

مقاله پذیرفته شده

عنوان مقاله: تاثیر نقره بر بهبود عملکرد فوتوآند $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$ در سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا

نویسندگان: سمیرا فلاح دوست مقدم، ندا گیلانی، علی اکبر یوسفی

شماره مقاله: JCST-2503-1252

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳-۱۲-۱۱

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴-۰۳-۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴-۰۳-۱۱

این فایل pdf مقاله ویرایش نشده است که برای چاپ پذیرفته شده است. مکت مقاله توسط دفتر نشریه علوم و فناوری رنگ تهیه شده و قبل از چاپ برای ویرایش نهایی به نویسنده مسئول مقاله ارسال می شود.

Accepted Manuscript

Title: Effect of Silver on Enhancing the Performance of $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$ Photoanode in Dye-Sensitized Solar Cells

Authors: Samira Fallahdoust Moghadam, Neda Gilani, Ali Akbar Yousefi

To appear in: Journal of Color Science and Technology

Receives date: 01-03-2025

Revises date: 26-05-2025

Accepted date: 01-06-2025

Please cite this article as:

Fallahdoust Moghadam S, Gilani N, Yousefi AA. Effect of Silver on Enhancing the Performance of $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$ Photoanode in Dye-Sensitized Solar Cells. J Color Sci Tech. (2025): JCST-2503-1252.

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form.



تأثیر نقره بر بهبود عملکرد فوتوآند $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$ در سلول خورشیدی حساس شده به مواد

رنگزا

سمیرا فلاح دوست مقدم^۱، ندا گیلانی^{۱*}، علی اکبر یوسفی^{۲*}

^۱گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

^۲گروه انرژی، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران

چکیده

سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا (DSSC) به دلیل پدیده نوترکیبی الکترون‌ها در محل اتصال اکسید رسانا و الکترولیت، با محدودیت‌هایی در دستیابی به بازده بالا مواجه هستند. در این پژوهش، برای افزایش راندمان DSSC از دوپینگ نانوذرات TiO_2 با نانوساختارهای WO_3 و نقره استفاده شده است. نتایج نشان داد که استفاده از این ترکیب در ساخت فوتوآند موجب کاهش پدیده نوترکیبی الکترون‌ها و بهبود بازده تبدیل توان سلول خورشیدی می‌شود. تحلیل ریخت‌شناسی نانوذرات سنتز شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR) انجام گرفت. یافته‌های این مطالعه نشان دادند که فوتوآند مبتنی بر نانوساختار سه‌گانه $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$ عملکرد بهتری در مقایسه با فوتوآندهای ساخته شده از TiO_2 ، WO_3 و $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$ خالص دارد. به طور مشخص، سلول دارای فوتوآند $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$ به چگالی جریان اتصال کوتاه (J_{sc}) معادل 13.63 mA/cm^2 و راندمان تبدیل توان برابر 6.87% درصد دست یافت. در مقابل، سلول‌های ساخته شده با فوتوآندهای TiO_2 ، WO_3 و $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$ خالص به ترتیب بازده‌هایی برابر با 3.171% ، 0.93% و 5.631% درصد را نشان دادند. کلمات کلیدی: نقره، سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا، نانوساختار، دوپینگ، $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$.

Effect of Silver on Enhancing the Performance of $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$ Photoanode in Dye-Sensitized Solar Cells

Samira Fallahdoust Moghadam¹, Neda Gilani^{1*}, Ali Akbar Yousefi^{2*}

Abstract

Dye-sensitized solar cells (DSSCs) face limitations in achieving high efficiency due to the electron recombination phenomenon at the conductive oxide-electrolyte interface. In this study, to enhance the efficiency of DSSCs, doping TiO_2 nanoparticles with WO_3 nanostructures and silver was employed. The results revealed that utilizing this combination in the fabrication of the photoanode reduces electron recombination and improves the power conversion efficiency of the solar cells. Morphological analysis of the synthesized nanoparticles was carried out using scanning electron microscopy (SEM) and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). The findings of this study showed that the photoanode based on the $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$ ternary nanostructure exhibited better performance compared to photoanodes made of pure TiO_2 , WO_3 , and $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$. Specifically, the cell with the $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$ photoanode achieved a short-circuit current density (J_{sc}) of 13.63 mA/cm^2 and a power conversion efficiency of 6.87% . In contrast, cells made with photoanodes of pure TiO_2 , WO_3 , and $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$ demonstrated power conversion efficiencies of 3.171% , 0.93% , and 5.631% , respectively.

Keywords: Silver, DSSC, Nanostructure, Doping, $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$.

برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان راه‌حلی ضروری و بنیادین مطرح شده‌اند. استفاده از انرژی خورشیدی، بی‌شک، یکی از مؤثرترین راه‌ها برای حل بحران انرژی در جهان است. سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا^۱ (DSSCs) به دلیل هزینه کم، انعطاف پذیری، سهولت تولید، راندمان تبدیل انرژی نسبتاً بالا و سمیت کم برای محیط زیست، به‌عنوان نامزدهای امیدبخش برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی مورد توجه قرار می‌گیرند (۱). تلاش‌های بسیاری برای ساخت DSSC های کارآمدتر با معرفی اجزای جدید مانند الکترولیت‌ها، رنگ‌ها، الکترودهای شمارنده و فوتوآندهای نیمه‌رسانا انجام شده است (۲). در میان این اجزا، فوتوآند نقشی حیاتی در تعیین عملکرد این نوع سلول خورشیدی ایفا می‌کند. تاکنون، دی اکسید تیتانیوم^۲ (TiO_2)، به دلیل هزینه کم، سهولت ساخت، راندمان تبدیل انرژی نسبتاً بالا و سطح ویژه زیاد، یکی از متداول‌ترین مواد مورد استفاده در فوتوآندها بوده است (۳، ۴). با این حال، محدودیت اصلی استفاده از TiO_2 به‌عنوان فوتوآند مربوط به انتقال تصادفی الکترون‌ها است؛ این ویژگی باعث فرآیند نوترکیبی الکترون-حفره شده و عملکرد مؤثر دستگاه را محدود می‌کند. برای رفع این مشکل، طراحی فوتوآندی با مسیر انتقال بار کارآمد که بتواند حامل‌های نوری تزریق‌شده را به جمع‌کننده جریان منتقل کند، رویکردی مؤثر برای بهبود عملکرد DSSC ها محسوب می‌شود (۵). با هدف دستیابی به این اصلاحات، تغییرات سطحی TiO_2 از طریق دوپینگ فلزی، کوپلینگ با نیمه‌هادی‌ها و هیبریداسیون با مواد کربنی انجام شده که نتایج امیدوارکننده‌ای را ارائه داده است (۶). علاوه بر TiO_2 ، اکسیدهای فلزی دیگری مانند اکسید روی (ZnO)، تری‌اکسید تنگستن (WO_3)، اکسید نیوبوم (Nb_2O_5) و اکسید قلع (SnO_2) نیز به‌طور گسترده به‌عنوان مواد فوتوآند مورد بررسی قرار گرفته‌اند (۷-۱۰). در این میان، WO_3 به دلیل شباهت سطوح انرژی آن با TiO_2 توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است؛ این ویژگی باعث افزایش علاقه به ترکیب این دو ماده شده است. علاوه بر این، شکاف انرژی نسبتاً متوسط تری‌اکسید تنگستن (۲/۶ eV) امکان جذب تقریباً ۱۲٪ از نور خورشید در ناحیه مرئی را فراهم می‌کند (۱۱). در مقایسه با TiO_2 ، تری‌اکسید تنگستن از تحرک الکترونی بالاتر و لبه نوار هدایت مثبت‌تری (در حدود ۰/۵ ولت) برخوردار است. ادغام WO_3 با TiO_2 ، ساختار الکترونیکی را از طریق معرفی نوارهای انرژی جدید و یا همپوشانی باندهای موجود تغییر داده و در نتیجه موجب کاهش شکاف انرژی TiO_2 می‌شود (۱۲). این شکاف انرژی کاهش یافته، امکان جذب طیف گسترده‌تری از طول‌موج‌های نور، از جمله نور مرئی را فراهم می‌کند. در یک مطالعه، چنگ^۳ و همکاران برای اولین بار با استفاده از نانوذرات تجاری WO_3 به‌عنوان فوتوآند، به بازده ۰/۷۵٪ دست یافتند که این بازده پس از انجام اصلاحات سطحی به ۱/۴۶٪ افزایش یافت (۱۳). در پژوهشی دیگر، پرابه^۴ با استفاده از یک کامپوزیت TiO_2 - WO_3 به‌عنوان فوتوآند، به حداکثر بازده ۵/۰۳٪ دست یافت (۱۴). همچنین، یانگ^۵ با ترکیب TiO_2 و WO_3 به بازدهی حتی بیشتر از ۵/۴۷٪ رسید (۱۵). این پیشرفت‌ها نشان‌دهنده پتانسیل قابل‌توجه کامپوزیت‌های WO_3 در بهبود عملکرد DSSC ها است. تحقیقات همچنین نشان داده‌اند که نانوکامپوزیت TiO_2 - WO_3 در مقایسه با مواد خالص TiO_2 و WO_3 دارای خواص فوتوالکتروشیمیایی برتری است (۱۳). علاوه بر این، اصلاح TiO_2 با فلزات نجیبی مانند طلا (Au)، نقره (Ag)، و پلاتین (Pt) به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای جلوگیری از بازترکیب جفت‌های الکترون-حفره ناشی از تابش نور در فوتوآندهای DSSC گزارش شده است (۱۶-۱۸). این روش‌ها به طور گسترده در حال تحقیق و توسعه برای بهبود بازدهی سلول‌های خورشیدی هستند. نانوذرات نقره با افزایش جذب نور و بهبود ضریب جذب مواد رنگزا، عملکرد این سلول‌ها را ارتقاء می‌بخشند. این بهبود عملکرد ناشی از تشدید پلاسمون سطحی است (۱۹، ۲۰). علاوه بر این، فلزات نجیب می‌توانند به‌عنوان محل

