

Research Paper

Red Phosphorus Nanoparticles in the Silicon Solar Cells for Higher Cell Efficiency and Converting the Ultraviolet to Visible Light Wavelength Range¹

Saeed Salehpour²

Received: 2023.11.13

Revised: 2024.03.02

Accepted: 2024.04.05

Abstract

Red phosphorus nanoparticles were synthesized on the surface of the silicon solar cell by PVD technique (condensation on the cell surface from the vapor phase). The red phosphorous deposition on the surface of the cells was repeated several times with different thicknesses of the phosphorous layer, and after each deposition procedure, the efficiency of the silicon solar cell was measured. The obtained results demonstrated that after the deposition of 340 nm of phosphorous, the efficiency of the cell increased from 5.86 to 7.08, and about a 21% relative increase in efficiency was achieved. Moreover, the layers' absorption spectra and photoluminescence spectrum show that red phosphorus nanoparticles absorbed UV light and emitted visible light in addition to UV. In other words, the phosphorous layer has shifted the UV light to the visible light wavelength. In this research, a monocrystalline silicon solar cell was used to increase efficiency, and amorphous red phosphorus was deposited on the surface of the silicon solar cell by the PVD technique. In addition, to perform optical spectroscopy, a glass slide was placed next to the cells in each deposition step. The results of optical spectroscopy of phosphorous layers also showed that the amount of UV light transmission in the sample with a 340 nm phosphorous layer is lower than the sample with a 50 nm phosphorous layer. And vice versa, the amount of UV light absorption is higher, in other words, thicker phosphorous layers pass UV light less and absorb it more.

Keywords: *V Nanoparticles, Silicon Solar Cell, Efficiency, Phosphorus.*

¹ <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.45587.1366>

² Researcher, Shahrood University of Technology, Faculty of Physics, Solid State Physics Department, Shahrood, Iran. Email: sd.salehpour@gmail.com



افزایش بازده سلول خورشیدی سیلیکونی با تبدیل طیف فرابنفش به مرئی با استفاده از نانوذرات فسفر قرمز^۱

سعید صالح پور^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۷

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال چهاردهم، پیاپی ۳۸، پاییز ۱۴۰۳

صص ۶۵ - ۷۴

چکیده:

نانوذرات فسفر قرمز بر سطح سلول خورشیدی سیلیکونی به روش لایه‌نشانی تبخیر حرارتی فیزیکی (چگالش بر روی سطح سلول از فاز بخار) سنتز شد. لایه‌نشانی فسفر قرمز بر سطح سلول‌ها چندین بار با ضخامت‌های مختلفی از لایه‌ی فسفر تکرار شد و بعد از هر مرحله لایه‌نشانی بازده سلول خورشیدی سیلیکونی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که بعد از لایه‌نشانی ۳۴۰ نانومتر فسفر بازده سلول از ۵/۸۶ به ۷/۰۸ درصد افزایش یافته و حدود ۲۱ درصد افزایش بازده نسبی حاصل شده است. علاوه بر آن نتایج طیف جذبی و فوتولومینسانس لایه‌ها نشان داد نانوذرات فسفر قرمز نور فرابنفش را جذب کرده و نور مرئی علاوه بر فرابنفش گسیل کرده‌اند. به عبارت دیگر لایه‌ی فسفر نور فرابنفش را به ناحیه‌ی طول موج مرئی جابجا می‌نماید. در این تحقیق از سلول خورشیدی سیلیکونی تک‌بلوری برای افزایش بازده استفاده شد و فسفر قرمز آمورف به روش تبخیر حرارتی فیزیکی بر سطح سلول خورشیدی سیلیکونی لایه‌نشانی شد. همچنین برای انجام طیف‌سنجی نوری، لام شیشه‌ای در کنار سلول‌ها در هر مرتبه لایه‌نشانی قرار داده شد. نتایج طیف‌سنجی نوری لایه‌های فسفر همچنین نشان داد میزان عبور نور فرابنفش در نمونه‌ی دارای ۳۴۰ نانومتر لایه‌ی فسفر نسبت به نمونه‌ی دارای ۵۰ نانومتر لایه‌ی فسفر کمتر است و برعکس میزان جذب نور بیشتر است، به عبارت دیگر لایه‌های ضخیم‌تر فسفر نور فرابنفش را کمتر عبور می‌دهند و بیشتر جذب می‌کنند.

