

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴

بهینه‌سازی سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای پلاسمونیک با استفاده از کنترل نسبت جرمی Au/TiO_2 و بهینه‌سازی پیکربندی فوتوآند سلول

حسین روح‌الامینی نژاد^{۱*}، حمیده حسن‌زاده جشاری^۲

^۱ استادیار دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

rooholamini@uk.ac.ir

^۲ دانشجوی دکتری دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

hm.hassanzade@gmail.com

چکیده: در این پژوهش، نقش نانوذرات فلزی طلا و نحوه به‌کارگیری آن‌ها بر عملکرد سلول خورشیدی رنگدانه‌ای و افزایش بازده آن بررسی شده است. سلول خورشیدی رنگدانه‌ای با استفاده از رنگدانه طبیعی چای قرمز ساخته شد. همچنین نانوذرات طلا ساخته و با گروه عاملی کربوکسیل عامل‌دار شدند. سپس این نانوذرات در فوتوآند سلول رنگدانه‌ای مورد استفاده قرار گرفت. عملکرد سلول در حضور این نانوذرات بررسی شد. نحوه استفاده از این نانوذرات در فوتوآند سلول بسیار مهم است و ساختار بهینه به‌صورت خمیر پلاسمونیک برای فوتوآند حاوی نانوذرات طلا و TiO_2 به دست آمد و غلظت آن‌ها (نسبت جرمی طلا به TiO_2) در فوتوآند بهینه‌سازی شد. با توجه به نقش نانوذرات طلا برای کمک به بهبود جذب نور خورشید توسط رنگدانه، درصد جرمی طلای مورد استفاده فاکتور مهمی برای بهینه‌سازی سلول است؛ به‌نحوی که غلظت نانوذرات طلا مانعی برای جذب سطحی مولکول‌های رنگ بر سطح TiO_2 نشود و برای نانوذرات طلای ۲ نانومتری مورد استفاده در این پژوهش این درصد جرمی به‌صورت wt% Au-TiO_2 ۰/۱۴۳ بهینه‌سازی شد.

واژه‌های کلیدی: سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای، نانوذرات طلا، اثر تشدید پلاسمون، نسبت جرمی طلا به تیتانیوم دی‌اکسید، ساختار فوتوآند.

۱. مقدمه

خورشید منبع انرژی پاک است و اگر ما بتوان تنها مقداری از این انرژی پاک و رایگان را به الکتریسیته تبدیل کرد، انرژی الکتریکی مورد نیاز جهان تأمین خواهد شد. متأسفانه ناآگاهی و نداشتن تکنولوژی مورد نیاز برای انجام این کار، مانع اصلی رسیدن به این هدف است. اما به هر حال دستگاه‌های فتوولتائیک تقریباً پتانسیل بالقوه‌ای برای تأمین انرژی آینده دارند [۱]. انرژی خورشید که به زمین می‌رسد بسیار زیاد است و در حدود $10^{24} \frac{J}{\text{year}}$ تخمین زده می‌شود که 10^4 برابر بیشتر از انرژی مصرفی رایج بشر است. از سوی دیگر با پوشش تنها $1/100$ از سطح زمین با دستگاه‌های فتوولتائیک با بازده 10% ، نیازهای بشر تأمین خواهد شد [۲]. دستگاه‌های فتوولتائیک در واقع سیستم‌های تبدیل انرژی نور خورشید به انرژی الکتریکی هستند و به‌عنوان سلول‌های خورشیدی شناخته می‌شوند. عملکرد این سیستم‌ها به‌طور اجمالی شامل به‌دام‌اندازی و جذب فوتون‌های فرودی خورشید، تولید جفت حفره-الکترون، انتقال الکترون‌ها و حفره‌های تولیدشده از طریق هادی‌های الکترون و حفره و ایجاد جریان است [۱].