^۱Dye-sensitized solar cells

^۲Titanium dioxide

^۳tungsten oxide

^۴Cheng

^۵Prabhu

^۶Yang

تجمع الکترون‌ها برای حامل‌های بار تولید شده توسط نور عمل کنند، انتقال بار سطحی را بهبود ببخشند و بازترکیب بار را به حداقل برسانند. این ویژگی منجر به بهبود انتقال الکترون در DSSC می‌شود (۲۱). از میان این رویکردها، افزودن نانوذرات فلزی به فوتوالکترود TiO_2 می‌تواند با القای پلاسمای سطحی موضعی، جذب نوری را افزایش دهد (۲۲). این نانوذرات همچنین از طریق تشکیل موانع شاتکی در فصل مشترک فلز-نیمه رسانا، بازترکیب الکترون‌ها را کاهش داده و با بازتاب و پراکندگی نور تابیده، مسیر نوری را افزایش می‌دهند. این اثرات در نهایت به تشکیل شبکه انتقال الکترون منتهی می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که نانوذرات نقره با اندازه‌های ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر بیشترین کاربرد را برای این اهداف دارند (۲۳). مطالعه آساهی^۷ و همکاران نشان داد که دوپینگ TiO_2 ظرفیت جذب نور و فعالیت فوتوکاتالیستی آن در نور مرئی را به‌طرز چشمگیری افزایش می‌دهد (۲۴). کاظمی^۸ و همکاران نانوکامپوزیت‌های نقره و TiO_2 را با نسبت‌های متفاوت سنتز کردند و نتایج بهبود توانایی جذب مواد رنگزا، افزایش چگالی جریان و بازدهی سلول را نشان دادند (۲۵). در مطالعه دیگری، گوپتا^۹ و همکاران اثرات TiO_2 دوپ‌شده با نقره را به‌عنوان یک فوتوآند در عملکرد DSSC مورد بررسی قرار دادند. این تحقیق نشان داد که راندمان کلی تبدیل انرژی تا ۴۰ درصد بهبود یافته است (۲۶). علاوه بر این، گزارش‌ها نشان داده‌اند که راندمان تبدیل توان برای سلول‌های مبتنی بر Ag-TiO_2 تا حدود ۷۰ درصد افزایش یافته است. لازم به ذکر است که دوپینگ نقره، علاوه بر هزینه کم، دارای تابع کاری بالاتری نسبت به سطح فرمی TiO_2 است و شکاف انرژی آن به شکل مؤثرتری تنظیم می‌شود. مطالعه چانگ^{۱۰} و همکاران نشان داد که فوتوآند TiO_2 دوپ شده با Ag نه‌تنها قادر به تشکیل ساختارهای متخلخل است، بلکه این ساختارها به جذب مؤثرتر مواد رنگزا کمک می‌کنند. راندمان تبدیل توان در سلولی که از این فوتوآند استفاده شده بود، حدود ۶/۰۶٪ گزارش شد (۲۷). از سوی دیگر، دوپینگ TiO_2 با WO_3 به‌دلیل توانایی آن در کاهش شکاف انرژی و گسترش محدوده جذب نور به ناحیه مرئی، به‌عنوان یک روش مؤثر برای بهبود خواص فتوولتائیک شناخته شده است. ترکیب این نانوساختارها می‌تواند خواص نوری و الکتریکی TiO_2 را بهبود دهد. به‌ویژه، رسوب هم‌زمان نقره بر روی TiO_2 دوپ‌شده با WO_3 ، به دلیل اثرات هم‌افزایی میان نقره و نیمه‌رساناها، خواص فتوولتائیک بهبودیافته‌ای را نشان داده است. در حالی که تحقیقات پیشین به تأثیر دوپینگ TiO_2 با WO_3 و نقره بر بهبود خواص الکتریکی و نوری اشاره کرده‌اند، این مطالعات عمدتاً بر کاربردهای فوتوکاتالیستی یا زمینه‌های دیگر پژوهش متمرکز بوده‌اند و استفاده از این ترکیب به‌طور خاص در DSSC‌ها بررسی نشده است (۲۸، ۲۹). در این پژوهش، برای نخستین‌بار از نانوکامپوزیت TiO_2 - WO_3 دوپ‌شده با Ag به‌عنوان فوتوآند در DSSC استفاده شد تا تأثیر آن بر کاهش نوترکیبی الکترون و افزایش راندمان تبدیل توان بررسی شود. به‌منظور دستیابی به این هدف، نانوکامپوزیت TiO_2 - WO_3 همراه با مقدار مشخصی از نقره به روش هیدروترمال سنتز شد و ویژگی‌های ساختاری آن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه، عملکرد سلول خورشیدی حساس‌شده به مواد رنگزا مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و خواص فتوولتائیک بهبودیافته آن گزارش شد.

