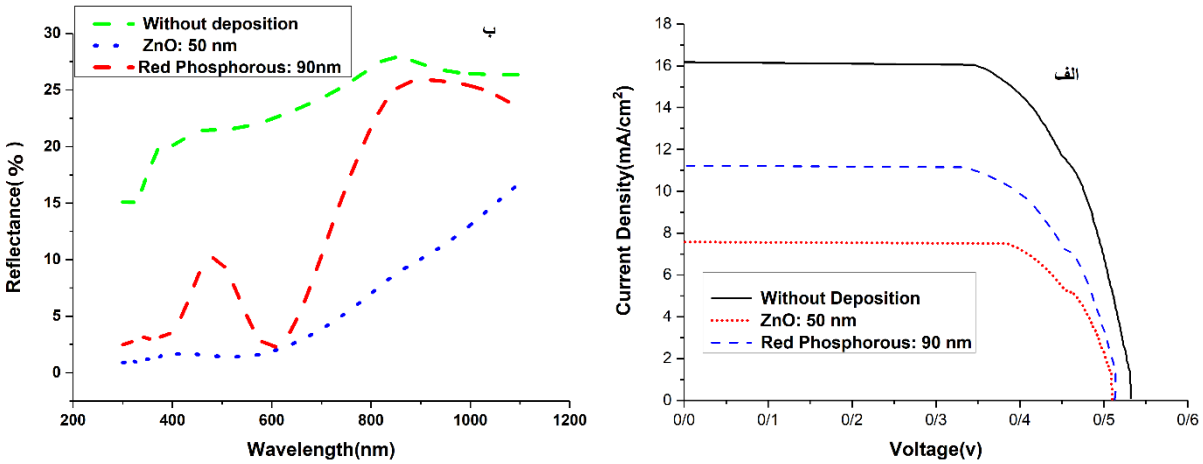
الکترون–حفرهٔ تولید شده هدر می‌رود [۳ و ۴].
یک روش برای افزایش بازده سلول خورشیدی سیلیکونی تبدیل نور فرابنفش به مرئی است که چون سلول خورشیدی سیلیکونی در ناحیه مرئی جذب بیشتر و عکس العمل طیفی بالاتری از ناحیهٔ فرابنفش دارد می‌تواند بازده بیشتری را برای سلول رقم بزند [۵–۸]. برای این هدف می‌توان از خاصیت فوتولومینسانس استفاده کرد. مواد با این خاصیت می‌تواند با دریافت نور فرابنفش، نور مرئی گسیل کند [۹–۱۲]. در این تحقیق از فسفر قرمز استفاده کردیم که خاصیت فوتولومینسانس، تبدیل نور فرابنفش به مرئی، دارد. برای اثبات این که خاصیت فوتولومینسانس فسفر قرمز می‌تواند عامل افزایش بازده سلول باشد، قبل از لایه‌نشانی فسفر قرمز یک لایه اکسید روی بر سطح سلول لایه‌نشانی کردیم تا به خاطر خاصیت ضد بازتاب آن [۱۳] بازتاب سطحی سلول کاهش یابد. این کار باعث می‌شود تا نقش ضد بازتاب فسفر در افزایش بازده سلول به حداقل برسد و افزایش بازده بعد از لایه‌نشانی فسفر را مرتبط با خاصیت فوتولومینسانس دانست.
در تحقیقات مشابه با موضوع این تحقیق [۹–۱۲] از روش‌های پیچیده و پرهزینه که فرایند ساخت سلول را تغییر می‌دهد برای افزایش بازده سلول خورشیدی سیلیکونی استفاده شده است. در این تحقیق روشی ساده و کم هزینه معرفی شده است (لایه‌نشانی فسفر قرمز به روش تبخیر حرارتی) که قابلیت اجرا بر روی سلول‌های خورشیدی از پیش ساخته شده را نیز دارد، یعنی نیاز به تغییر مراحل ساخت سلول خورشیدی نیست.