تجاری‌سازی سیستم‌های فتوولتائیک به‌تازگی به‌طور کلی به‌وسیله سلول‌هایی بر پایه ویفرهای سیلیکونی کریستالی محقق شده است [۳]. تلاش‌ها برای افزایش راندمان و کاهش هزینه ساخت ماژول‌های سلول‌های خورشیدی سیلیکونی ادامه دارد. سؤالی قابل طرح این است که در بازار سلول‌های فتوولتایی، سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای چگونه می‌توانند به‌لحاظ بازده، هزینه ساخت ماژول با پایداری بیش از ۲۰ سال و نیز تقاضای بازار برای این نوع سلول و میزان در دسترس بودن مواد اولیه، با سایر انواع سلول‌های خورشیدی رقابت کنند [۴]. حقیقت آن است که سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای می‌تواند از مواد قابل دسترس و غیرسمی ساخته شوند که این می‌تواند از مزایای اصلی این نوع سلول‌ها نسبت به سلول‌های خورشیدی لایه‌نازک باشد. برای آنکه یک ماژول سلول خورشیدی رنگدانه‌ای تجاری شود، باید هزینه ساخت آن بسیار ارزان‌قیمت باشد. در نهایت با وجود آنکه تحقیقات ابتدایی برای ارتقای فناوری‌های ماژول سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای انجام شده، فهم و مطالعه دقیق طول عمر سلول و سازوکار آن مستلزم مطالعات گسترده‌تری در این زمینه است [۵ و ۶]. سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگ از سیستم‌های فتوالکتروشیمیایی ناشی می‌شوند که در سال ۱۹۵۰ ظهور پیدا کردند. پس از آن در سال ۱۹۹۱، گراتزل با استفاده از نیمه‌رسانای شامل نانوذرات متخلخل

TiO_2 با مساحت سطح بالا و رنگدانه بر پایه روتینیوم به بازده تبدیل انرژی بالایی برای سلول دست یافت و تا اواخر سال ۱۹۹۱ مقدار بازده به 10% رسید و پس از آن با رشد نسبتاً کندی به $11/5\%$ افزایش یافت. در آغاز سال ۲۰۰۰ محققان دریافتند که ترکیبات آلی فلز بر پایه روتینیوم منجر به تولید بیشترین مقدار بازده تبدیل انرژی می‌شود. از سال ۲۰۰۰ به‌بعد، بررسی‌های بسیاری روی اجزای مختلف سلول‌های خورشیدی برای رسیدن به بازده بالاتر انجام شد. اخیراً استفاده از مواد با خاصیت تشدید پلاسمون سطحی در سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای برای تقویت توانایی‌های برداشت نور خورشید در نظر گرفته شده است. در واقع سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگ یا نقاط کوانتومی، نسل سوم سلول‌های خورشیدی هستند که به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردی مانند انعطاف‌پذیری، قیمت پایین، ساخت آسان و ... مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند. عیب این سلول‌ها بازده نسبتاً پایین آن‌هاست که یک راه‌حل برای افزایش بازده، استفاده از نانو ساختارهای فلزی همچون طلا و نقره می‌باشد که با استفاده از اثر تشدید پلاسمون و افزایش جذب نور می‌تواند باعث افزایش بازده این سلول‌ها شود [۱، ۷ و ۸]. عمده‌تأ امکان استفاده از فوتوآندهایی با ضخامت زیاد وجود ندارد. این مسئله به‌طور معمول به این دلیل است که همه حامل‌های بار بتوانند جمع‌آوری شوند. استفاده از الکترودهای ضخیم معمولاً منجر به باز ترکیب حامل‌های بار قبل از رسیدن به اتصال نهایی خواهد شد. این مشکل را می‌توان با به‌کارگیری نانوذرات فلزی و بهره‌گیری از اثر پلاسمونیک حل کرد. اثر پلاسمونیک سبب می‌شود که جذب نور در لایه فعال سلول افزایش یابد [۵]. تشدید پلاسمون سطحی، همان نوسان جمعی الکترون‌های سطح نانوذرات فلزی است که در اثر کوپل شدن با موج الکترومغناطیسی فرودی رخ می‌دهد و باعث جذب مقدار قابل توجهی از نور در نزدیکی بسامدی با عنوان بسامد تشدید پلاسمون می‌شود. این اثر تشدید پلاسمون سطحی موضعی در نانوذرات طلا و نقره در مجاورت رنگدانه می‌تواند صورت پذیرد. به‌رغم این قابلیت‌ها، چندین چالش در مورد سلول‌های خورشیدی نانو ساختار ممکن است وجود داشته باشد؛ مانند اثرات سطحی (باز ترکیب، کم بودن موبیلیتی حامل‌های بار)، مرزدهانه‌ها و تله‌های سطحی و حجمی که موجب گیراندازی الکترون‌ها می‌شوند، موضوع آئیل کردن (از بین رفتن لیگاندها با پخت کردن و تحمل دمایی مواد و لایه‌ها)، لزوم لایه‌نشانی مناسب (احتمال ایجاد شکاف‌ها، اتصال‌ها، یکنواختی ضخامت)، مسئله هم‌ترازی سطوح انرژی برای مکانیزم انتقال الکترون در سلول [۹ و ۱۰].

