

Investigation of the Effect of Semiconductor and Counter Electrode on the Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells

Mozhgan Hosseinnzhad^{*1}, Kamaladin Gharanjig¹, Mehdi Ghahari², Mohsen Fathi³

1. Department of Organic Colorants, Institute for Color Science and Technology, P.O. Box: 16765-654, Tehran, Iran

2. Department of Nanomaterials and Nanocoatings, Institute for Color Science and Technology, P.O. Box: 16765-654, Tehran, Iran

3. Department of Physics, Shahrood University of Technology, P.O. Box: 36155-316, Shahrood, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 24-08-2024

Accepted: 27-10-2024

Available online: 02-12-2024

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOI: [10.30509/jcst.2024.167373.1238](https://doi.org/10.30509/jcst.2024.167373.1238)

Keywords:

Dye-sensitized solar cells

ZnO

Na-doped TiO₂

MoS₂/GO composite

MoS₂

ABSTRACT

Dye-sensitized solar cells are a good option for producing renewable energy based on converting sunlight into electrical energy. To facilitate the commercialization of this technology, it can be effective to replace expensive parts and reduce the recombination phenomenon. For this purpose, two parts of the semiconductor and the counter electrode were investigated. Semiconductors are used in the photoanode preparation and receive the electron produced by the dye excitation. In this research, two semiconductors, ZnO and Na-doped TiO₂, are selected, and their performance is compared with that of titanium dioxide. Two organometallic dyes with two different electron acceptor groups were prepared as sensitizers. The highest yield was obtained in the presence of organic dye containing cyanoacrylic acid and Na-doped TiO₂, equal to 6.27%. Platinum as the counter electrode is an expensive part of dye-sensitized solar cells. Graphene oxide, its hybrid, and its composite with MoS₂ were investigated to replace platinum. Graphene oxide has weak electrocatalytic properties, which can be solved by using MoS₂. The highest yield was obtained in organic dye containing cyanoacrylic acid, MoS₂/GO composite, and Na-doped TiO₂, equivalent to 6.03%. The results illustrated that MoS₂/GO can be used instead of platinum.

*Corresponding author: * hosseinnzhad-mo@icrc.ac.ir





مطالعه اثر نیمه‌هادی و الکتروود مقابل در بازده سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا

مژگان حسین نژاد^{۱*}، کمال‌الدین قرنجیگ^۲، مهدی قهاری^۲، محسن فتحی^۴

۱- دانشیار، گروه پژوهشی مواد رنگزای آلی، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵۴-۶۵۴

۲- استاد، گروه پژوهشی مواد رنگزای آلی، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵۴-۶۵۴

۳- دانشیار، گروه پژوهشی نانوفناوری رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵۴-۶۵۴

۴- دانشجو، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، صندوق پستی: ۳۶۱۵۵-۳۱۶

چکیده

سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا، یک فناوری کارآمد در تولید انرژی تجدیدپذیر بوده که برای تبدیل نور خورشید به انرژی الکتریکی معرفی شده‌اند. برای تسهیل تجاری‌سازی این فناوری، جایگزینی بخش‌های گران قیمت و کاهش پدیده بازترکیب، می‌تواند موثر باشد. برای این منظور اثر دو بخش نیمه‌هادی و الکتروود مقابل در تهیه سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا مورد بررسی قرار گرفت. نیمه‌هادی‌ها در تهیه فوتوآند مورد استفاده قرار گرفته و الکترون تولید شده در اثر تهییج ماده رنگزا را دریافت می‌کنند. در این پژوهش دو نیمه‌هادی اکسید روی و دی‌اکسید تیتانیم دوپ شده با سدیم انتخاب و عملکرد آن‌ها با دی‌اکسید تیتانیم مقایسه شد. دو ماده رنگزای آلی - معدنی دارای دو گروه الکترون گیرنده مختلف به عنوان حساس‌کننده تهیه گردید. بیشترین بازده در حضور ماده رنگزای دارای گروه سیانوآکرلیک اسید و دی‌اکسید تیتانیم دوپ شده با سدیم و در حدود ۶,۲۷ درصد به دست آمد. پلاتین به عنوان الکتروود مقابل، بخش گران قیمت سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا است. اکسید گرافن، هیبرید و کامپوزیت آن با دی‌سولفید مولیبدن برای جایگزینی پلاتین انتخاب گردید. اکسید گرافن دارای خواص الکتروکاتالیستی ضعیفی بوده که با استفاده از دی-سولفید مولیبدن این محدودیت برطرف می‌گردد. بیشترین بازده در حضور ماده رنگزای دارای گروه سیانوآکرلیک اسید، کامپوزیت MoS_2/GO و دی‌اکسید تیتانیم دوپ شده با سدیم در حدود ۶,۰۳ درصد به دست آمد. نتایج نشان داد که می‌توان از کامپوزیت MoS_2/GO به جای پلاتین در ساختار سلول‌های خورشیدی حساس به مواد رنگزا استفاده کرد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۶

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۳/۰۹/۱۲

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOI: 10.30509/jcst.2024.167373.1238

واژه‌های کلیدی:

سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا

اکسید روی

دی‌اکسید تیتانیم دوپ شده با سدیم

کامپوزیت MoS_2/GO

دی‌سولفید مولیبدن



۱- مقدمه

با توجه به افزایش مصرف انرژی به دلیل توسعه صنعت و افزایش جمعیت، باید روش‌های جدیدی برای تولید انرژی ارائه شود که نه تنها پاسخگوی تقاضای روزافزون انرژی باشد، بلکه موضوع آلودگی سوخت‌های فسیلی و ایجاد ترس از پایان آن را برطرف نماید (۱). استفاده از سوخت‌های فسیلی، دلیل اصلی آلودگی محیط‌زیست و افزایش دمای زمین است که می‌تواند زندگی انسان را دچار مخاطرات جدی کند. انرژی خورشیدی می‌تواند منبع بی‌پایان و مطمئن تولید انرژی بوده و راه حلی برای محدودیت‌ها و مشکلات سوخت‌های فسیلی باشد (۲). تحقیقات نشان می‌دهد که سلول‌های خورشیدی حساس به مواد رنگزا (DSSCs)، به دلیل قیمت مناسب و سهولت ساخت، یک فناوری قابل اعتماد در حوزه دستگاه‌های فوتوولتائیک است که می‌تواند انرژی خورشیدی را به انرژی الکتریکی تبدیل نماید (۳). سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا دارای سه بخش اصلی است که عبارتند از: (۱) الکتروود کار یا فوتوآند که نیمه‌هادی حساس شده به مواد رنگزا بر روی یک زیرآیند هادی است، (۲) زوج احیایی به عنوان الکتروولیت و (۳) الکتروود مقابل. سازوکار عملیاتی سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا براساس پنج مرحله کلیدی دنبال می‌شود که عبارتند از: (۱) جذب نور و تهییج ماده رنگزا که منجر به تولید الکترون می‌شود، (۲) تزریق الکترون از ماده رنگزای تهییج شده به نوار هدایت نیمه‌هادی، (۳) جمع‌آوری بارها در نیمه‌هادی، (۴) جریان الکترون‌ها از طریق مدار خارجی به سمت الکتروود مقابل و (۵) کاهش ماده رنگزا به حالت پایه توسط الکتروولیت برای تهییج مجدد در برابر نور فرودی (۴، ۵). بنابراین نیمه‌هادی و الکتروولیت نقش مهمی در عملکرد نهایی سلول خورشیدی و کسب بازده مناسب دارد.