واژگان کلیدی: نانو ذرات، سلول خورشیدی سیلیکونی، بازده، فسفر.

^۱ <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.45587.1366>

^۲ پژوهشگر، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک حالت جامد، شاهرود، ایران. Email: sd.salehpour@gmail.com



۱. مقدمه

امروزه استفاده از انرژی خورشید موضوعی جذاب است. به دلیل اینکه انرژی ای پاک، در دسترس، رایگان و تجدیدپذیر می باشد. از طرفی سوخت فسیلی دارای معایب بسیاری از جمله ایجاد آلودگی محیطی، تولید گازهای گلخانه ای، گران بودن و تجدیدناپذیری است.

نسل های مختلفی از سلول های خورشیدی تا به امروز معرفی و ساخته شده اند. هدف از معرفی و ساخت سلول های نسل جدید، از یک سو، دست یافتن به بازده های بیشتر و از سوی دیگر کاهش هزینه های تولید است [۱، ۲]. سلول های خورشیدی سیلیکونی یکی از نسل های سلول های خورشیدی هستند که در مقایسه با نسل های جدیدتر رایج تر هستند و سهم قابل توجهی در بازار مصرف دارند. از این روی بهبود بازده این نوع از سلول های خورشیدی از اهمیت کاربردی و اقتصادی برخوردار است.

یکی از دلایل مهم بازده پایین سلول های خورشیدی سیلیکونی ناهماهنگی بین انرژی فوتون فرودی و انرژی شکاف نواری سیلیکون (1.12 eV) است. فوتون های با انرژی کمتر از انرژی شکاف نواری جذب نمی شوند و انرژی اضافی فوتون هایی با انرژی های بالاتر از انرژی شکاف نواری به صورت انرژی جنبشی جفت الکترون - حفره تولید شده در می آید و هدر می رود [۳، ۴].

نسبت حامل های جمع آوری شده به شار فرودی در یک طول موج مشخص را می توان از عکس العمل طیفی بدست آورد. مقدار این کمیت برای سلول های خورشیدی سیلیکونی در ناحیه ی طیف فرابنفش کمتر از مرئی است [۵].

یکی از راه های دستیابی به بازده بالاتر در سلول های خورشیدی سیلیکونی، بهبود فرآیند جذب طیف فرابنفش توسط این سلول ها است. برای رسیدن به این هدف، می توانیم طیف فرابنفش را به طول موج های طیف نور مرئی، که جذب بیشتری در سیلیکون دارند، جابه جا کنیم تا فوتون های ورودی بهتری توسط سلول خورشیدی سیلیکونی جذب شوند [۶، ۷]. برای این منظور می توان از مواد با ویژگی فوتولومینسانس استفاده کرد، به صورتی که این ماده تابش فرابنفش را جذب کند و در ناحیه ی طیفی که سلول عکس العمل طیفی بیشتری دارد نور گسیل کند، در دیگر پژوهش های مشابه راجع به این موضوع از روش های پیچیده و پرهزینه برای این کار استفاده شده است [۸-۱۱، ۱۴-۱۷]. لیو و همکاران [۸]، از نقاط کوانتومی کادمیوم سلناید به عنوان مبدل طیف فرابنفش به مرئی استفاده کردند و بازده سلول را از $14/45$ به $15/87$ درصد افزایش دادند، یعنی افزایش بازده نسبی $9/83$ درصد را بدست آوردند. ژو و همکاران [۱۷]، نانوبلورهای $\text{CsPbCl}_{1.5}\text{Br}_{1.5}:\text{Yb}^{3+}, \text{Ce}^{3+}$ را برای تبدیل طیف استفاده کردند و بازده را از $18/1$ به $21/5$ درصد افزایش دادند که یعنی افزایش