۲ روش‌ها

۲-۱ مواد شیمیایی و تجهیزات

مواد شیمیایی مورد استفاده در این مطالعه از شرکت مرک (Merck) خریداری شدند. این مواد شامل سدیم تنگستات دهیدراته ($\text{Na}_2\text{WO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)، نیترات نقره، سدیم کلرید (NaCl)، اسید هیدروکلریک (۳۷٪ HCl) و اتانول (۹۹/۸٪) بودند. شیشه پوشش‌داده‌شده با اکسید قلع دوپ‌شده (ITO)، ماده رنگزای روتنیم (N719)، یدید پتاسیم (KI)، یدید (I_2) و ۴-تربت بوتیل پیریدین (TBP) از شرکت سان‌لب ایران تهیه شدند. دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2)، آناتاز، ۱۰-۲۵ نانومتر نیز از شرکت نانومواد تحقیقاتی ایالات متحده خریداری شد. پلی‌اتیلن گلیکول (PEG)، تریتون X-100 از شرکت سیگما آلد ریچ تهیه شدند.

۲-۲ تجهیزات

^۷Asahi

^۸Kazmi

^۹Gupta

^{۱۰}Chang

مقاله پذیرفته شده

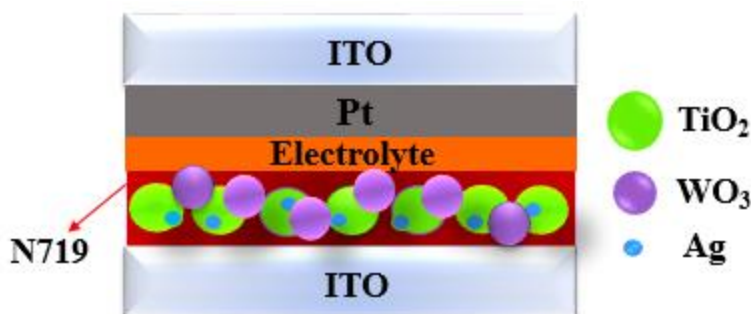
مورفولوژی سطح نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM، مدل VEGA/TESCAN جمهوری چک) مورد بررسی قرار گرفت. طیف FTIR در محدوده $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ با استفاده از طیف سنج (FTIR، مدل Shimadzu) ثبت شد. مشخصات جریان-ولتاژ (I-V) با استفاده از شیشه ساز خورشیدی (شریف سولار) اندازه گیری شد. عملکرد سلول خورشیدی با استفاده از شیشه ساز خورشیدی مجهز به منبع نور استاندارد AM 1/5 و شدت نور 100 mW/cm^2 مورد ارزیابی قرار گرفت. مشخصه‌های فوتولتائیک، شامل نمودار جریان-ولتاژ (I-V)، با استفاده از یک دستگاه آنالایزر ثبت شدند. برای افزایش دقت داده‌ها، سه دستگاه DSSC مشابه تحت شرایط یکسان ساخته و عملکرد آن‌ها به طور جداگانه اندازه‌گیری شد. داده‌های مربوط به بازده تبدیل انرژی، جریان مدار کوتاه (Jsc)، و ولتاژ مدار باز (Voc) برای هر دستگاه جمع‌آوری شدند و میانگین مقادیر به‌دست‌آمده به‌عنوان نتایج نهایی گزارش شد.

۳-۲ ساخت نانوکامپوزیت

ابتدا نانوساختار $\text{WO}_3\text{-TiO}_2$ به روش هیدروترمال سنتز شد. به این صورت که، سدیم تنگستات دو آبه در وزن $0/3$ گرم با سدیم کلرید در آب مقطر حل شد. مخلوط به مدت ۱ ساعت هم زده شد. سپس، pH محلول با استفاده از محلول ۲ مولار اسید هیدروکلرید روی مقدار ۲ تنظیم گردید. $0/3$ گرم دی‌اکسید تیتانیم به محلول اضافه شده و محلول مجدداً هم زده شد. پس از پراکندگی به داخل اتوکلاو فولادی ضد زنگ با پوشش تفلون ۲۵۰ میلی لیتری منتقل شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای 140°C درجه سانتی گراد نگهداری شد (کنترل دما به صورت غیرمستقیم انجام شد؛ به این ترتیب که اتوکلاو درون آون قرار گرفته و دمای آون از بیرون و مطابق مقدار تعیین‌شده تنظیم و کنترل گردید. لازم به ذکر است که کنترل pH پیش از شروع فرآیند و در مرحله آماده‌سازی محلول‌های اولیه انجام شد، چراکه در طول واکنش به دلیل فشار و دمای بالا، دسترسی مستقیم به محیط داخلی راکتور امکان‌پذیر نبود). پس از پایان فرآیند، به اتوکلاو اجازه داده شد تا به طور طبیعی تا دمای اتاق خنک شود. نانوساختار به دست آمده سپس سانتریفیوژ شد، با آب مقطر شسته شد و در دمای 60°C درجه سانتی گراد خشک شد تا نانوکامپوزیت $\text{WO}_3\text{-TiO}_2$ به دست آید. برای ساخت نانوکامپوزیت $\text{Ag-WO}_3\text{-TiO}_2$ ، مقدار ۵ میلی گرم از نیترات نقره با نیمه رسانای $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$ ۲ تا ۱ ساعت در دمای محیط و در نسبت وزنی $50-50$ از حلال اتانول و آب هم‌زده شد. پس از پراکندگی به داخل اتوکلاو فولادی ضد زنگ با پوشش تفلون ۲۵۰ میلی لیتری منتقل شد و به مدت ۴ ساعت در دمای 180°C درجه سانتی گراد نگهداری شد. برای تهیه خمیر، $48/4$ درصد وزنی از نیمه‌رسانا، $5/6$ درصد وزنی پلی‌اتیلن گلیکول (PEG)^۱ و 45 درصد وزنی اتانول با یکدیگر مخلوط شدند. این ترکیب به مدت ۱۵ دقیقه در دمای 60°C درجه سانتی گراد تحت هم‌زدن قرار گرفت و نگهداری شد. سپس، جهت بهبود پراکندگی ذرات و جلوگیری از تجمع آن‌ها، 1 درصد وزنی تریتون X-100 به عنوان سورفاکتانت به مخلوط اضافه شد.

۴-۲ ساخت سلول خورشیدی

برای ساخت لایه نازک $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$ ، خمیر تهیه‌شده با استفاده از روش دکتر بلید بر روی شیشه رسانای ITO (با عبور 80 درصد نور در ناحیه مرئی) پوشش داده شد. پس از آن، فیلم‌های آماده‌شده به مدت 30 دقیقه در دمای 450°C درجه سانتی‌گراد آنیل شدند. برای تهیه سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا، الکترودها به مدت 24 ساعت در دمای اتاق در محلول رنگ N719 غوطه‌ور گردیدند. پس از شست‌وشو با اتانول بی‌آب و خشک شدن، الکترودها با پوشش پلاتین بر روی فوتوآنود قرار داده شد و لبه‌های سلول با یک ورق آب‌بندی، مهر و موم شدند. شکل ۱ ساختار سلول خورشیدی را نشان می‌دهد.