۲. روش کار

در این تحقیق، پودر فسفر قرمز آمورف با چگالی $\frac{g}{cm^3}$ ۲/۲ و خلوص بیش از ۹۷ درصد و پودر اکسید روی با خلوص بیش از ۹۸ درصد استفاده شد و برای لایه‌نشانی هر دو ماده از روش تبخیر حرارتی فیزیکی استفاده شد. لایه‌نشانی تحت فشار خلأ حدود 10^{-5} torr انجام شد و ضخامت لایه‌ها به وسیلهٔ نوسانگر بلور کوارتز اندازه‌گیری شد.
قبل از انجام آزمایش، سطوح سلول‌ها با الکل و استون به روش متداول پاک‌سازی شد تا مواد ناخواسته بر روی آنها نباشد.
قبل از شروع فرایند لایه‌نشانی مشخصات الکتریکی سلول‌های خورشیدی تحت شرایط استاندارد نوری AM1.5G توسط دستگاه شبیه ساز خورشیدی اندازه‌گیری شد و بازتاب سطح سلول با استفاده از دستگاه طیف‌سنج نوری SHIMADZU-UV1800 اندازه‌گیری شد. سپس اکسید روی با ضخامت ۵۰nm لایه‌نشانی شد. نمونه از دستگاه خارج شد. مجدداً اندازه‌گیری مشخصات الکتریکی و بازتاب سطح سلول انجام شد. سپس نمونه مجدداً در دستگاه قرار گرفت و فسفر قرمز با ضخامت ۹۰nm لایه‌نشانی شد. نمونه از دستگاه خارج شد و اندازه‌گیری مشخصات الکتریکی و بازتاب سطح سلول انجام شد.

۳. بحث و نتایج

در تحقیقات پیشین [۱۴ و ۱۵] اثر فوتولومینسانس نانو ذرات فسفر بررسی شده است. در تحقیق حاضر هدف بررسی کارایی فوتولومینسانس فسفر قرمز در افزایش بازده سلول خورشیدی است. لایهٔ فسفر همچنین از طریق کاهش بازتاب سطحی سلول خورشیدی سیلیکونی نیز می‌تواند بازده سلول را افزایش دهد. برای این که تأثیر خاصیت فوتولومینسانس فسفر در افزایش بازده سلول بیشتر نمایان شود قبل از لایه‌نشانی فسفر، اکسید روی که خاصیت ضد بازتاب دارد بر سطح سلول لایه‌نشانی کردیم تا بازتاب سطح سلول تا حد ممکن کاهش یابد و نقش خاصیت ضد بازتاب فسفر در افزایش بازده به حداقل برسد. با این روش، افزایش بازده حاصل شده از لایه‌نشانی فسفر را می‌توان مرتبط به خاصیت فوتولومینسانس فسفر قرمز دانست. ابتدا ۵۰ nm اکسید روی بر سطح سلول خورشیدی سیلیکونی به روش تبخیر حرارتی فیزیکی گرمایی لایه‌نشانی شد. نتایج اندازه‌گیری بازتاب نوری سطح سلول در شکل ۱. ب آمده است. مشاهده می‌شود که بازتاب سطح سلول کاهش یافته است. مشخصات الکتریکی سلول اندازه‌گیری شد و در جدول ۱ آمده است. نتایج نشان می دهد اکسید روی باعث کاهش بازده سلول به میزان ۲/۹۶ درصد شده است.



شکل ۱. (الف) نمودار چگالی جریان بر حسب ولتاژ قبل و بعد از لایه‌نشانی لایه‌های اکسید روی و فسفر و (ب) بازتاب سطح سلول قبل و بعد از لایه‌نشانی فسفر و اکسید روی.

جدول ۱ . مشخصات سلول خورشیدی قبل و بعد از لایه‌نشانی(لایهٔ فسفر بر سطح لایهٔ اکسید روی لایه‌نشانی شده است).