بازده نسبی ۱۸/۸ درصد را بدست آوردند. در پژوهش حاضر روشی ساده و در عین حال کم هزینه آزموده شده است که توانایی اجرا بر روی سلول‌های خورشیدی از پیش ساخته شده را نیز دارد. بدین معنی که نیاز به تغییر مراحل ساخت و ساختار داخلی سلول خورشیدی نیست. همچنین افزایش بازده نسبی حدود ۲۱ درصد را بدست آوردیم که نسبت به پژوهش‌های مشابه پیشین بیشتر است. ما از نانوذرات فسفر قرمز استفاده کردیم که می‌تواند نور فرابنفش را جذب کند و افزون بر فرابنفش، نور مرئی گسیل کند. برای این منظور فسفر قرمز به روش تبخیر حرارتی فیزیکی (چگالش بر روی سطح سلول از فاز بخار) بر روی سطح سلول لایه‌نشانی شد و نانوذرات فسفر قرمز بر روی سطح سلول تشکیل شد. نتایج اندازه‌گیری بازده سلول نشان داد بازده از ۵/۸۶ به ۷/۰۸ درصد افزایش یافته است (۱/۲۲ درصد افزایش بازده). نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در کمترین حالت حدود ۲۱ درصد افزایش بازده نسبی با این روش قابل دستیابی است.

۲. روش کار

در این پژوهش از سلول‌های خورشیدی سیلیکونی تک بلوری استفاده شد و بازده آن‌ها بهبود یافت. ضخامت‌های مختلف فسفر با استفاده از روش تبخیر حرارتی فیزیکی تحت فشار خلاء حدود 10^{-5} بر روی سطح سلول‌ها لایه‌نشانی شد. ضخامت لایه‌های فسفر با استفاده از یک نوسانگر بلور کوارتز حین لایه‌نشانی اندازه‌گیری شد. ابتدا ۵۰ نانومتر فسفر قرمز بر سطح نمونه‌ها لایه‌نشانی شد. سپس نمونه‌ها از دستگاه تبخیر حرارتی خارج و اندازه‌گیری جریان، ولتاژ، بازده سلول و طیف‌سنجی‌های نوری لازم انجام شد. در مرحله بعد، نمونه‌ها برای لایه‌نشانی بیشتر در دستگاه قرار گرفت و به ترتیب ضخامت‌های ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۴۰ نانومتر بر سطح نمونه‌ها نشانده شد. پس از هر مرحله لایه‌نشانی اندازه‌گیری جریان، ولتاژ، بازده سلول و طیف‌سنجی‌های نوری لازم انجام شد. قبل از شروع لایه‌نشانی‌ها، اتصالات اهمی با استفاده از چسب نقره به پشت و روی سلول متصل شدند.

برای انجام مشخصه‌یابی نوری لایه‌های فسفر؛ یک لام شیشه‌ای در محفظه لایه‌نشانی در کنار سلول‌ها قرار داده شد. در هر مرحله لایه‌نشانی همان ضخامت لایه فسفر روی سلول‌ها بر روی لام شیشه‌ای نیز لایه‌نشانی شد. دستگاه طیف‌سنج نوری قبل از انجام مشخصه‌یابی با یک لام تمیز و بدون لایه‌نشانی کالیبره شد. در پژوهش پیش روی از فسفر قرمز آمورف با چگالی $\frac{g}{cm^3}$ ۲/۲ و خلوص

بیش از ۹۷ درصد استفاده شد. پیش از لایه‌نشانی، سطوح سلول‌های خورشیدی سیلیکونی و لام شیشه‌ای با اتانول و استون تمیز شدند تا آلودگی‌های سطحی حذف شوند. مشخصات سلول‌های خورشیدی (جریان، ولتاژ و بازده) قبل و بعد از فرآیند لایه‌نشانی فسفر قرمز تحت شرایط نوری استاندارد AM1.5D با استفاده از شبیه‌ساز خورشیدی NanoSAT-IIIS-210+ اندازه‌گیری شد. جذب و عبور لایه‌های فسفر با استفاده از دستگاه طیف‌سنج نوری SHIMADZU-UV1800 اندازه‌گیری شد.

۳. بحث و نتایج

پس از چهار مرتبه لایه‌نشانی فسفر با ضخامت ۵۰ نانومتر و سپس یک بار لایه‌نشانی فسفر با ضخامت ۱۴۰ نانومتر بر روی سطح سلول X، نام سلول بعد از هر مرحله لایه‌نشانی به صورت X100، X50، X150، X200 و X340 نام‌گذاری شد. مشخصات سلول (جریان، ولتاژ و بازده) بعد از هر مرحله لایه‌نشانی اندازه‌گیری شد (نتایج اندازه‌گیری در جدول (۱) آمده است). نتایج جدول (۱) نشان می‌دهد که بعد از لایه‌نشانی ۳۴۰ نانومتر فسفر بازده سلول از ۵/۸۶ به ۷/۰۸ درصد افزایش یافته است و حدود ۲۱ درصد افزایش بازده نسبی بدست آمده است.