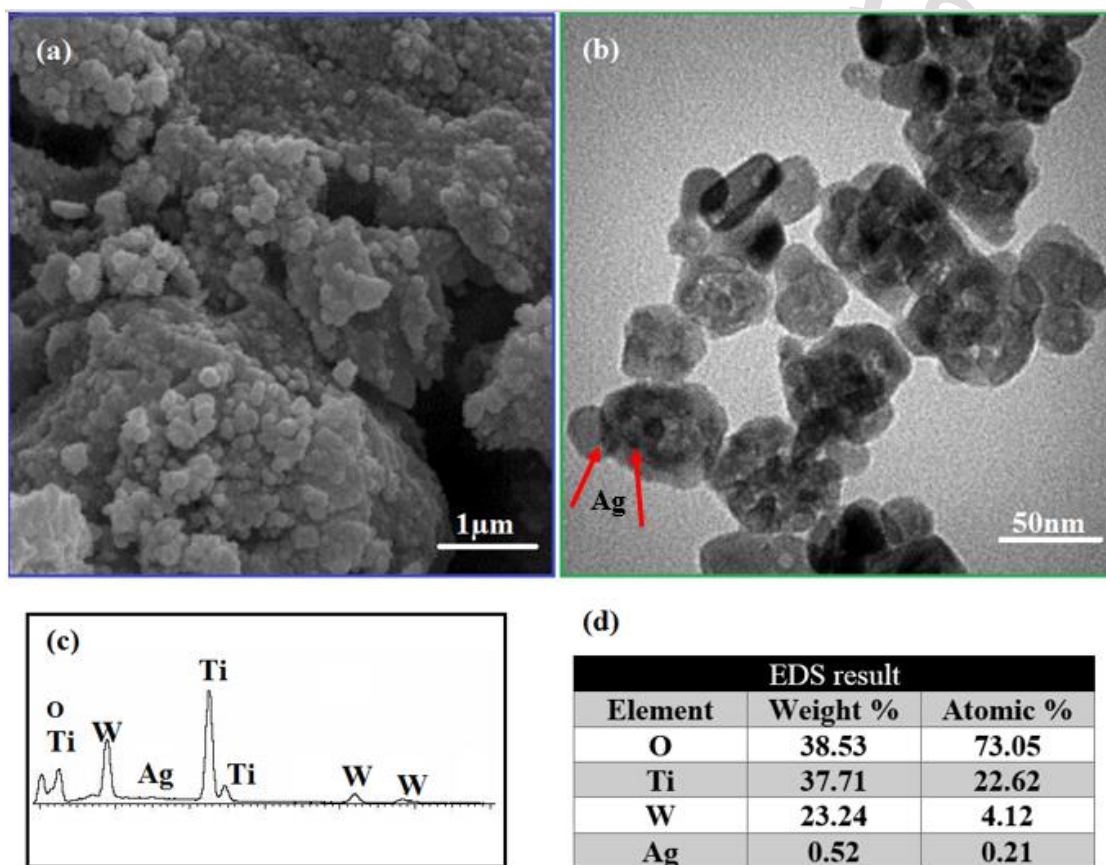
^۱Polyethylene glycol

شکل ۱. سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا با لایه نازک $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$.
Figure 1. Dye-sensitized solar cell based on $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$ thin film.

۳ بحث و نتایج

۳-۱ مورفولوژی نانوساختار

مورفولوژی نانوساختار $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$ در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که در تصویر SEM مشاهده می شود، نمونه $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$ دارای اندازه ذراتی در بازه ۵۰ تا ۱۰۰ نانومتر است و ذرات به خوبی پراکنده شده اند (شکل ۲ الف). تصویر TEM از نانوذرات $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$ در شکل ۲ ب ارائه گردیده که نشان می دهد اندازه ذرات نقره بسیار ریز است. همچنین مشاهده می شود که نانوذرات نقره با $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$ برهمکنش دارند، به طوری که بیشتر نانوذرات نقره درون $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$ قرار گرفته و تعداد کمی از آنها در اطراف $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$ توزیع شده اند. نتایج طیفسنجی پراکندگی انرژی (EDS) نمونه $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$ نیز نشان می دهد که عناصر W ، Ti و Ag در نمونه حضور دارند و هیچ عنصر ناخالصی دیگری شناسایی نشده است (شکل ۲ ج و د). ذرات ریز با سطح ویژه بالا، مکان های فعال تری را برای تسهیل انتقال بار فراهم می کنند.



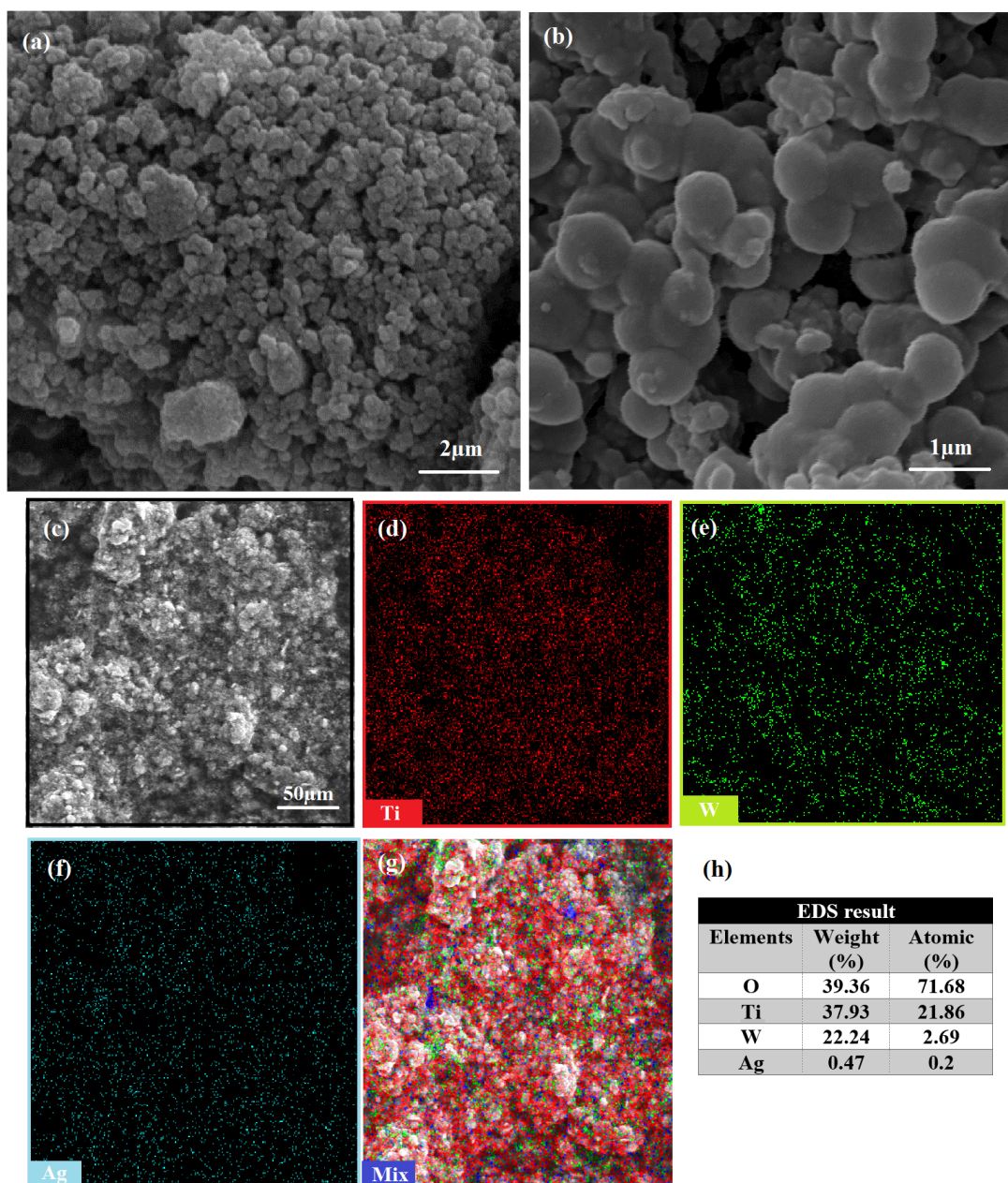
شکل ۲. (الف) تصویر SEM نانوساختار $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$ ، (ب) تصویر TEM، (ج و د) آنالیز EDS
Figure 2. a) SEM image of $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$ nanostructure, b) TEM image, c and d) EDS analysis.