مادهٔ لایه‌نشانی شده	$J_{sc}(\frac{mA}{cm^2})$	$V_{oc}(V)$	ضخامت مادهٔ لایه‌نشانی شده(nm)	تغییرات بازده(%)	بازده(%)	$J_{mp}(\frac{mA}{cm^2})$	$V_{mp}(V)$
بدون لایه	۱۶/۱۸	۰/۵۴	۰		۵/۸۶	۱۴/۸۸	۰/۳۹
ZnO	۷/۵۸	۰/۵۱	۳۰	-۲/۹۶	۲/۹۰	۷/۳۰	۰/۴۰
P	۱۱/۲۳	۰/۵۲	۶۸	+۱/۰۷	۳/۹۷	۱۰/۰۳	۰/۴۰

سپس ۹۰ nm فسفر قرمز به همان روش تبخیر حرارتی فیزیکی گرمایی بر سطح سلول لایه‌نشانی شد. نتایج اندازه‌گیری بازتاب سطح سلول که در شکل ۱. ب آمده است نشان می‌دهد بازتاب سطح سلول کمی نسبت به قبل افزایش یافته است (هرچند نسبت به حالت بدون لایه، بازتاب سطح سلول هنوز کمتر است). نمودار چگالی جریان بر حسب ولتاژ سلول در شکل ۱. الف و نتایج اندازه‌گیری مشخصات الکتریکی سلول که در جدول ۱ آمده است نشان می‌دهد لایهٔ فسفر باعث افزایش بازده سلول به مقدار ۱/۰۷ درصد (افزایش بازده نسبی حدود ۳۷ درصد) شده است. این افزایش بازده که با وجود افزایش بازتاب سطح سلول رخ داده است را می‌توان به خاطر خاصیت فوتولومینسانس فسفر دانست که با دریافت نور فرابنفش می‌تواند علاوه بر نور مرئی فرابنفش گسیل کند که جذب موثرتری در سلول خورشیدی سیلیکونی دارد.

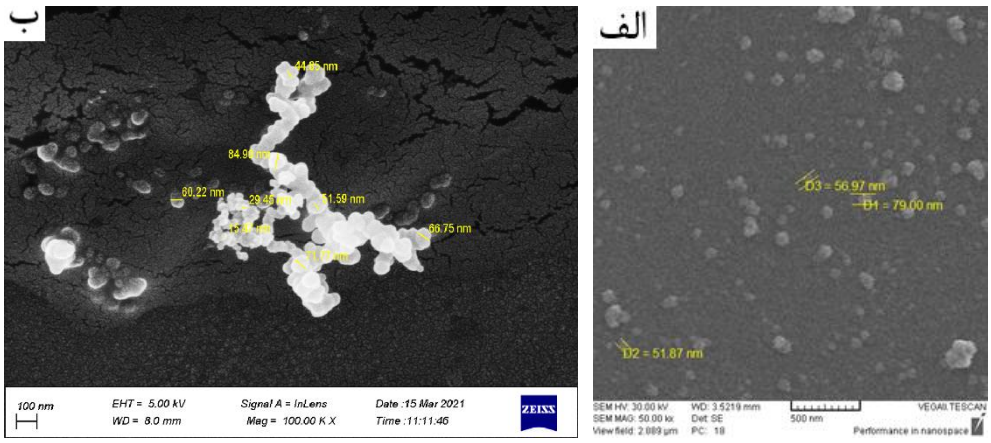
مشخصات سلول‌ها به این صورت است:

$J_{mp}(mA/cm^2)$: چگالی جریان در توان بیشینهٔ خروجی، که با جریان در توان بیشینهٔ خروجی با معادلهٔ $J_{mp} = I_{mp}/A$ مرتبط است(A مساحت سطح سلول است که اندازهٔ آن ۲×۲=۴ cm^2 است).