جدول ۱ مشخصات سلول خورشیدی X قبل و بعد از هر لایه‌نشانی.

نام سلول	$V_{mp}(V)$	$J_{mp}(mA/cm^2)$	بازده (%)	تغییرات بازده (%)	ضخامت لایه نشانداده شده (nm)	جمع ضخامت همه لایه‌ها (nm)	$V_{oc}(V)$	$J_{sc}(mA/cm^2)$
X	۰/۳۶	۱۶/۴۷	۵/۸۶	—	۰	۰	۰/۵۵	۲۱/۸۳
X50	۰/۳۹	۱۵/۵۳	۵/۹۸	۰/۱۲+	۵۰	۵۰	۰/۵۱	۲۲/۹۶
X100	۰/۳۶	۱۷/۴۳	۶/۲۹	۰/۳۱+	۵۰	۱۰۰	۰/۵۵	۲۵/۱۷
X150	۰/۳۸	۱۷/۴۰	۶/۵۴	۰/۲۵+	۵۰	۱۵۰	۰/۵۵	۲۳/۲۷
X200	۰/۳۷	۱۷/۷۳	۶/۶۳	۰/۰۹+	۵۰	۲۰۰	۰/۵۵	۲۴/۹۷
X340	۰/۳۸	۱۸/۷۸	۷/۰۸	۰/۴۵+	۱۴۰	۳۴۰	۰/۵۳	۲۳/۲۸

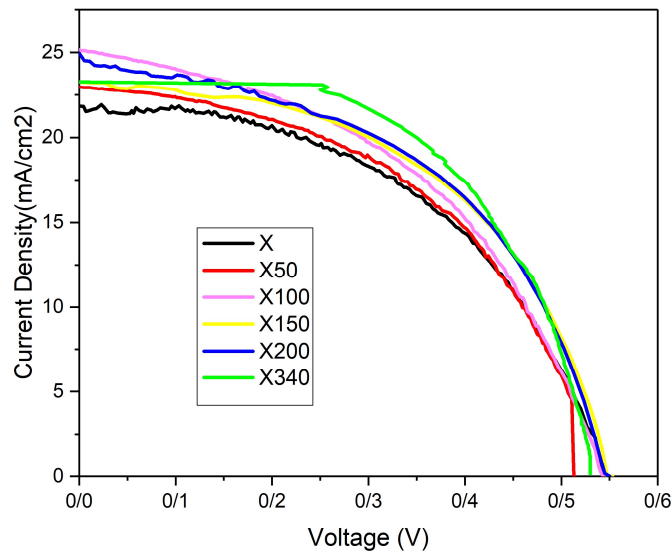


مشخصات سلول‌ها عبارتند از:

- چگالی جریان در توان بیشینه خروجی، این کمیت با جریان در توان بیشینه خروجی بر اساس این معادله $J_{mp} = I_{mp}/A$ ارتباط دارد (A مساحت سطح سلول است که مقدار آن $2 \times 2 = 4 \text{ cm}^2$ می‌باشد).
- ولتاژ در توان بیشینه خروجی، $J_{sc} (mA/cm^2)$: چگالی جریان اتصال کوتاه، $V_{oc} (V)$: ولتاژ مدار باز، بازده با رابطه‌ی زیر بدست می‌آید [۱۲].

$$\eta = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_{in}} \quad (1)$$

در رابطه‌ی بازده P_{in} شار فرودی بر سلول است و مقدار آن 1 kw/m^2 تنظیم شده است که برابر شرایط استاندارد نوری AM1.5D است. همان‌گونه که در شکل (۱) (نمودار چگالی جریان بر حسب ولتاژ سلول) و جدول (۱) مشاهده می‌شود، آشکار است که بازده سلول بعد از هر مرتبه لایه‌نشانی افزایش یافته است.



شکل ۱ نمودار چگالی جریان بر حسب ولتاژ سلول X قبل از لایه‌نشانی و بعد از لایه‌نشانی ۵۰ تا ۳۴۰ نانومتر لایه فسفر.