۳-۲ مورفولوژی ITO پوشش داده شده با خمیر $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$

تصاویر ۳ (الف-ج) جزئیات سطح لایه ی پوشش داده شده با $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$ را با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نمایش می دهند. تصویر ۳ (الف) در مقیاس ۲ میکرومتر، گویای ساختار دانه ای و متخلخل است که ذرات با پراکندگی نسبتاً یکنواخت روی سطح قرار گرفته اند و این موضوع سبب افزایش سطح ویژه ی پوشش می شود. در تصویر ۳ (ب) با بزرگنمایی بالاتر (۱ میکرومتر)، جزئیات بیشتری از ذرات قابل مشاهده

مقاله پذیرفته شده

است؛ به طوری که این ذرات عمدتاً به شکل کروی و بدون ترک یا تجمع غیرعادی ظاهر شده‌اند که نشان‌دهنده پیوستگی و کیفیت مناسب پوشش است. همچنین تصویر ۳ (ج) با بزرگ‌نمایی پایین‌تر (۵۰ میکرومتر) توزیع وسیع‌تر و یکنواختی مطلوب سطح پوشش را نشان می‌دهد و نبود نواحی خالی یا تجمعات ناخواسته را تأیید می‌کند که حاکی از موفقیت فرآیند لایه‌نشانی بر بستر ITO است. علاوه بر این، آنالیز EDS در تصاویر ۶ (ج-ز) توزیع عناصر اصلی یعنی تیتانیوم، تنگستن و نقره را بر روی سطح نشان می‌دهد. جدول ارائه‌شده در تصویر (ح) نتایج کمی EDS را از نظر درصد وزنی و اتمی عناصر بیان می‌کند. طبق داده‌های این جدول، اکسیژن و تیتانیوم بیشترین سهم را دارند و تنگستن و نقره نیز به ترتیب با مقدار کمتر در ساختار حضور دارند. بر اساس ترکیب این شواهد تصویری و تحلیلی، می‌توان نتیجه گرفت که لایه $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$ با موفقیت بر سطح بستر پوشش داده شده و تمام عناصر هدف با پراکندگی یکنواخت و کیفیت مطلوب در ساختار نهایی حضور دارند.



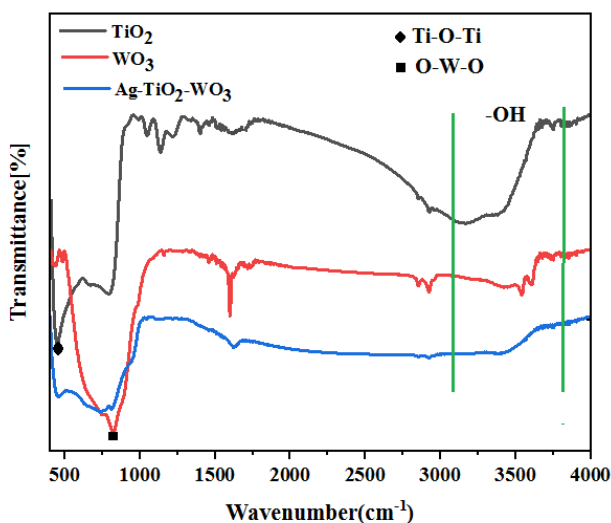
شکل ۳. (الف-ج) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبش با بزرگ‌نمایی‌های مختلف، (د-و) آنالیز طیف‌سنجی EDS برای تیتانیوم، تنگستن، (ز) ترکیب همزمان عناصر اصلی در لایه و (ح) جدول درصد وزنی و اتمی عناصر.

Figure 3. (a-c) Scanning electron microscopy (SEM) images at different magnifications; (d-f) EDS elemental

analysis for titanium and tungsten; (g) combined elemental mapping of the main components in the layer; and (h) table of elemental weight and atomic percentages.

۳-۳ آنالیز FTIR

همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، برای شناسایی گروه‌های عاملی نانوذرات TiO_2 ، WO_3 و $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$ دوپ شده با Ag، از آنالیز FTIR استفاده شد. در نمونه‌های حاوی TiO_2 (منحنی مشکی) و نانوساختار سه تایی (منحنی آبی)، قله‌هایی در محدوده 409 تا 671 cm^{-1} مشاهده می‌شود که به ارتعاشات کششی و خمشی پیوند Ti-O-Ti نسبت داده می‌شوند (۳۱). همچنین، تمامی نمونه‌ها دارای نوارهایی از آب و گروه‌های هیدروکسیل در حدود 3000 – 4000 cm^{-1} بودند که به حالت‌های کشش OH نسبت داده می‌شود (۳۲). طیف FT-IR نمایانگر حضور قله ای در 820 cm^{-1} است که به ارتعاش پیوند (O-W-O) در WO_3 مربوط می‌شود (مطابق منحنی قرمز) (۳۰). جالب توجه است که این قله، همراه با پیک جذب TiO_2 در طیف نانوساختار $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$ نیز دیده می‌شود که بیانگر ترکیب موفق TiO_2 و WO_3 است (۳۳).



شکل ۴. FTIR نمونه‌های TiO_2 ، WO_3 و $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$.
Figure 3. FTIR of TiO_2 , WO_3 and $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$ samples.

۴-۳ خواص فوتوولتائیک

به منظور ارزیابی شاخص‌های عملکرد DSSC، یک آزمون J-V انجام شد و نتایج آن در شکل ۵ الف ارائه شده است. برای مقایسه، سلول‌های خورشیدی مبتنی بر TiO_2 ، WO_3 و همچنین نمونه خالص $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$ ساخته و مورد بررسی قرار گرفتند. شدت نور شبیه‌ساز خورشیدی با استفاده از یک سلول خورشیدی سیلیکونی برای دستیابی به شرایط استاندارد AM-1.5 تنظیم شد. شدت نور ورودی برابر با 100 میلی‌وات بر سانتی‌متر مربع (معادل یک نور خورشید) و مساحت فعال سلول ها 0.25 سانتی‌متر مربع در نظر گرفته شد. همان‌طور که از چهار منحنی متمایز در نتایج آزمون J-V مشخص است، سلول خورشیدی حساس‌شده به مواد رنگزا عملکرد ثابتی را از خود نشان می‌دهد. پارامترهای کلیدی عملکرد سلول‌های خورشیدی، مانند چگالی جریان اتصال کوتاه (J_{sc}) و ولتاژ مدار باز (V_{oc})، مستقیماً از منحنی‌های جریان-ولتاژ قابل استخراج هستند. با استفاده از این داده‌ها، ضریب پرشدگی (FF) و راندمان تبدیل انرژی (PCE) یا (η) نیز محاسبه می‌شوند. راندمان PCE از طریق محاسباتی بر اساس مشخصات IV سلول تعیین می‌شود:

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

مقاله پذیرفته شده

در معادله J_{sc} چگالی جریان اتصال کوتاه، V_{oc} ولتاژ مدار باز، P_{in} توان نور تابشی، و FF ضریب پرکنندگی است که با فرمول $FF = (J_{sc} \times V_{oc}) / (J_{max} \times V_{max})$ محاسبه می‌شود. J_{max} حداکثر ولتاژ و V_{max} حداکثر چگالی جریان هستند.