ویژگی‌های منحصر به فرد پلاتین شامل رسانایی الکتریکی بسیار بالا، ظرفیت جذب مواد و واکنش‌پذیری سطحی خوب، سبب شده که برای تهیه الکتروود مقابل در بسیاری از تحقیقات مورد استفاده قرار گیرد. با این حال پلاتین ماده گران قیمتی بوده که منابع طبیعی محدودی داشته و در برابر خوردگی ناشی از الکتروولیت تری‌پدید حساس است، بنابراین جایگزینی آن توسط مواد کارآمد جدید مورد توجه محققان قرار گرفته است (۶). در یک پژوهش از MoSe_2 دوپ شده با نیکل برای تهیه الکتروودهای مقابل سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا استفاده شد. برای این منظور نسبت‌های مختلفی از نیکل (۰، ۳۶، ۷۲ و ۱۰۸ میلی‌گرم) در شبکه MoSe_2 دوپ شد و اثر آن مورد مطالعه قرار گرفت. بازده سلول خورشیدی در حضور پلاتین و MoSe_2 به ترتیب ۱۳،۸۶ و ۱۴،۲۳ درصد است اما در مقابل استفاده از ۳۶ میلی‌گرم نیکل در شبکه MoSe_2 سبب افزایش بازده تا

۱۴،۱۲ درصد شد. بنابراین حضور نیکل سبب بهبود بازده نهایی سلول خورشیدی می‌شود. بیشترین بازده در حضور ۷۲ میلی‌گرم از نیکل و در حدود ۱۵،۷۸ درصد به دست آمد و با افزایش غلظت نیکل بیش از ۷۲ میلی‌گرم، بازده روند کاهشی نشان داد (۷). تاکنون تحقیقات متعددی برای معرفی یک ترکیب مناسب برای جایگزینی پلاتین منتشر شده است (۶).

چنانکه اشاره شد، نیمه‌هادی در تهیه فوتوآند نقش مهمی دارد و تحقیقات متعددی برای بهینه‌سازی و معرفی ترکیبات جدید انجام شده است (۵). تحقیقاتی بر روی ساخت و بهینه‌سازی الکتروودهای مقابل هیبریدی $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{ZnCo}_2\text{O}_4$ (ZCO) برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی انجام شد. فاز اولیه مکسین از طریق واکنش حالت جامد تهیه شد و سپس با استفاده از روش لایه‌برداری متناوب، هیبرید نهایی تهیه گردید. نسبت‌های وزنی مختلف، شامل ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد برای تهیه هیبرید نهایی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که نسبت ترکیب ۳۰ درصد در ساختار سلول خورشیدی، بازدهی در حدود ۸،۶۱ درصد دارد. در صورتی که در شرایط مشابه و حضور پلاتین به عنوان الکتروود مقابل، بازده ۸،۱۲ درصد است. بهبود بازده سلول خورشیدی، به دلیل افزایش قابل توجه در چگالی جریان ناشی از افزایش فعالیت کاتالیزوری نوری و هدایت الکتروود مقابل تهیه شده است (۸). دی‌اکسید تیتانیم به دلیل هزینه کم و سادگی تولید، ایمنی و پایداری شیمیایی، گزینه مناسبی برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا است. با این وجود یکی از محدودیت‌های آن امکان بازگشت الکترون تهییج یافته تزریق شده به نیمه‌هادی به مولکول ماده رنگزا می‌باشد. بنابراین برای کنترل این محدودیت، مطالعات زیادی بر روی معرفی نیمه‌هادی بهینه از طریق تهیه ریخت‌های متنوع، نیمه‌هادی‌های جدید هیبریدی و کامپوزیتی انجام شده است (۹). نتایج یک پژوهش بر روی تهیه ساختار پوسته-هسته $\text{NaYF}_4:\text{Yb}, \text{Er}@ \text{BiOCl}$ به روش هیدروترمال منتشر شده است. پوسته BiOCl موجب افزایش لبه نوار هدایت نیمه‌هادی تهیه شده می‌شود. در این شرایط، بازده سلول خورشیدی در حدود ۳۰ درصد نسبت به کاربرد دی‌اکسید تیتانیم در بخش نیمه‌هادی افزایش می‌یابد (۱۰). در یک پژوهش نانومیله‌های دی‌اکسید تیتانیم دوپ شده با سدیم به منظور کاربرد در سلول خورشیدی تهیه گردید. برای این منظور از روش هیدروترمال یک مرحله‌ای استفاده شد و نتایج نشان داد ساختار روتایل منفرد تشکیل شده است. بازده سلول خورشیدی با استفاده از نیمه‌هادی جدید رشدی در حدود ۰،۸۷ درصد به دلیل افزایش ولتاژ مدار باز، نشان داد. بازده سلول خورشیدی در حضور دی‌اکسید تیتانیم منفرد و دی‌اکسید تیتانیم دوپ شده به ترتیب ۱،۰۹ و ۱،۵۶ درصد است (۱۱). بنابراین بررسی اثر نیمه‌هادی و الکتروود مقابل می‌تواند تاثیر مهمی در بهبود بازده سلول خورشیدی داشته باشد.

هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر نیمه‌هادی و الکتروود مقابل در

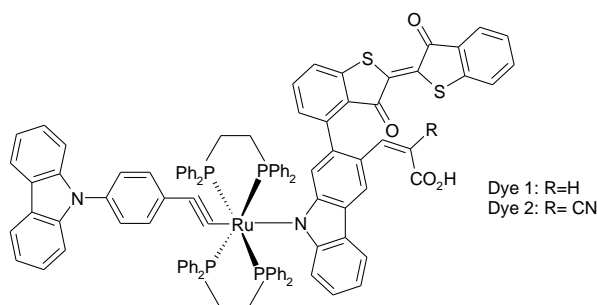
1- Dye-sensitized solar cells (DSSCs)

2- Collection of charges

مسدود کننده فوق نازک TiO_2 آمایش شدند. خمیرهای تهیه شده از نیمه‌هادی‌ها با استفاده از روش تیغه‌ای بر روی زیرآبند لایه نشانی گردید و به صورت تدریجی در دمای 325 درجه سانتی‌گراد (۵ دقیقه)، 375 درجه سانتی‌گراد (۵ دقیقه)، 450 درجه سانتی‌گراد (۱۵ دقیقه) و 500 درجه سانتی‌گراد (۱۵ دقیقه) تحت عملیات پخت قرار گرفت. فیلم‌های به دست آمده با محلول آبی 40 میلی‌مولار $TiCl_4$ در دمای 70 درجه سانتی‌گراد به مدت 30 دقیقه و پس از آن در دمای 500 درجه سانتی‌گراد به مدت 30 دقیقه تیمار شدند. پس از سرد شدن تا دمای 40 درجه سانتی‌گراد، الکتروودها در محلول‌های مواد رنگزا با غلظت 0.4 میلی‌مولار در اتانل حاوی 1 میلی‌مولار چنودی‌اکسی کولیک اسید به عنوان عامل ضدتجمع مشترک غوطه‌ور شدند. غوطه‌وری به مدت 16 ساعت در محیط تاریک برای کسب حداکثر جذب، ادامه یافت. الکتروود فوتوآند و الکتروود مقابل با استفاده از چسب پلیمری سرلین مجتمع شدند. الکتروولیت با اعمال خلأ از طریق سوراخ حفر شده در الکتروود مقابل داخل بدنه سلول قرار داده شد. دستگاه در نهایت با سرلین و پوشش صفحه شیشه‌ای مهر و موم شد. سلول خورشیدی تهیه شده توسط شبیه‌ساز خورشیدی AM1.5G مورد ارزیابی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

ساختار شیمیایی مواد رنگزای مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. در این مواد رنگزا، حضور لیگاند‌های ماکروسیکلیک با پیوندهای چندگانه، سبب بهبود پایداری و خواص فنی محصول است. با استفاده از این لیگاند‌ها و اتصال به بخش وینیلیدین، خواص الکتریکی و واکنش‌پذیری به راحتی قابل کنترل است (۱۵). برم یک ترک‌کننده خوب در واکنش‌های جانشینی بوده که در فرایند تهیه مواد رنگزا مورد استفاده قرار گرفته است. برای تهیه مواد رنگزا از واکنش تراکمی و در نهایت جایگزینی اسید استفاده شد.



شکل ۱: ساختار شیمیایی مواد رنگزای آلی.

Figure 1: Chemical structures of organic dyes.

بازده سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا است. برای این منظور اکسید روی و دی‌اکسید تیتانیوم دوپ شده با سدیم به عنوان نیمه‌هادی و اکسید گرافن، هیبرید و کامپوزیت آن با دی‌سولفید مولیبدن، به عنوان الکتروود مقابل در ساختار سلول خورشیدی مورد مطالعه قرار گرفتند. دو ماده رنگزا بر پایه کمپلکس‌های آلی-معدنی روتنیم با عنوان Dye 1 (دارای گروه آکرلیک اسید به عنوان گروه الکترون‌گیرنده) و Dye 2 (دارای گروه سیانوآکرلیک اسید به عنوان گروه الکترون‌گیرنده) در تهیه سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به دست آمده با دستگاه‌های تهیه شده با پلاتین و دی‌اکسیدتیتانیوم مقایسه شدند.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و تجهیزات

ترکیبات شیمیایی از شرکت مرک تهیه گردید و تمام مواد واسطه و رنگزا براساس روش‌های استاندارد گزارش شده در مقاله قبلی (۱۲) تهیه گردید. اکسید روی و دی‌اکسید تیتانیوم از شرکت فاین‌نانو تهیه شد. فرایند تهیه Na -doped TiO_2 (۱۳)، اکسید گرافن، هیبرید و کامپوزیت آن با دی‌سولفید مولیبدن (۱۴) در مقالات قبلی گزارش شده است. زیرآبند $Fluorine$ -doped tin oxide (FTO)، الکتروولیت و چسب سرلین از شرکت شریف سولار تهیه شد. سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا تحت تابش نور استاندارد AM1.5 و با استفاده از دستگاه مشخصه‌یاب جریان - ولتاژ $Cassy-e524000$ با اندازه غلظت فوتون $5 \times 10^{15} \text{ photon cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ اندازه‌گیری شد.

۲-۲- روش تهیه الکتروود مقابل

روش پوشش افشانه‌ای برای تشکیل لایه‌های نازک نیمه‌هادی‌ها استفاده شد. برای این منظور یک گرم از نیمه‌هادی در 100 میلی‌لیتر اتانل حل شده و 3 قطره تریتون X به آن اضافه شده و کاملاً آسیاب گردید. مخلوط حاصل به مدت 30 دقیقه تحت اولتراسوند قرار گرفت و سپس بر روی بستر شیشه‌ای هادی (FTO) با دمای بستر 150 درجه سانتی‌گراد اسپری شد. بستر پوشش داده شده به مدت 3 ساعت در دمای 300 درجه سانتی‌گراد در اتمسفر آرگون بازپخت شد و برای تهیه سلول‌های خورشیدی نگهداری گردید (۱۳).

۲-۳- روش تهیه سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد

رنگزا

بسترهای شیشه‌ای رسانا با پوشش FTO با استفاده از امواج اولتراسونیک در اتانل به مدت 10 دقیقه تمیز شدند. پس از آن، بسترهای شیشه‌ای رسانا توسط محلول آبی 40 میلی‌مولار $TiCl_4$ در دمای 70 درجه سانتی‌گراد به مدت 30 دقیقه به منظور ایجاد یک لایه

کاتیون‌های فلزی مختلف مانند سربیم، قلع، ایندیم، سدیم و همچنین آنیون‌های غیرفلزی مانند فلورور، بور و نیتروژن گزارش شده است. روش‌های مختلفی مانند رسوب الکتروشیمیایی، سل‌ژل، اسپری پیرولیز و پوشش چرخشی برای سنتز ساختارهای مختلف فوتوآند استفاده شده است (۱۷). در این پژوهش از دو نیمه‌هادی اکسید روی و دی‌اکسید تیتانیم دوپ شده با سدیم برای تهیه سلول خورشیدی در حضور پلاتین به عنوان الکتروود مقابل و مطالعه ویژگی‌های فوتوولتائیک آن استفاده شده است (جدول ۱، شکل ۲).

نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که مقدار چگالی جریان و ولتاژ مدار باز در حضور اکسید روی کمتر از دی‌اکسید تیتانیم بوده و در نتیجه بازده نیز کاهش یافته است. تزریق الکترون از حساس کننده به سمت نیمه‌هادی در حضور اکسید روی آهسته‌تر از دی‌اکسید تیتانیم است (۲۱، ۲۲). از آنجاکه بازده سلول خورشیدی رابطه مستقیم به نرخ تزریق بار و باز ترکیب دارد، بنابراین تزریق آهسته‌تر الکترون در اکسید روی منجر به کاهش چگالی جریان و بازده شده است. در مقابل حضور یون سدیم در ساختار دی‌اکسید تیتانیم سرعت تزریق بار و مقدار چگالی جریان را افزایش داده (۱۷) و در نتیجه بازده سلول خورشیدی بهبود یافته است. سروار^۱ و همکارانش، اثر کاربرد نیمه‌هادی اکسید روی در تهیه سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزای طبیعی را مورد بررسی قرار دادند. آنها دوازده ماده رنگزای طبیعی از طبقه آنتوسیانین از منابع مختلف گیاهی شامل میوه و گل تهیه نموده و به عنوان حساس کننده در ساختار سلول خورشیدی استفاده نمودند. نتایج نشان داد که در بازده تمام دستگاه‌های تهیه شده در حضور اکسید روی کمتر از دی‌اکسید تیتانیم است. بیشترین بازده برای عصاره طبیعی *Tamarindusindica* و معادل ۱,۷۱ درصد به دست آمد (۲۳).

1- Sarwar

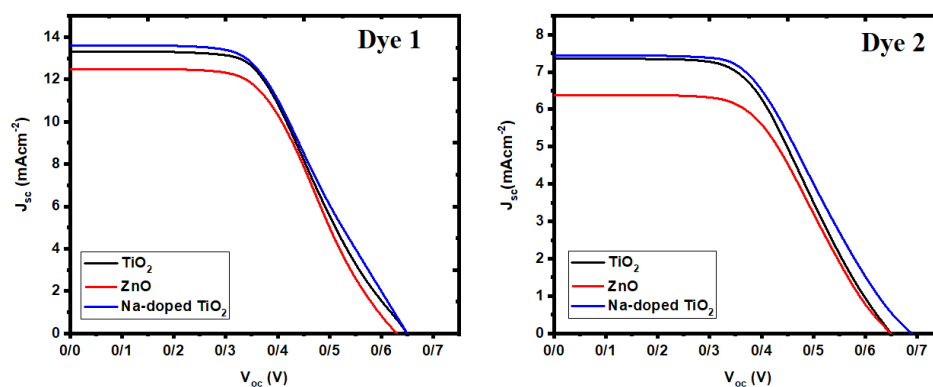
چنین کمپلکس‌هایی گاهی اوقات دارای ساختار مزوحفره بوده که بیشتر برای آلومینیم مشاهده شده اما تشکیل شبکه بلوری مزوحفره در حضور روتنیم گزارش نشده است (۱۶). جزئیات سنتز مواد واسطه و رنگزا و شناسایی آن‌ها پیش از این منتشر شده است (۱۲).

فوتوآند به عنوان یک لایه نانومتخلخل برای جذب مواد رنگزا باید دارای ویژگی‌های مختلفی باشد که عبارتند از الف) شفافیت زیاد برای کاهش اتلاف فوتون‌های دریافت شده، ب) سطح بزرگ برای افزایش بارگذاری ماده رنگزا و در نتیجه جذب نور کارآمد، ج) غیرواکنشی بودن با الکتروولیت برای کاهش سرعت فرایند نوترکیب، د) تحرک زیاد الکترون برای افزایش انتقال الکترون (۱۷). معمولا فوتوآندها با اکسیدهای فلزی مختلف مانند CdS, GaAs, دی‌اکسید قلع، اکسید روی، ترکیب قلع روی (Zn_2SnO_4), دی‌اکسید تیتانیم، و پنتواکسید نیوبیم (Nb_2O_5) ساخته می‌شود. دی‌اکسید تیتانیم به دلیل بارگذاری عالی مواد رنگزا، پایداری شیمیایی، سمیت کم، ماهیت مزوحفره، لبه نوار هدایت بزرگ و مساحت سطح بزرگ آن، مهم‌ترین نیمه‌هادی برای تهیه فوتوآند است (۱۸). اکسید روی همچنین به دلیل رشد ناهمسان‌گرد، تسهیل تبلور و تحرک الکترونی بالاتر نسبت به ساختار دی‌اکسید تیتانیم آاناتاز، گزینه دوم برای کاربرد در تهیه سلول‌های خورشیدی است. با این وجود، کارایی سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا بر پایه دی‌اکسید تیتانیم به عنوان فوتوآند به دلیل پایداری بالای مواد رنگزای اسیدی و سرعت تزریق الکترون سریع‌تر، بهتر است (۱۹). مطالعات مختلف بر روی لایه فوتوآند برای بهبود عملکرد در سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا به منظور بالا بردن خواص الکترونیکی یا نوری فوتوآندها از طریق روش‌های مختلف انجام شده است که عبارتند از ۱) دوپ کردن فوتوآندها، ۲) جایگزینی فوتوآندهای مزوحفره سنتی با نانو مواد یک و یا دو بعدی، ۳) استفاده از روش‌های مختلف ساخت و شرایط ساخت و ۴) اصلاح سطحی با استفاده از لایه‌های مسدود و پراکنده‌کننده (۲۰). دوپ کردن فوتوآندها با

جدول ۱: ویژگی‌های فوتوولتائیک سلول‌های خورشیدی مواد رنگزا در حضور نیمه‌هادی‌های مختلف.

Table 1: Photovoltaic properties of DSSCs in the presence of different semiconductors.

Dye	Photoanode	Counter electrode	JSC (mAcm ⁻²)	Voc (V)	FF (%)	η (%)	Ref.
1	TiO ₂	Pt	7.35	0.69	0.65	3.29	(12)
	ZnO	Pt	6.38	0.65	0.50	2.07	This study
	Na-doped TiO ₂	Pt	7.44	0.67	0.67	3.34	
2	TiO ₂	Pt	13.31	0.66	0.71	6.23	(12)
	ZnO	Pt	12.49	0.63	0.60	4.72	This study
	Na-doped TiO ₂	Pt	13.60	0.65	0.71	6.27	



شکل ۲: نمودار چگالی جریان-ولتاژ مدار باز سلول‌های خورشیدی تهیه‌شده در حضور نیمه‌هادی‌های مختلف.

Figure 2: Photocurrent-photovoltage curve of DSSCs in the presence of different semiconductors.