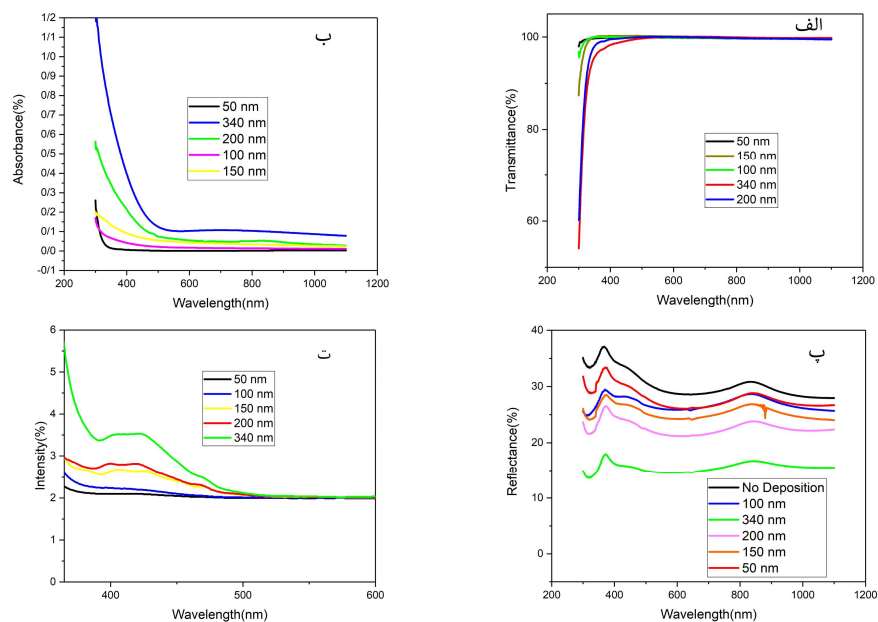
شکل (۲- الف و ب) طیف عبوری و جذبی لایه‌های فسفر به ضخامت ۵۰ تا ۳۴۰ نانومتر را نشان می‌دهد که به روش آزمایش طیف‌سنجی نوری فرابنفش- مرئی اندازه‌گیری شده است. شکل (۲- الف) نشان می‌دهد که لایه‌های فسفر عبور کمتری در طیف فرابنفش نسبت به سایر بخش‌های طیف نور دارند. همچنین لایه‌های فسفر ضخیم‌تر عبور کمتری در ناحیه فرابنفش دارند. لایه‌ی فسفر بخش مرئی و مادون قرمز نور را تا حد زیادی عبور می‌دهد.

طیف جذبی لایه‌های فسفر با ضخامت ۵۰ تا ۳۴۰ نانومتر در شکل (۲- ب) آورده شده است. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که لایه‌های فسفر جذب بیشتری در ناحیه‌ی فرابنفش نسبت به سایر محدوده‌های طول موج طیف نور دارند و لایه‌های ضخیم‌تر فسفر جذب بیشتری در این ناحیه دارند. نتایج کار حاضر با کار قبلی Wu و همکارانش هماهنگی دارد [۱۳].

بازتاب سطحی سلول قبل و بعد از لایه‌نشانی ۵۰ تا ۳۴۰ نانومتر فسفر اندازه‌گیری شد و در شکل (۲- پ) آمده است. این شکل نشان می‌دهد که بازتاب سطحی سلول پس از لایه‌نشانی فسفر کاهش یافته است. این رخداد می‌تواند عاملی برای افزایش بازده سلول باشد.