برای تسهیل تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای جامع، این پارامترهای عملکردی در جدول ۱ خلاصه شده‌اند. داده‌های جدول به وضوح نشان می‌دهد که مقادیر J_{sc} و V_{oc} با ادغام WO_3 و Ag بهبود یافته و منجر به افزایش PCE می‌شود. بالاترین چگالی جریان برابر با $13/63 \text{ mA/cm}^2$ و ولتاژ مدار باز معادل 0.93 V ، با استفاده از فوتوآند $ITO/Ag-TiO_2-WO_3$ به دست آمد. شایان ذکر است که بهترین پارامترهای عملکردی، شامل راندمان $6/87\%$ درصد و ضریب پرشدگی $63/54\%$ درصد برای TiO_2 اصلاح شده با WO_3 و Ag حاصل شده است؛ این در حالی است که این مقادیر برای فوتوآندهای TiO_2-WO_3 ($5/63\%$)، TiO_2 ($3/171\%$) و WO_3 ($0/93\%$) کمتر بوده‌اند. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده افزایش قابل توجه در J_{sc} است که در درجه اول به اثرات هم افزایی Ag و کامپوزیت TiO_2-WO_3 نسبت داده می‌شود. همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، افزودن WO_3 اثرات مثبتی بر پارامترهای V_{oc} ، J_{sc} و PCE دارد. افزودن Ag به پراکندگی یکنواخت‌تر نانوذر TiO_2-WO_3 کمک می‌کند که منجر به افزایش جذب ماده رنگزا می‌شود که در نهایت منجر به بهبود J_{sc} و PCE می‌شود.

شکل ۵ ب، نمودار بازده تبدیل فوتون به جریان ($IPCE$) را برای سلول‌های خورشیدی حساس شده به ماده رنگزا، با انواع مختلف فوتوآندهای مورد مطالعه نشان می‌دهد. این نتایج بیانگر عملکرد برتر سلول‌های خورشیدی با فوتوآند $Ag-TiO_2-WO_3$ در تبدیل فوتون به جریان است. در مقایسه با سایر فوتوآندهای بررسی شده، از جمله TiO_2 خالص، WO_3 خالص و ترکیب TiO_2-WO_3 ، افزودن نقره به ساختار فوتوآند، موجب افزایش بازده و بهبود پاسخ فوتون به جریان شده است. به طور مشخص، سلول خورشیدی دارای فوتوآند $Ag-TiO_2-WO_3$ به بازده کوانتومی معادل 71% دست یافته است که از تمامی ترکیبات دیگر برتر است. این مقدار برای TiO_2 خالص 43% و برای TiO_2-WO_3 59% بوده است. این بهبود قابل توجه نشان‌دهنده تأثیر مستقیم نقره بر افزایش جذب نور و تبدیل آن به جریان الکتریکی می‌باشد.

جدول ۱. بازده سلول خورشیدی ساخته شده از TiO_2 ، WO_3 و نانو کامپوزیت‌های TiO_2-WO_3 ، $Ag-TiO_2-WO_3$.

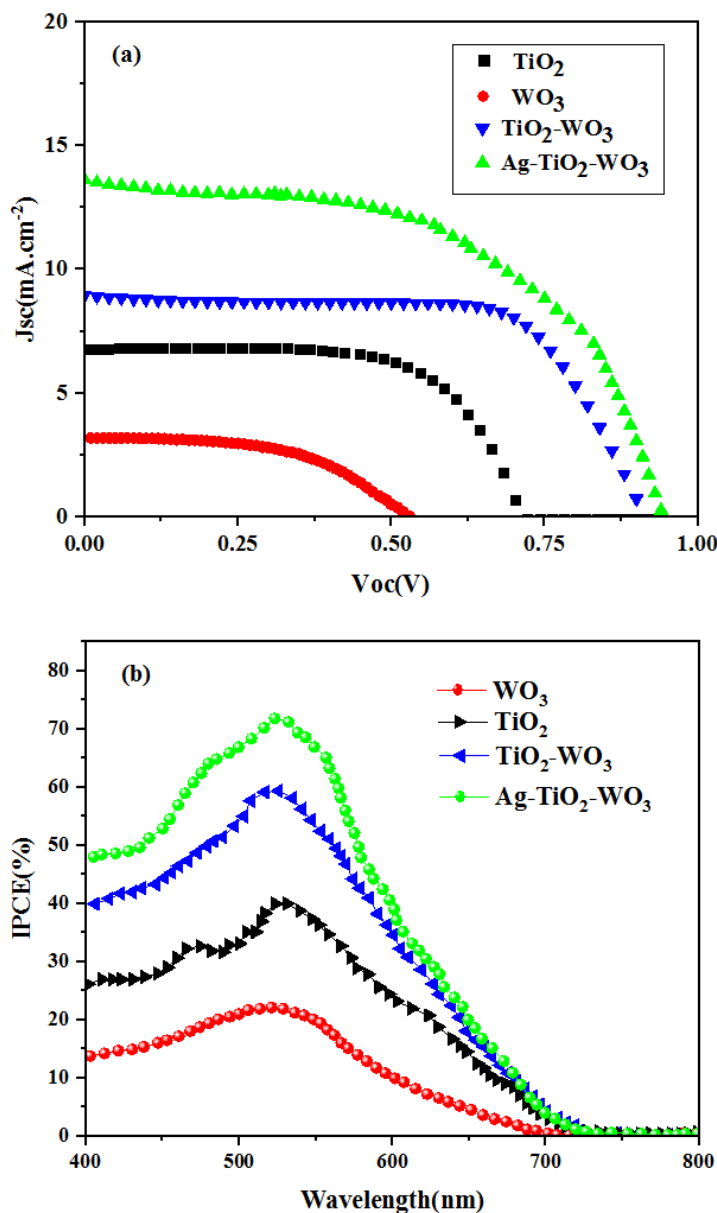
Table 1. Efficiency of solar cells TiO_2 ، WO_3 and TiO_2-WO_3 ، $Ag-TiO_2-WO_3$ nanocomposites.

Samples	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA.cm^{-2})	$FF(\%)$	$PCE (\%)$
TiO_2	0.72	6.753	65.24	3.171
WO_3	0.53	3.175	52.45	0.93
TiO_2-WO_3	0.9	8.951	68	5.631
$Ag-TiO_2-WO_3$	0.93	13.63	63.54	6.87

۳-۵ عملکرد نانو کامپوزیت در سلول خورشیدی

عملکرد سلول خورشیدی مبتنی بر فوتوالکترود $Ag-TiO_2-WO_3$ در زیر تابش نور در شکل ۶ نشان داده شده است. هنگام تابش نور، ماده رنگزا، نور فرودی را جذب کرده و الکترون‌ها را به حالت برانگیخته انتقال می‌دهد. الکترون‌های برانگیخته به نوار رسانش نانوذر TiO_2 تزریق می‌شوند. الکترون‌ها پس از تحریک، به دلیل پایین‌تر بودن سطح انرژی نوار رسانش WO_3 نسبت به TiO_2 ، به نوار رسانایی WO_3 منتقل می‌شوند. شکاف باند کوچک‌تر WO_3 منجر به ایجاد اثر فتوولتائیک در TiO_2 با شکاف باند بزرگ‌تر می‌شود (۱۱). این فرآیند منجر به بهبود جداسازی بار و گسترش بازه طیف نوری قابل استفاده در دستگاه‌های فتوولتائیک می‌شود. پس از این مرحله، ماده رنگزا با دریافت الکترون از الکترولیت، توسط سیستم ردوکس احیا شده و آماده استفاده مجدد خواهد شد. الکترولیت نیز توسط الکترون‌های برگشتی از مدار خارجی، از طریق الکترود پلاتینی بازسازی می‌گردد. در مطالعه ما، فلز رسوب داده شده بر سطح TiO_2-WO_3 به عنوان یک عامل پراکندگی نور پلاسمونی عمل می‌کند (۱۹). این فلز باعث می‌شود نور به طور موثری در سیستم به دام بیفتد و در مجاورت نزدیک با مولکول‌های رنگ، میدان الکترومغناطیسی قوی‌تری ایجاد کند که به جذب بهتر نور کمک می‌کند. هنگام تماس TiO_2-WO_3 با فلز، هر دو تحت یک تعادل سطح فرمی با یکدیگر قرار می‌گیرند که در نتیجه یک سد

شاتکی تشکیل می‌شود و بنابراین منجر به تجمع تعداد زیادی الکترون در سطح نانوذرات فلز می‌شود (۲۹).