مختلف Au/TiO_2 و کاتد پلاتینی ساخته و مشخصه‌یابی شد. در ادامه، ساختارهای زیر از آند DSSC برای رسیدن به سلول بهینه بررسی شده‌اند و دو نمونه از بهترین ساختارهای بررسی شده برای فوتوآند سلول آورده شده است.

۱.۲ ساختار شماره ۱: استفاده از نانوذرات طلا درون فوتوآند سلول رنگدانه‌ای

در این حالت خمیر پلاسمونیک حاوی نانوذرات TiO_2 و نانوذرات طلا به‌عنوان فوتوآند سلول رنگدانه‌ای به کار برده شد. برای این کار از نانوذرات طلای ساخته‌شده به روش براسست شیفرین (که سنتز و مشخصه‌یابی آن در کارهای قبلی ما شرح داده شده است [۱۱]) به‌منظور افزایش بازدهی سلول رنگدانه‌ای استفاده شد. خمیر حاوی نانوذرات TiO_2 و استیک اسید باید خوب به هم زده شود تا خمیر یکنواختی به دست بیاید. سپس محلول نانوذرات طلا به آن اضافه شد. نسبت جرمی نانوذرات طلا به TiO_2 به‌صورت مقدار بهینه‌ای که در مرحله قبل به‌دست آمد (wt% ۰/۱۴۳) به کار برده شد و سپس خمیر حاصل شده به‌مدت سه دقیقه تحت حمام آلتراسونیک قرار گرفت. در مرحله بعد، خمیر پلاسمونیک مورد نظر به روش دکتر بلید، روی سطح شیشه‌ای ITO لایه‌نشانی شد و پس از پخت، الکتروود به‌مدت ۲۴ ساعت در محلول حاوی رنگدانه چای قرمز و اتانول قرار گرفت. برای کاتد سلول نیز از محلول اتانولی H_2PtCl_6 استفاده شد. سلول خورشیدی مطابق ساختار سلول رنگدانه‌ای که در کارهای قبلی ما شرح داده شده است [۱۱]، بسته و برای مشخصه‌یابی آماده شد.

۲.۲ ساختار شماره ۲: لایه‌نشانی نانوذرات طلا روی سطح آند TiO_2

در حالت ساختار ۲، پس از لایه‌نشانی خمیر حاوی نانوذرات TiO_2 ، ابتدا کمی زمان لازم است تا حلال تبخیر و لایه مورد نظر خشک شود. سپس لایه‌نشانی ۰/۳ میلی‌لیتر محلول حاوی نانوذرات طلای عامل‌دار شده که در تتراهیدرافوران (با غلظت ۰/۰۴۷ g/mL) حل شده‌اند، انجام شد و پس از پخت، الکتروود به‌مدت ۲۴ ساعت در محلول حاوی رنگدانه چای قرمز و اتانول قرار گرفت.^۲ سلول