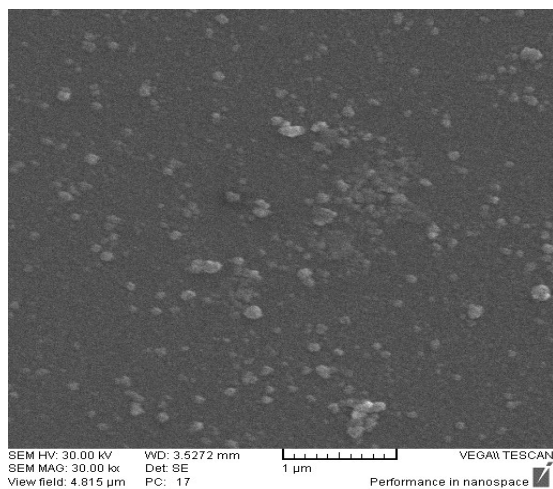
نتایج آزمایش فوتولومینسانس برای لایه‌های فسفر با ضخامت ۵۰ تا ۳۴۰ نانومتر در شکل (۲- ت) آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که لایه‌ی فسفر، گسیل پهنی در ناحیه‌ی فرابنفش و مرئی داشته که در لایه‌های ضخیم‌تر این گسیل شدیدتر است. با توجه به نمودار طیف جذبی شکل (۲- ب) این بدین معنی است که لایه‌ی فسفر نور فرابنفش را جذب کرده است و نور مرئی را افزون بر فرابنفش گسیل می‌کند. در ناحیه‌ی مرئی عکس‌العمل طیفی سلول خورشیدی سیلیکونی بالاتر از ناحیه‌ی فرابنفش است [۵]، بنابراین آشکار است که لایه‌ی فسفر بازده سلول را افزایش می‌دهد.





شکل ۲ (الف) طیف عبوری لایه‌های فسفر با ضخامت ۵۰ تا ۳۴۰ نانومتر، (ب) طیف جذبی لایه‌های فسفر با ضخامت ۵۰ تا ۳۴۰ نانومتر، (پ) بازتاب سطح سلول قبل و بعد از لایه‌نشانی فسفر با ضخامت‌های مختلف (۵۰ تا ۳۴۰ نانومتر)، (ت) نمودار طیف فوتولومینسانس لایه‌ی فسفر با ضخامت ۵۰ تا ۳۴۰ نانومتر

برای مطالعه‌ی اثر دانه بندی روی سطح نمونه‌ها بر بازده سلول خورشیدی، تصویر SEM از سطح سلول (شکل (۳)) تهیه شد. نتایج نشان می‌دهد ذرات فسفر در نقاطی جمع شده و در بعضی نقاط خوشه‌هایی تشکیل داده‌اند. اندازه‌ی ذرات این خوشه‌ها از حدود ۱۵ نانومتر تا حدود ۹۰ نانومتر متغیر است.



شکل ۳ تصویر SEM از سطح سلول با حدود ۵۰ نانومتر لایه ی فسفر.

نانو ذرات نقش کلیدی در تبدیل نور فرابنفش به مرئی دارند. افزون بر آن، این خوشه های نانوذرات که بر روی سطح سلول پراکنده هستند، کمک می کنند تا نور مرئی از میان آن ها عبور کرده و بی واسطه و مستقیم، بدون جذب و پراکنده گی به سطح سلول برسد. اما اگر لایه ی روی سطح سلول یکنواخت باشد، ممکن است نور مرئی را جذب یا پراکنده کند.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش برای افزایش بازده سلول خورشیدی سیلیکونی از نانوذرات فسفر قرمز با ویژگی فوتولومینسانس استفاده شد، که می تواند نور فرابنفش را جذب و در ناحیه ی مرئی و فرابنفش نور گسیل کنند. لایه نشانی فسفر قرمز بر سطح سلول به روش تبخیر حرارتی فیزیکی بازده سلول را از ۵/۸۶ به ۷/۰۸ افزایش داده و حدود ۲۱ درصد افزایش بازده نسبی ایجاد کرده است. این روش ساده و کم هزینه را برای افزایش بازده سلول های خورشیدی سیلیکونی می توان پیشنهاد نمود.

۵. تقدیر و تشکر

از دانشگاه صنعتی شاهرود برای در اختیار دادن وسایل آزمایشگاهی تشکر می کنیم.