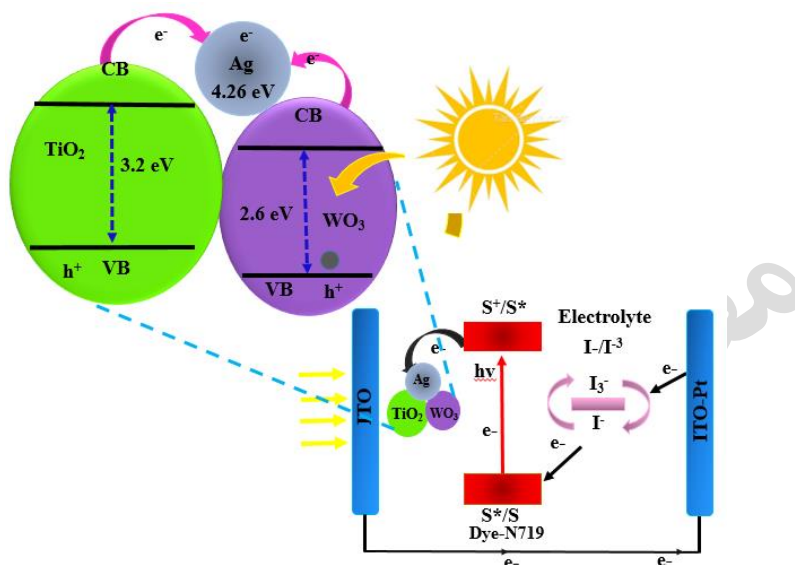


شکل ۵. الف) خصوصیات فتوولتائیک فتوآندهای خالص TiO_2 ، WO_3 ، $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$ و ترکیب سه تایی $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$ ، ب) نمودار IPCE سلول های خورشیدی.

Figure 4. (a) Photovoltaic properties of pure TiO_2 ، WO_3 ، $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$ and $\text{Ag-TiO}_2\text{-WO}_3$ ternary composite photoanodes, (b) IPCE of solar cells.

این تجمع الکترون‌ها روی نانوذرات نقره موقعیت سطح فرمی را به نوار رسانایی TiO_2 و WO_3 نزدیک‌تر می‌کند. سد شاتکی که بین نانوذرات فلزی و نیمه‌رساناها تشکیل می‌شود به الکترون‌ها کمک می‌کند تا از فلز به نوار رسانش نیمه‌رساناها جریان یابند. با انتقال الکترون‌ها به نوار رسانش TiO_2 و WO_3 ، الکترون‌های برانگیخته‌شده از ماده رنگزای N719 مجدداً شروع به تجمع بر سطح

فلز می‌کنند. همچنین، تشکیل سد شاتکی در سطح مشترک فلز و نیمه رسانا می‌تواند به عنوان یک چاه الکترونی عمل کرده و از فرآیند بازترکیب الکترون-حفره جلوگیری نماید (۲۸). لازم به ذکر است که موقعیت نوار ظرفیت^۱ (VB) اکسید تنگستن در مقایسه با اکسید تیتانیوم پایین‌تر است. به همین دلیل، حفره‌های ایجاد شده در نوار ظرفیت WO_3 ، ترجیحاً به سمت نوار ظرفیت TiO_2 حرکت می‌کنند. این جابجایی حامل‌های بار در نانوکامپوزیت‌های TiO_2-WO_3 باعث کاهش احتمال بازترکیب الکترون‌ها و حفره‌های نوری می‌شود (۳۰).



شکل ۶. مکانیسم ساختاری کامپوزیت $Ag-TiO_2-WO_3$ در سلول خورشیدی.
Figure 5. Structural mechanism of $Ag-TiO_2-WO_3$ composite in solar cell.

۴ جمع بندی

پژوهش حاضر نشان داد که به کارگیری نانوکامپوزیت سه گانه $Ag-TiO_2-WO_3$ به عنوان فوتوآنود در سلول خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا، موجب بهبود قابل توجه عملکرد این سلول‌ها می‌شود. نتایج حاصل از آزمون‌های ساختاری و شیمیایی حضور موفق ترکیبات TiO_2 ، WO_3 و نقره را در ساختار نهایی تأیید کرد. مقایسه نمونه‌های دوگانه و سه گانه بیانگر آن است که افزودن نانوذرات نقره به ترکیب TiO_2-WO_3 نقش مهمی در کاهش بازترکیب بارهای الکتریکی ایفا می‌کند؛ چرا که نقره علاوه بر افزایش جذب نور، با ایجاد مراکز به دام اندازی الکترون، جابجایی حامل‌های بار را تسهیل می‌کند. همچنین، WO_3 با بهبود فرآیند انتقال الکترون و جلوگیری از بازترکیب، موجب افزایش کارایی تبدیل انرژی شده است. مجموع این عوامل منجر به افزایش چگالی جریان تا $13/63$ میلی آمپر بر سانتی متر مربع و ارتقای ولتاژ مدار باز سلول تا $0/93$ ولت گردید، به طوری که بازده تبدیل انرژی به $6/87$ درصد رسید. این میزان بازده نسبت به ساختارهای دیگر، افزایش چشمگیری را نشان می‌دهد و بر اهمیت بهینه سازی ترکیب و مهندسی ساختار فوتوآنود در توسعه سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا تأکید دارد. بر این اساس، استفاده از نانوکامپوزیت $Ag-TiO_2-WO_3$ به عنوان روشی مؤثر برای ارتقای بازده DSSC پیشنهاد می‌شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان با کمال احترام از دانشگاه گیلان و پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران به خاطر حمایت‌های ارزشمند و مساعدت‌های علمی در این پژوهش، قدردانی می‌کنند.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تعارض منافی در انجام این پژوهش وجود نداشته است.