در پژوهش پیشین [۱۱]، تمرکز بر روی پیدا کردن روش مناسب برای سنتز نانوذرات طلا با لیگاند‌های مناسب بود، اما هدف از این پژوهش پیدا کردن نسبت جرمی مناسب طلا به TiO_2 و نحوه قرارگیری مناسب طلا در سلول و پیدا کردن ساختار مناسب برای بهینه‌سازی فوتوآند است. با به کار بردن نانوذرات طلای قطبی در فوتوآند سلول خورشیدی حساس‌شده با رنگدانه طبیعی، سعی بر این بوده است که بهینه ساختار و بهینه نسبت جرمی برای فوتوآند حاصل شود و بازدهی سلول افزایش یابد. افزایش جذب فوتون در فوتوآند با اهمیت است زیرا با افزایش جذب فوتون، جفت حفره-الکترون‌های بیشتری می‌تواند تولید شوند و احتمال افزایش جریان نوری بیشتر می‌شود. برای افزایش جذب در فوتوآند، نیاز به بررسی بیشتر برای بهینه‌سازی استفاده از حساسگرهاست. استفاده از نانوذرات فلزی پلاسمونیک راه‌حلی برای افزایش جذب فوتوآند است که به‌طور مؤثری منجر به افزایش بازده سلول می‌شود.

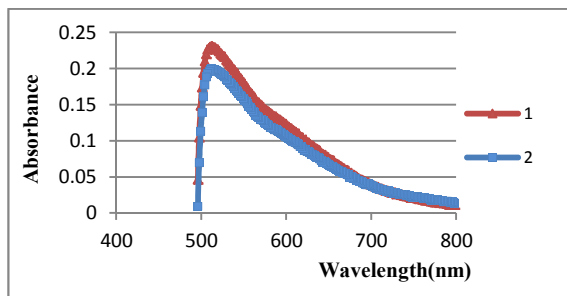
۲. روش تجربی

در این پژوهش تلاش شده است که سلول خورشیدی رنگدانه‌ای پلاسمونیک مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گیرد. طراحی مناسب فوتوآند سلول برای رسیدن به نحوه صحیح قرار گرفتن نانوذرات طلا و تیتانیوم‌دی‌اکسید در کنار رنگدانه، می‌تواند برای این بهینه‌سازی مفید باشد. همچنین نسبت جرمی نانوذرات طلا به تیتانیوم‌دی‌اکسید، عامل مهم دیگری برای افزایش بازده سلول است که برای رسیدن به میزان جذب و بازده بیشتر، از غلظت‌های مختلف نانوذرات طلا در فوتوآند سلول استفاده شد و در نهایت این نسبت جرمی Au/TiO_2 به‌صورت ۰/۱۴۳٪ بهینه‌سازی گردید. در بخش تجربی، کار پس از ساخت نانوذرات طلا با اندازه ۲ نانومتر و عامل‌دار کردن آن‌ها با گروه کربوکسیلی (COOH)، از غلظت‌های مختلف این نانوذرات طلا در فوتوآند سلول استفاده شد. این مقادیر برای نسبت جرم نانوذرات طلا به جرم نانوذرات TiO_2 به‌صورت wt% ۰/۲۸۵، wt% ۰/۰۵۷۱، wt% ۰/۰۸۵۷، wt% ۰/۱۴۳، wt% ۰/۱۷ و wt% ۰/۴۳ در فوتوآند‌های مختلف (به‌ترتیب از فوتوآند شماره ۱ تا ۶) استفاده شد.^۱ نانوذرات طلای عامل‌دار شده به‌دلیل اینکه قابلیت حل در حلال قطبی را دارند به‌راحتی با خمیر تیتانیوم‌دی‌اکسید و اسیداستیک مخلوط می‌شوند. برای پیدا کردن بهینه سلول، چندین نمونه سلول با فوتوآند‌های حاوی درصد‌های جرمی

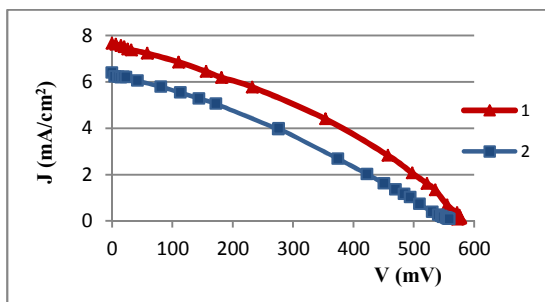
۱. با توجه به سایز کوچک نانوذرات طلا و مساحت سطح بالای آن‌ها باید مقدار مورد استفاده کم باشد تا مانعی برای مولکول‌های رنگ نباشند.