مواد کربنی، چسبندگی ضعیف به سطح زیرآیند است. از سوی دیگر استفاده از پلیمرهای آلی مختلف، مانند PEDOT، PANI، PProDOT با رسانایی و شفافیت خوب عملکرد بهتری در چسبندگی داشته اما پایداری پایینی دارند. بنابراین، استفاده از ترکیبات فلزات واسطه مانند اکسیدهای فلزی، کاربیدها، نیتrideها و سولفیدها در ترکیب با مواد کربنی می‌توانند محدودیت‌های چسبندگی را بهبود داده و پایداری مناسبی نیز ارائه دهند. در میان آن‌ها، سولفیدهای فلزی به دلیل هزینه کم، فراوانی طبیعی، رفتار الکتروکاتالیزوری خوب و مقاومت در برابر خوردگی بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند. اخیراً، سولفیدهای فلزی به شکل ترکیبات سه تایی مانند $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ، CuInS_2 ، CoMoS_4 و NiMoS_4 به دلیل مکان‌های فعال زیاد و واکنش‌های اکسایش کاهش ساده نسبت به ترکیبات دوتایی مشابه، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. روش‌های مختلف شیمیایی مربوط برای تهیه الکترودهای شمارنده برپایه سولفیدهای فلزی گزارش شده و اغلب از فرایندهای چندمرحله‌ای استفاده شده است (۲۵، ۲۴). در این پژوهش از اکسید گرافن، همبند و کامپوزیت آن با دی‌سولفید مولیبدن (۱۴) به عنوان الکترومدار مقابل استفاده شده و عملکرد آن در سلول خورشیدی ارزیابی گردیده است (جدول ۲ و شکل ۳).

یک الکترومدار مقابل جدید با استفاده از WS_2/MoS_2 طراحی گردید (۲۶) که به دلیل عملکرد الکتروکاتالیزوری بالا و خواص انتقال بار، برای کاربرد در ساختار سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا پیشنهاد شدند. بیشترین بازده به دست آمده در حدود ۷,۳۰ درصد با استفاده از ماده رنگزای N3 گزارش شد. بازده سلول خورشیدی در حضور WS_2 و MoS_2 به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که استفاده از WS_2/MoS_2 به ترتیب ۲۵ و ۱۸ درصد بازده سلول خورشیدی را بهبود می‌دهد. استفاده از این ترکیب در مقایسه با پلاتین نیز عملکرد بهتری داشته و بازده در حدود ۳,۵ درصد افزایش نشان می‌دهد. این دستاوردها به دلیل افزایش سطح فعال ترکیب کامپوزیتی و افزایش چگالی جریان بار است (۲۶).

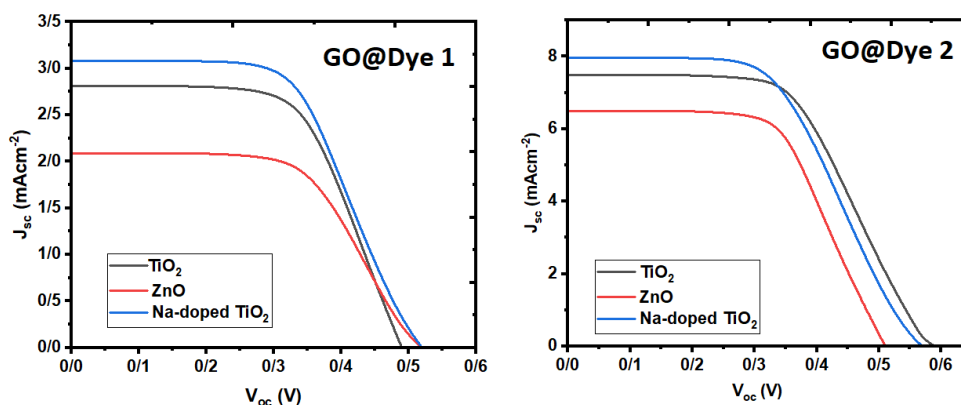
بررسی نتایج نشان می‌دهد که کاربرد اکسید روی، سبب کاهش بازده سلول خورشیدی در تمام طبقه‌های مواد رنگزا شامل ترکیبات آلی، معدنی و طبیعی است. در مقابل دوپ کردن دی‌اکسیدتیتانیم با یون‌های فلزی سبب افزایش سرعت تزریق بار و کاهش پدیده بازترکیب شده و مقدار چگالی جریان را بهبود می‌دهد (۲۰). این دستاورد می‌تواند در بهبود بازده سلول‌های خورشیدی مبتنی بر مواد رنگزای طبیعی، که خود دارای بازده کمی هستند، اثر قابل توجهی داشته باشد. عصاره گل *Kigelia Africana*، از طبقه فلاونوئید به عنوان حساس‌کننده در تهیه سلول خورشیدی مورد استفاده قرار گرفت. در دستگاه‌های مورد نظر از دی‌اکسید تیتانیم دوپ‌شده با سدیم تهیه شده به روش هیدروترمال تک‌مرحله‌ای، به عنوان نیمه‌هادی استفاده شد. ساختار بلوری آن توسط روش XRD مورد ارزیابی قرار گرفت و تشکیل ساختار فاز روتایل منفرد تایید گردید. بازده سلول خورشیدی از ۱,۰۹ درصد در حضور دی‌اکسیدتیتانیم به ۱,۵۶ درصد در حضور Na-doped TiO_2 افزایش یافت (۱۱).

تحقیقات نشان می‌دهد که پلاتین به دلیل رسانایی الکتریکی بالا و فعالیت الکتروکاتالیستی عالی در برابر سیستم اکسایش کاهش دید/تری‌دید، به عنوان الکترومدار در ساختار سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا، دارای عملکرد عالی است. با این حال، کاربرد آن برای دستگاه‌های مقیاس بزرگ و تجاری‌سازی فناوری سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا، به دلیل کمبود طبیعی منابع پلاتین، هزینه بالا و تجزیه آسان به PtI_4 توسط الکترولیت دید/تری‌دید قابل توجه نیست. بنابراین، جستجوی مواد جدید برای کاربرد در الکترومدار مقابل و حذف پلاتین ضروری است. تاکنون، جایگزین‌های مختلفی مانند مواد کربن‌دار، پلیمرهای رسانا و ترکیبات فلزات واسطه برای جایگزینی پلاتین گران‌قیمت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. استفاده از مواد کربنی در اشکال مختلف مانند گرافن، نانولوله‌های کربنی، کربن مزوخره و کربن سیاه کارایی قابل مقایسه‌ای با پلاتین از خود نشان داده است. با این حال، مشکل اصلی مرتبط با

جدول ۲: ویژگی‌های فوتوولتائیک سلول‌های خورشیدی مواد رنگزا در حضور الکتروودهای مقابل مختلف.