^۱Valance band

۱. Korir BK., Kibet JK, Ngari SM, A review on the current status of dye-sensitized solar cells: Toward sustainable energy. Eng Sci Eng. 2024; 12(8): 3188-3226. <https://doi.org/10.1002/ese3.1815>.
۲. Falahdoost Moghadam S, Ahmadi K, Abdolazade Ziabari A, Novin Vajari S, Omidtabrizi F, The effect of foamed cement nanocomposite as counter electrode on the performance of dye-sensitized solar cell. Inter J App Ceramic Technol. 2023; 20(6): 3596-3607. <https://doi.org/10.1111/ijac.14450>.
۳. Rahmatian M, Sayyaadi H, A systematic review of a photoelectrical innovation: dye-sensitized solar cells. Int J Amb Energ. 2024; 45(1): 2366538. <https://doi.org/10.1080/01430750.2024.2366538>.
۴. Hoseinnazhad M, Qaranjig M, Qahari 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]
۵. Lim SP, Pandikumar A, Lim HN, Ramaraj R, Boosting photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells using silver nanoparticle-decorated N, S-Co-doped-TiO₂ photoanode. Sci rep; 2015. 5(1): 11922. <http://dx.doi.org/10.1038/srep11922>.
۶. Gilani N, Fallahdoost Moghadam S, Yousefi AA, Investigating the Performance of the Graphene-WO₃-TiO₂ Ternary Composite in Dye-Sensitized Solar Cells. Iran J Chem Eng. 2024; 20(4): 13-26. <https://doi.org/10.22034/ijche.2024.434847.1512>.
۷. Irannajad Parizi A, Janghorbani K. Fabrication of dye-sensitized solar cells based on TiO₂-ZnO core shell nanorod electrodes and investigation of the effect of TiO₂ layer thickness on cell efficiency. J Metall Eng, 2012, pp. 11–26. <https://civilica.com/doc/200883>. [In Persian]
۸. Ismail M, Olivier C, Toupance T, Hybrid WO₃-nanorods/TiO₂ photoanodes for improved dye-sensitized solar cells performances under back illumination. J Mate Sci: Mat Elec, 2023; 34(11): 936. <http://dx.doi.org/10.1007/s10854-023-10335-8>.
۹. Memari M, Memarian N, Designed structure of bilayer TiO₂-Nb₂O₅ photoanode for increasing the performance of dye-sensitized solar cells. J Mat Sci: Mat in Elec, 2020; 31(3): 2298-2307. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10854-019-02762-3>.
۱۰. Kavan L, Vlckova Zivcova Z, Zlamalova M, Zakeeruddin SN, Grätze M, Electron-selective layers for dye-sensitized solar cells based on TiO₂ and SnO₂. J Phys Chem C, 2020; 124(12): 6512-6521. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b11883>.
۱۱. Yong S M, One-dimensional WO₃ nanorods as photoelectrodes for dye-sensitized solar cells. J Allo Comp, 2013; 547:113-117. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.08.124>.
۱۲. Younas M, Fabrication of cost effective and efficient dye sensitized solar cells with WO₃-TiO₂ nanocomposites as photoanode and MWCNT as Pt-free counter electrode. Ceramics International, 2019; 45(10): 936-947. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.09.269>.
۱۳. Cheng P, Deng Ch, Dai Xi, Li B, Liu D, Xu J, Enhanced energy conversion efficiency of TiO₂ electrode modified with WO₃ in dye-sensitized solar cells. J Photochemistry Phot A: Chem, 2008; 195(1): 144-150. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2007.09.016>.
۱۴. Prabhu N, Enhanced photovoltaic performance of WO₃ nanoparticles added dye sensitized solar cells. J Mat Sci: Mat Elect, 2014; 25: 5288-5295. <http://dx.doi.org/10.1007/s10854-014-2303-6>.
۱۵. Yang J.H, Kim K H, Bark Ch, Synthesis and characterization of WO₃ doped TiO₂ particle/nanowire layer in dye-sensitized solar cells. Mole Crys Liq Crys; 2014. 598(1): 32-39. <http://dx.doi.org/10.1080/15421406.2014.933295>.
۱۶. Shabani L, Mohammadi A, Jalali T. Enhancement of dye-sensitized solar cell efficiency using plasmonic gold nanocrystals coated with TiO₂ and SiO₂. Res Chem Nano, 2023, pp. 34–41. <https://www.magiran.com/p2725275>. [In Persian]
۱۷. Ramadhani DAK, Sholeha N, Khusna NN, Ag-doped TiO₂ as photoanode for high performance dye sensitized solar cells. Mat Sci Ene Tech, 2024; 7: 274-281. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2024.02.002>.
۱۸. Rohollah Amininejad H, Hoseinzadeh H. Optimization of plasmonic dye-sensitized solar cells using

- control of the Au/TiO₂ mass ratio and optimization of cell photoanode configuration. 2022, 12(3), pp. 114–121. <https://www.magiran.com/p2501371> [In Persian].
۱۹. Uthiravel V, Narayanamurthi K, Raja V, Anandhabasker S, Kuppusamy K, Green synthesis and characterization of TiO₂ and Ag-doped TiO₂ nanoparticles for photocatalytic and antimicrobial applications. Inorg Chem Comm, 2024; **170**: 113327. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113327>.
۲۰. Samuel O, Visible light-driven TiO₂-WO₃@ GO photocatalyst with catalytic memory for round-the-clock photocatalytic degradation of oilfield-produced water. Ceramics International, 2024; **50**(11): 18205-18219. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.02.305>.
۲۱. Lokman MQ, Shafie Sh, Shaban S, Ahmad F, Enhancing photocurrent performance based on photoanode thickness and surface plasmon resonance using Ag-TiO₂ nanocomposites in dye-sensitized solar cells. Materials, 2019. **12**(13): p. 2111. <https://doi.org/10.3390/ma12132111>.
۲۲. Wu, WY, Sun B, Tao B, Wang W, Chu P K, Ag-TiO₂ composite photoelectrode for dye-sensitized solar cell. App Phys A, 2017; **123**:1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.134>.
۲۳. Kandasamy M, Selvaraj F, Plasmonic Ag nanoparticles anchored ethylenediamine modified TiO₂ nanowires@ graphene oxide composites for dye-sensitized solar cell. J All comp. 2022; **902**: 163743. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.163743>.
۲۴. Asahi R, Morikawa T, Ohwaki T, Aoki K, Visible-light photocatalysis in nitrogen-doped titanium oxides. science, 2001; **293**(5528): 269-271. <https://doi.org/10.1126/science.1061051>.
۲۵. Kazmi SA, Electrical and optical properties of graphene-TiO₂ nanocomposite and its applications in dye sensitized solar cells (DSSC). J All Comp, 2017; **691**:659-665. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.319>.
۲۶. Gupta A.K., Srivastava S, Bahadur L, Improved performance of Ag-doped TiO₂ synthesized by modified sol–gel method as photoanode of dye-sensitized solar cell. App Phys A, 2016; **122**: 1-13. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00339-016-0241-2>.
۲۷. Chang H, Effect of Core-Shell Ag@ TiO₂ Volume Ratio on Characteristics of TiO₂-Based DSSCs. Journal of Nanomaterials, 2014; **2014**(1): 264108. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/264108>.
۲۸. Basumatary B, Basumatary R, Evaluation of Ag@ TiO₂/WO₃ heterojunction photocatalyst for enhanced photocatalytic activity towards methylene blue degradation. Chem, 2022; **286**:131848. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131848>.
۲۹. Li Y, Guangyuan H, Guilin D, Keyan W, Dequan Z, Ag/TiO₂/WO₃ nanoparticles with efficient visible light photocatalytic activity. Optoelectronics Letters, 2022; **18**(1): 1-5. <http://dx.doi.org/10.1007/s11801-022-1077-y>.
۳۰. Abbaspoor M., Aliannezhadi M, Tehrani FS, High-performance photocatalytic WO₃ nanoparticles for treatment of acidic wastewater. J Sol-Gel Sci Tech, 2023. **105**(2): 565-576. <http://dx.doi.org/10.1007/s10971-022-06002-9>.
۳۱. Bagheri S, Shameli K, Abd Hamid DB, Synthesis and characterization of anatase titanium dioxide nanoparticles using egg white solution via sol-gel method. J Chem, 2013; **2013**(1):848205. <https://doi.org/10.1155/2013/848205>.
۳۲. Chandore V, Savant N, Synthesis of nano crystalline ZnO by Microwave Assisted Combustion method: An eco friendly and solvent free route. Int. J. Environ. Sci. Dev. Monit; 2013; **4**(2). <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.10.112>.
۳۳. Hariri A, Gilani N, Pasikhani J, Promoting the photo-induced charge separation and photoelectrocatalytic hydrogen generation .Z-scheme configuration of WO₃ quantum nanodots-decorated immobilized Ti/TiO₂ nanorods. J All Comp, 2021; **871**: 159528. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159528>.

Nomenclature

AM
PCE
IPCE
FF
 $V_{\max}$
 V_{oc}
 J_{sc}
 $J_{\max}$
 P_{in}

Air mass coefficient
Photoelectric conversion efficiency(%)
Incident Photon-to-Current Efficiency(%)
Filling factor (%)
Maximum voltage (V)
Open circuit voltage(V)
Short circuit current density (mA/cm²)
Maximum current (mA/cm²)
Power of the incident light

مقاله پذیرفته شده