منابع

- [1] Bera, S. Mondal S., Majumder A., Paul S., et al., "A potential roadmap on the development, application, and loopholes of metal-organic frameworks in high-performance third-generation solar cells", *Chemistry of Inorganic Materials*, 1, 100024, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cinorg.2023.100024>
- [2] Rahman M. F., Hasan M. K., Chowdhury M., Islam M. R., et al., "A qualitative Design and optimization of CIGS-based Solar Cells with Sn2S3 Back Surface Field: A plan for achieving 21.83 % efficiency", *Heliyon* 9 (12), e22866, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22866>
- [3] Pattnaik A., Shivangi and Kumar M., "Improving the short wavelength response of the multi-crystalline silicon solar cell by using 10% Erbium doped ZnS nanoparticle-based downshifting layer", *Results in Optics* 12, 100459, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2023.100459>
- [4] Wu C.-K., Zou S., Peng C.-W., Gu S.-W., et al., "Improving the UV-light stability of silicon heterojunction solar cells through plasmon-enhanced luminescence downshifting of YVO4:Eu3+, Bi3+ nanophosphors decorated with Ag nanoparticles", *Journal of Energy Chemistry* 81, 212-220, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.01.050>
- [5] Saffar A. P. B., B.D., "Thermal effects investigation on electrical properties of silicon solar cells treated by laser irradiation", *Int. Journal of Renewable Energy Development* 3 (3), 184-187, 2014. <https://doi.org/10.14710/ijred.3.3.184-187>
- [6] Abdelbar M. F., Abdelhameed M., Esmat M., El-Kemary M., et al., "Energy management in hybrid organic-silicon nanostructured solar cells by downshifting using CdZnS/ZnS and CdZnSe/ZnS quantum dots", *Nano Energy* 89, 106470, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106470>
- [7] Abdelbar M. F., El-Kemary M. and Fukata N., "Downshifting of highly energetic photons and energy transfer by Mn-doped perovskite CsPbCl3 nanocrystals in hybrid organic/silicon nanostructured solar cells", *Nano Energy* 77, 105163, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105163>
- [8] Pei L., Gong X.-K., Li L., Ma Z.-H., et al., "3D surface microstructure of silicon modified by QDs to improve solar cell performance through down-conversion and anti-reflection mechanism", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 675, 132015, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132015>
- [9] Wu C.-K., Zou S., Peng C.-W., Gu S.-W., et al., "Improving the UV-light stability of silicon heterojunction solar cells through plasmon-enhanced luminescence downshifting of YVO4:Eu3+, Bi3+ nanophosphors decorated with Ag nanoparticles", *Journal of Energy Chemistry* 81, 212-220, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.01.050>
- [10] Ma X., Chen Y., Liu Y., Zhang X., et al., "Ce3+-Yb3+, Tb3+-Yb3+ and Pr3+-Nd3+-Yb3+ mixed-doped TeO2-ZnO-Na2O glasses for enhancing the efficiency of silicon solar cells", *Optical Materials* 145, 114501, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114501>
- [11] Flores-Pacheco A., Montes-Bojórquez J. R., Álvarez-Ramos M. E. and Ayón A. A., "Down-shifting and antireflective effects of ZnO/PMMA thin films and their influence on silicon solar cells performance", *Micro and Nano Engineering* 15, 100128, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.mne.2022.100128>
- [12] Hong C. K., Ko H.-S., Han E.-M., Yun J.-J., et al., "Enhanced efficiency of dye-sensitized solar cells doped with green phosphors LaPO4: Ce, Tb or (Mg, Zn)Al11O19:Eu", *Nanoscale Research Letters* 8 (1), 219, 2013. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-219>
- [13] Wu Q., Liu X., Li B., Tan L., et al., "Eco-friendly and degradable red phosphorus nanoparticles for rapid microbial sterilization under visible light", *Journal of Materials Science & Technology* 67, 70-79, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.04.084>



- [14] Kamal R. and Hafez H., "Novel Down-converting single-phased white light Pr³⁺-doped BaWO₄ Nanophosphors material for DSSC applications", *Optical Materials* 121, 111646, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111646>
- [15] Luo X., Ahn J. Y. and Kim S. H., "Aerosol synthesis and luminescent properties of CaAl₂O₄:Eu²⁺, Nd³⁺ down-conversion phosphor particles for enhanced light harvesting of dye-sensitized solar cells", *Solar Energy* 178, 173-180, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.029>
- [16] Khurshid S., Latif H., Rasheed S., Sharif R., et al., "Enhancement in absorption spectrum by ITO coated, down converting glass as a photoanode substrate for efficient PbS/CdS quantum dots sensitized ZnO nano-rods array solar cell", *Optical Materials* 124, 111991, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.111991>
- [17] Zhou D., Liu D., Pan G., Chen X., et al., "Cerium and Ytterbium Codoped Halide Perovskite Quantum Dots: A Novel and Efficient Downconverter for Improving the Performance of Silicon Solar Cells", *Advanced Materials* 29, 1704149, 2017. <https://doi.org/10.1002/adma.201704149>



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