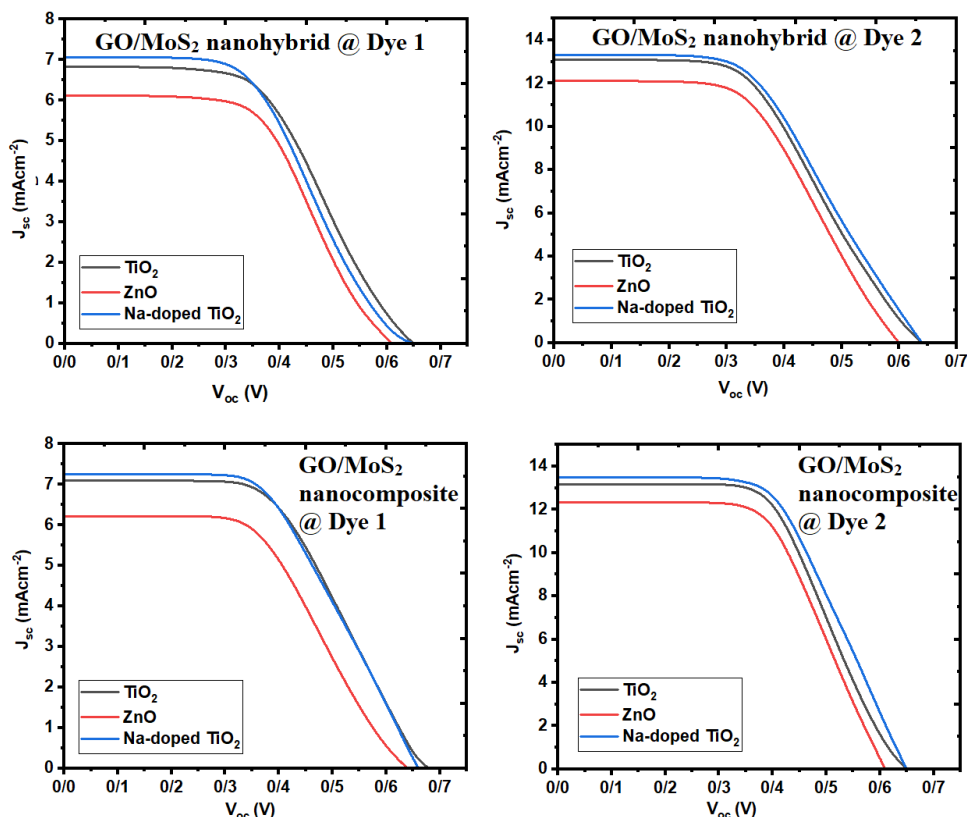
Table 2: Photovoltaic properties of DSSCs in the in the presence of different counter electrode.

Dye	Photoanode	J_{sc} (mAcm ⁻²)	V_{oc} (V)	FF (%)	η (%)
Counter electrode: GO					
1	TiO ₂	2.81	0.49	0.56	0.77
	ZnO	2.09	0.51	0.50	0.53
	Na-doped TiO ₂	3.08	0.52	0.61	0.97
2	TiO ₂	7.49	0.59	0.61	2.69
	ZnO	6.50	0.51	0.55	1.83
	Na-doped TiO ₂	7.96	0.57	0.63	2.86
Counter electrode: GO/MoS ₂ nanohybrid					
1	TiO ₂	6.82	0.65	0.66	2.92
	ZnO	6.11	0.61	0.50	1.86
	Na-doped TiO ₂	7.06	0.66	0.65	3.03
2	TiO ₂	13.08	0.64	0.69	5.77
	ZnO	12.10	0.60	0.60	4.35
	Na-doped TiO ₂	13.32	0.64	0.69	5.89
Counter electrode: GO/MoS ₂ nanocomposite					
1	TiO ₂	7.09	0.68	0.65	3.14
	ZnO	6.22	0.64	0.50	1.99
	Na-doped TiO ₂	7.25	0.66	0.66	3.16
2	TiO ₂	13.18	0.65	0.70	5.99
	ZnO	12.34	0.61	0.60	5.42
	Na-doped TiO ₂	13.48	0.64	0.70	6.03



شکل ۳: نمودار چگالی جریان - ولتاژ مدار باز سلول‌های خورشیدی تهیه شده در حضور الکتروودهای مقابل مختلف.

Figure 3: Photocurrent-photovoltage curve of DSSCs in the in the presence of different counter electrode.



شکل ۳: ادامه.

Figure 3: Continue.

و تخلخل ساختار بهبود می‌یابد. در نهایت بازده سلول خورشیدی در حضور $\text{MoS}_2/\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{MWCNTs}$ و پلاتین در حدود ۸٫۲۷ و ۷٫۲۳ درصد گزارش شد که نشان می‌دهد بازده به دست‌آمده در حضور کامپوزیت سه‌گانه بالاتر از پلاتین است. در ترکیب سنتز شده، فاصله نوار کمتر، منجر به هدایت الکتریکی بالاتر و مقاومت انتقال بار کمتر شده که نقش مهمی در بهبود بازده سلول خورشیدی دارد (۲۸). در این پژوهش هیبرید و کامپوزیت اکسید گرافن و دی‌سولفید مولیبدن برای کاربرد در سلول خورشیدی مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۲). اکسید گرافن عملکرد ضعیفی در ساختار سلول خورشیدی داشته که به دلیل خواص الکتروکاتالیزوری ضعیف آن است. در مقایسه با اکسید گرافن، استفاده از هیبرید یا کامپوزیت آن با دی‌سولفید مولیبدن در ساختار سلول خورشیدی، منجر به افزایش مقدار چگالی جریان شده که ناشی از مقاومت انتقال بار کمتر نسبت به اکسید گرافن خالص است (۱۴). در نتیجه بازده تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی بهبود یافته است. نانوصفات دی‌سولفید مولیبدن، باعث افزایش تولید یون تری‌یدید شده و ارتباط بین الکتروولیت و الکتروود مقابل بهبود می‌یابد (۲۹). بنابراین بازده سلول‌های خورشیدی مبتنی بر هیبرید یا کامپوزیت اکسید گرافن/دی‌سولفید مولیبدن، تا ۹۵ درصد مشابه بازده