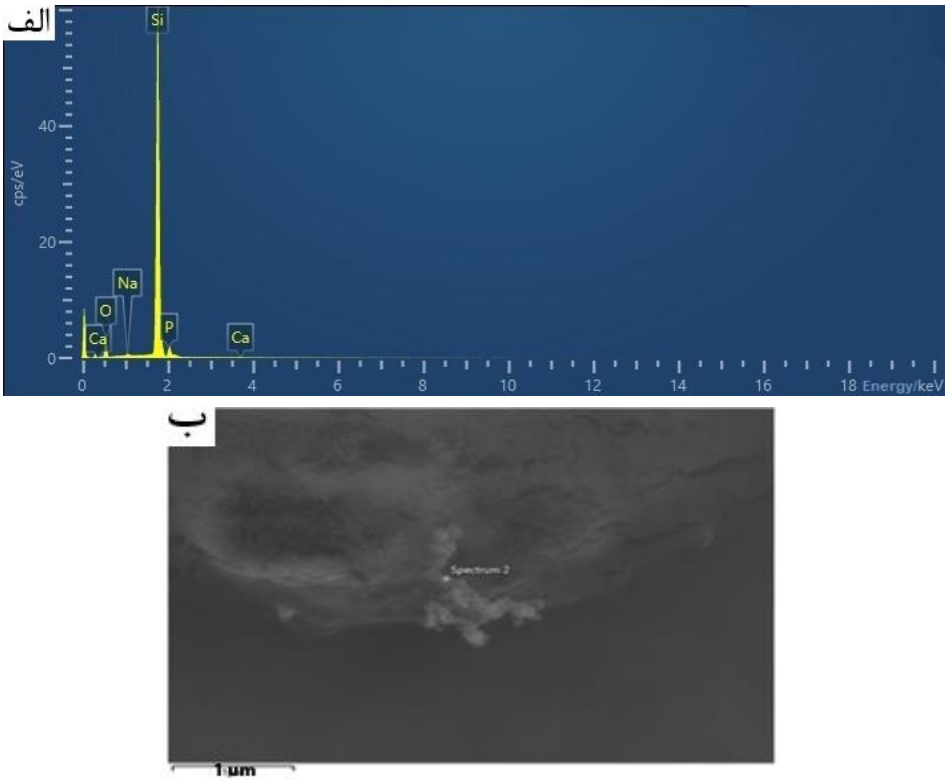
$V_{mp}(V)$: ولتاژ در توان بیشینهٔ خروجی، $J_{sc}(mA/cm^2)$: چگالی جریان اتصال کوتاه، $V_{oc}(V)$: ولتاژ مدار باز، بازده با رابطهٔ (۱) حاصل می‌شود[۱۶].

$$\eta = \frac{V_{oc}\times I_{sc}\times FF}{P_{in}} \qquad (۱)$$

در رابطهٔ (۱) P_{in} شار فرودی بر سلول است و مقدار آن طبق شرایط استاندارد نوری AM1.5G، $1\ kw/m^2$ تنظیم شده است.



شکل۲. (الف) و (ب) تصویر SEM از سطح سلول با لایهٔ فسفر.



شکل۳. (الف) نتیجهٔ آزمایش EDAX از سطح سلول با لایهٔ فسفر و (ب) تصویر SEM از سطح سلول با لایهٔ فسفر (آزمایش EDAX در این ناحیه صورت گرفت).

جدول ۲ . نتیجهٔ آزمایش EDAX از سطح سلول با لایهٔ فسفر.

Element	Line Type	Weight %	Weight% Sigma	Atomic%
O	K series	۲۲/۵۲	۰/۲۸	۳۳/۹۰
Si	K series	۷۲/۵۵	۰/۲۸	۶۲/۲۰
P	K series	۴/۳۷	۰/۱۱	۳/۴۰
Na	K series	۰/۳۶	۰/۰۵	۰/۳۸
Ca	K series	۰/۲۰	۰/۰۵	۰/۱۲
Total		۱۰۰/۰۰		۱۰۰/۰۰

برای مطالعهٔ اثر دانه‌بندی روی سطح نمونه‌ها بر بازده سلول خورشیدی، تصاویر SEM از سطح سلول (شکل۲. الف و ب به عمل آمد. نتایج نشان داد ذرات فسفر در نقاطی جمع شده و در بعضی نقاط خوشه‌هایی تشکیل داده‌اند. نانو ذرات فسفر نقش اساسی در تبدیل نور فرابنفش به مرئی دارند.