در پژوهش دیگری از کامپوزیت‌های نانوساختار NiS/MoS_2 به عنوان یک جایگزین مقرون به صرفه برای الکتروود مقابل سلول خورشیدی استفاده شد. در این کامپوزیت از ترکیب نانوسیم‌های سولفید نیکل و نانوذرات دی‌سولفید مولیبدن برای افزایش انتقال بار و تخلخل به منظور کاربرد در الکتروود مقابل سلول خورشیدی استفاده شد. بازده سلول خورشیدی تهیه شده با استفاده از سولفید نیکل، دی‌سولفید مولیبدن و کامپوزیت آن‌ها به ترتیب ۵٫۸۸، ۶٫۸۳ و ۸٫۸ درصد است. این بهبود بازده به دلیل افزایش مقدار چگالی جریان بار است (۲۷). عملکرد فوتوولتائیک سلول‌های خورشیدی با حضور کامپوزیت دوگانه و سه‌گانه $\text{MoS}_2/\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{MWCNTs}$ و $\text{MoS}_2/\text{Ni}_3\text{S}_2$ به عنوان الکتروود مقابل مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا $\text{MoS}_2/\text{Ni}_3\text{S}_2$ با استفاده از روش هیدروترمال تهیه و در ادامه نانولوله‌های کربنی (MWCNTs) با روش فراصوت بر روی $\text{MoS}_2/\text{Ni}_3\text{S}_2$ قرار داده شدند. نتایج نشان داد که کامپوزیت سه‌گانه تهیه شده دارای توانایی انتقال الکترون بالا، فعالیت‌های کاتالیزوری قابل توجه و پایداری خوب در الکتروولیت بوده و برای کاربرد در ساختار سلول خورشیدی مناسب است. از طرف دیگر قرارگیری MWCNTs بر روی $\text{MoS}_2/\text{Ni}_3\text{S}_2$ سبب کاهش فاصله باندی تا ۲٫۷۹ الکترون‌ولت شده

۶,۲۷ درصد به دست آمد. به منظور کاهش هزینه‌های تولید سلول خورشیدی، حذف پلاتین و جایگزینی آن با سه ترکیب مختلف شامل اکسید گرافن، هیبرید MoS₂/GO و کامپوزیت MoS₂/GO مورد ارزیابی قرار گرفت. رسانایی و فعالیت کاتالیزوری هیبرید/کامپوزیت MoS₂/GO بهتر از MoS₂ و GO خالص است. سلول‌های مبتنی بر هیبرید یا کامپوزیت MoS₂/GO عملکردی مشابه (در حدود ۹۰ درصد) با عملکرد دستگاه‌های مبتنی بر پلاتین ارائه کردند. بیشترین بازده در حضور ماده رنگزای ۲، کامپوزیت MoS₂/GO و Na-doped TiO₂ و معادل ۶,۰۳ درصد به دست آمد. به عبارت دیگر می‌توان از کامپوزیت MoS₂/GO به جای پلاتین استفاده کرد. بنابراین، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که می‌توان سلول‌های خورشیدی ارزان قیمت (به دلیل حذف پلاتین)، با کارایی مناسب (به دلیل استفاده از یون فلزی در ساختار دی‌اکسید تیتانیم) تهیه کرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از حمایت پژوهشگاه رنگ برای انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

دستگاه‌های مبتنی بر پلاتین است که می‌تواند گزینه خوبی برای جایگزینی پلاتین باشد. مقایسه دو ماده رنگزای ۱ و ۲ نشان می‌دهد که در حضور تمام الکتروودهای مقابل، بازده ماده رنگزای ۲ بیشتر از ماده رنگزای ۱ است. این نتیجه به دلیل حضور گروه سیانوآکرلیک اسید به عنوان بخش الکترون‌گیرنده و محل اتصال به سطح نیمه‌هادی می‌باشد. این استخلاف نسبت به آکرلیک اسید، برهم‌کنش موثرتری با انواع نیمه‌هادی‌های مورد مطالعه داشته و انتقال الکترون تولید شده را تسهیل می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

دو ماده رنگزا با استفاده از روتینیم و ساختار آلی- معدنی برای بررسی اثر نیمه‌هادی و الکتروود مقابل انتخاب گردید. برای بررسی اثر نیمه‌هادی، اکسید روی و دی‌اکسید تیتانیم دوپ‌شده با سدیم انتخاب گردید و عملکرد آن با دی‌اکسید تیتانیم بررسی شد. نتایج نشان داد که مقدار چگالی جریان و ولتاژ مدار باز در حضور اکسید روی کمتر از دی‌اکسید تیتانیم بوده و در نتیجه بازده نیز کاهش یافته است اما در مقابل، حضور سدیم در ساختار دی‌اکسید تیتانیم موجب افزایش سرعت تزریق بار و کاهش پدیده بازترکیب شده و مقدار چگالی جریان افزایش یافته و در نتیجه بازده بیشتر خواهد شد. بیشترین بازده در حضور ماده رنگزای ۲ و Na-doped TiO₂ و معادل

۵- مراجع

- ShirahmadHaghighi S, Jafari R, Hosseinnezhad M. Colour gamut analysis of low-cost dye-sensitized solar cells using natural dyes. *Color Technol*. 2024; In Press. <https://doi.org/10.1111/cote.12767>.
- Saud PS, Bist A, Kim AA, Yousef A, Abutaleb A, Park M, Park SJ, Pant B. Dye-sensitized solar cells: Fundamentals, recent progress, and Optoelectrical properties improvement strategies. *Opt Mater*. 2024;150:115242. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115242>.
- Hosseinnezhad M, Nasiri S, Nutalapati V, Gharanjig K, Arabi AM. A review of the application of organic dyes based on naphthalimide in optical and electrical devices. *Prog Color Colorant Coat*. 2024;17(4):417-433. <https://doi.org/10.30509/pccc.2024.167247.1267>.
- Conradie J. Effective dyes for DSSCs—Important experimental and calculated parameters. *Energy Nexus*. 2024;13:100282. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2024.100282>.
- Iman RN, Youna M, Harrabi K, Mekki A. A comprehensive review on advancements and optimization strategies in dye-sensitized solar cells: Components, characterization, stability and efficiency enhancement. *Inorg Chem Commun*. 2024; 165:112488. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112488>.
- Azahar AA, Nurhafizah MD. A short review on surpassing Pt with alternative counter electrodes and GQD enhancement in counter electrode. *Synthetic Metal*. 2024;307:117685. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2024.117685>.
- Qasim MT, Abdullaeva B, Sapaev IB, Al-kharsan IH, Asalamy A. A novel Pt-free counter electrode based on MoSe₂ for cost effective dye-sensitized solar cells (DSSCs): Effect of Ni doping. *J Phys Chem Solid*. 2023;182:111597. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2023.111597>.
- Al-Zoubi OH, Eti M, Benites CR, Alhadrawi M, Kunamneni R, Fouly A, Awwad EM, Kumar A, Kareem AH. Fabrication of innovative ZnCo₂O₄/Ti₃C₂T_x MXene nanocomposite counter electrode to replace Pt in dye-sensitized solar cells and improve solar cell performance. *Mater Sci Semicconduct Proc*. 2024;181:108663. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.108663>.
- Agrawal A, Siddiqui SA, Soni A, Sharma GD. Advancements, frontiers and analysis of metal oxide semiconductor, dye, electrolyte and counter electrode of dye sensitized solar cell. *Sol Energy*. 2022;233:378-407. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.01.027>.
- Hao S, Shang Y, Hou Y, Chen T, Lv W, Hu P, Yang C. Enhance the performance of dye-sensitized solar cells by constructing upconversion-core/semiconductor-shell structured NaYF₄:Yb,Er@BiOCl microprisms. *Sol Energy*. 2021; 224: 563-568. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.090>.
- Shalini S, Prabavathy N, Balasundaraprabhu R, Satish Kumar T, Velauthapillai D, Balraju P, Prasanna S. Studies on DSSC encompassing flower shaped assembly of Na-doped TiO₂ nanorods sensitized with extract from petals of *Kigelia Africana*. *Optik*. 2018;155:334-343. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.10.173>.
- Hosseinnezhad M, Nasiri S, Nutalapati V, Gharanjig K, Nunzi JM. Introduction thioindigo as new high stability unit in Ru-complex for DSSCs: Theoretical and photovoltaic investigation. *Opt Mater*. 2024;150:115273. <https://doi.org/>

10. 1016/j.optmat.2024.115273.
13. Hosseinezhad M, Ghahari M, Shaki H, Movahedi J. Investigation of DSSCs performance: the effect of 1,8-naphthalimide dyes and Na-doped TiO₂. *Prog Color Colorant Coat.* 2020;13(3):177-185. <https://doi.org/10.30509/pccc.2020.81625>.
14. Mobarhan G, Zolriasatein A, Ghahari M, Jalili M, Rostami M. The enhancement of wear properties of compressor oil using MoS₂ nano-additives. *Adv Powder Technol.* 2022; 33: 103648. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2022.103648>.
15. Baskaran P, Nisha KD, Harish S, Ikeda H, Archana J, Navaneethan M. Enhanced catalytic performance of Cu₂ZnSnS₄/MoS₂ nanocomposites based counter electrode for Pt-free dye-sensitized solar cells. *J Alloy Compound.* 2022; 894:162166. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162166>.
16. Che CM, Ho CM, Huang JS. Metal-carbon multiple bonded complexes: carbene, vinylidene and allenylidene complexes of ruthenium and osmium supported by macrocyclic ligands. *Coord Chem Rev.* 2007;251(17-20):2145-2166. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2007.03.019>.
17. DeSousa Ducasse S, Kauffmann B, Toupance T, Olivier C. Functionalization of a ruthenium-diacetylide organometallic complex as a next-generation push-pull chromophore. *Chem Eur J.* 2014;20:1-9, <https://doi.org/10.1002/chem.201304611>.
18. Mohammadian-Sarcheshmeh H, Arazi R, Mazloum Ardakani M. Application of bifunctional photoanode materials in DSSCs: A review. *Renew Sustain Energy Rev.* 2020;134: 10249. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110249>
19. Bakhshayesh AM, Farajisafiloo N. Efficient dye-sensitized solar cell based on uniform In-doped TiO₂ spherical particles. *Appl Phys A.* 2015;120:199-206. <https://doi.org/10.1007/s00339-015-9150-z>.
20. Mazloum-Ardakani M, Arazi R, Haghshenas M, Tamaddon F, Alizadeh M. Synthesis of 2-amino-4-(4-(methylamino)phenyl)-6-phenylnicotinonitrile as a new additive for the passivation of the TiO₂ surface and retarding recombination in dye-sensitized solar cells. *Electrochim Acta.* 2018;266:452-459. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.02.011>.
21. Karim NA, Mehmood U, Zahid HF, Asif T. Nanostructured photoanode and counter electrode materials for efficient dye-sensitized solar cells (DSSCs). *Sol Energy.* 2019;185:165-188. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.057>.
22. Babar F, Mehmood U, Asghar H, Hassan Mehdi M, Khan AH, Khalid H, Huda N, Fatima Z. Nanostructured photoanode materials and their deposition methods for efficient and economical third generation dye-sensitized solar cells: A comprehensive review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020; 129:109919. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109919>.
23. Sarwar N, Ghaffar R, Shahzad M, Javed K, Munam M, Siddiq Z, Pervez A, Khan MZ, Saleem M, Koh JH, Ghaffar A. Synergistic photovoltaic performance of DSSCs based on ZnO charge transport layers, counter electrodes and *C. annuum* and *T. indica* as natural dyes. *Mater Sci Eng B.* 2024; 307: 117543. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117543>.
24. Subalakshmi K, Ashok Kumar A, Paul OP, Saraswathy S, Pandurangan A, Senthilselvan J. Platinum-free metal sulfide counter electrodes for DSSC applications: Structural, electrochemical and power conversion efficiency analyses. *Sol Energy.* 2019;193:507-518. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.075>.
25. Azahar AA, Nurhafizah MD. A short review on surpassing Pt with alternative counter electrodes and GQD enhancement in counter electrode. *Synth Metal.* 2024;307:117685. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2024.117685>.
26. Guo F, Narukullapati BK, Mohammed KJ, Altimari US, Abed AM, Yan Z, Ahmad N, Dwijendra NKA, Sivaraman R, Abdulkadhim AH. New material for addressing charge transport issue in DSSCs: Composite WS₂/MoS₂ high porosity counter electrodes. *Sol. Energy.* 2022;243:62-69. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.07.020>.
27. Ayaz M, Hijji M, Alatawi AS, Namazi MA, Mohamed Ershath MI. Enhancing photovoltaic performance in dye-sensitized solar cells using nanostructured NiS/MoS₂ composite counter electrodes. *Mater Sci Semiconduct Proc.* 2024;173:108172. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.108172>.
28. Norouzbazaz M, Gholivand MB, Taherpour AA. Design and construction of MoS₂/Ni₃S₂ nanosheets decorated on multi-walled carbon nanotubes as a sustainable counter electrode for dye-sensitized solar cells: An experimental and computational investigation. *J Phys Chem Solid.* 2024;193:112168. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2024.112168>.
29. Hosseinezhad M, Ghahari M, Mobarhan G, Rouhani S. Towards low cost and green photovoltaic devices: Using natural photosensitizers and MoS₂/Graphene oxide composite counter electrodes. *Opt Mater.* 2023;139:113775. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.113775>.

How to cite this article:

Hosseinezhad M, Gharanjig K, Ghahari M, Fathi M. Investigation of the Effect of Semiconductor and Counter Electrode on the Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells. *J Color Sci Tech.* 2024;18(3):181-190. <https://doi.org/10.30509/jcst.2024.167373.1238> [In Persian].