با توجه به طیف EDAX (شکل۳. الف و جدول ۲ آشکار است که ناخالصی و کثیفی بر سطح سلول نیست و فقط ذرات فسفر وجود دارند.

۴. جمع‌بندی

نانوذرات فسفر قرمز را به خاطر خاصیت فوتولومینسانس به عنوان ماده‌ای که می‌توان از آن برای افزایش بازده سلول خورشیدی سیلیکونی استفاده کرد معرفی کردیم.

برای اثبات تأثیر خاصیت فوتولومینسانس فسفر در افزایش بازده سلول، ابتدا اکسید روی برای کاهش بازتاب سطحی سلول بر سطح سلول لایه‌نشانی شد و نتایج نشان داد اکسید روی با وجود کاهش بازتاب سطح سلول بازده سلول را کاهش داده است. سپس با لایه‌نشانی فسفر قرمز بر سطح اکسید روی بازتاب سطح سلول افزایش یافت و حدود ۳۷ درصد افزایش بازده نسبی مشاهده شد. (هر چند افزایش بازتاب سطح سلول عاملی برای کاهش بازده است ولی مشاهده شد بازده سلول افزایش یافته است). نانو ذرات فسفر قرمز به دلیل خاصیت فوتولومینسانس، تبدیل نور فرابنفش به مرئی، عامل این افزایش بازده هستند، چون سلول خورشیدی سیلیکونی عکس العمل طیفی بالاتری در طیف مرئی نسبت به فرابنفش دارد. بنابراین نانوذرات فسفر قرمز می‌توانند به خاطر خاصیت تبدیل نور فرابنفش به مرئی برای افزایش بازده سلول خورشیدی سیلیکونی مورد استفاده قرار گیرند.

مراجع

1. K H Raut, H N Chopde, and D W Deshmukh, *IJEEE* **1**, 3 (2018) 1.
2. M T Kibria, A Ahammed, S M Sony, F Hossain, and Shams-Ul-Islam, Proceedings of 5th International Conference on Environmental Aspects of Bangladesh, Bangladesh (2015)
3. A Pattnaik, Shivangi and M Kumar, *Results in Optics* **12** (2023) 100459.
4. C -K Wu, S Zou, C -W Peng, et al., *Journal of Energy Chemistry* **81** (2023) 212.
5. A Pourakbar Saffar and B Deldadeh Barani, *IJRED* **3** , 3 (2014) 184.
6. M F Abdelbar, M Abdelhameed, and M Esmat et al., *Nano Energy* **89** (2021) 106470.
7. M F Abdelbar, M El-Kemary, and N Fukata, *Nano Energy* **77** (2020) 105163.
8. S Chander, A Purohit, A Nehra, et al., *IJRER* **5**, 1 (2015) 41.
9. L Pei, X -K Gong, L Li, et al., *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **675** (2023) 132015.
10. C -K Wu, S Zou, C -W Peng, et al., *Journal of Energy Chemistry* **81** (2023) 212.
11. X Ma, Y Chen, Y Liu, et al., *Optical Materials* **145** (2023) 114501.
12. A Flores-Pacheco, J R Montes-Bojórquez, M E Álvarez-Ramos, et al., *Micro and Nano Engineering* **15** (2022) 100128.
13. M Z Pakhuruddin, Y Yusof, K Ibrahim, et al., *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* **124** , 22 (2013) 5397.
14. B V Shanabrook, S G Bishop and P C Taylor, *Le Journal de Physique Colloques* **42** , C4 (1981) 865.
15. Q Wu, X Liu, B Li, et al., *JMST* **67** (2021) 70.
16. C K Hong, H -S Ko, E -M Han, et al., *NRL* **8** , 1 (2013) 219.