۲. در اینجا با توجه به غلظت و جنس رنگدانه مورد استفاده پس از چندین آزمایش، این زمان نتیجه بهتری را حاصل آورد. زمان‌های کمتر باعث جذب کمتر رنگ می‌شوند و زمان‌های بیشتر باعث جمع‌شدگی بیش از حد مولکول‌های رنگ‌شده می‌شوند که تأثیر منفی در ساختار فوتوآند دارد.

نمودار جذب برای این دو ساختار نیز گویای این موضوع است. انتظار می‌رود که سلول ۱ به دلیل جذب بیشتر فوتون‌اند آن، جریان نوری تولیدشده بیشتری نسبت به سلول ۲ داشته باشد. اندازه‌گیری‌های سلول این مطلب را تأیید می‌کند و نتایج به دست آمده نشانگر افزایش بازده سلول با ساختار ۱ در مقایسه با ساختار ۲ است. دلیل جذب بالای این فوتون‌اند، نحوه مناسب قرارگیری نانوذرات طلا در مجاورت مولکول‌های رنگدانه و نانوذرات TiO₂ است و از میزان غلظت مناسبی نیز در ساخت این سلول استفاده شده است.



شکل (۲): میزان جذب در فوتون‌دهای با ساختار ۱ و ۲



شکل (۳): نمودار J-V برای دو ساختار ۱ و ۲

جدول (۱): مقایسه مشخصات سلول‌های ۱ و ۲

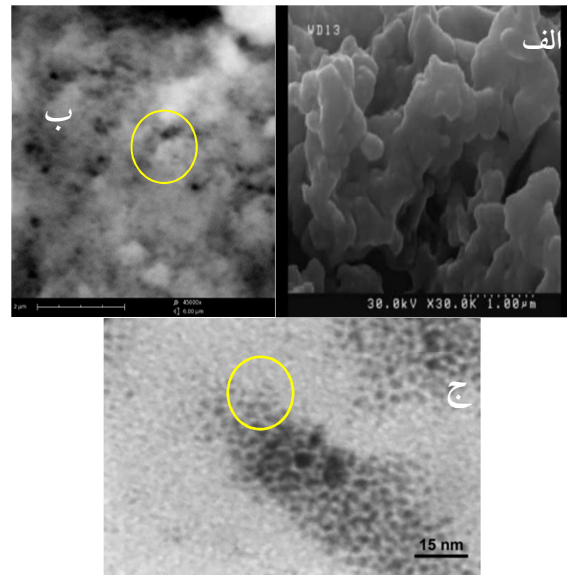
	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η (%)
Cell 1	7.7	572.7	0.35	1.54
Cell 2	6.4	558.9	0.31	1.11

طراحی فوتون‌اند برای بهینه‌سازی بازده بسیار اهمیت دارد و برای آشنایی بهتر با سازوکار تأثیر استفاده از نانوذرات طلا در سلول، باید نحوه صحیح استفاده از آن را در سلول در نظر گرفت. نوسان‌های پلاسمون نانوذرات، کوپل شدن نور و ایجاد میدان نزدیک و اثر آن روی رنگ، افزایش مؤثر تولید جفت حفره الکترون را به دنبال دارد. بنابراین نانوذرات طلا نیز باید به نحوی درون لایه جذب به کار برده شوند تا در مجاورت رنگدانه‌ها حضور داشته باشند و بتوانند باعث تحریک رنگدانه و تولید حامل‌های بار بیشتر و

مطابق قبل بسته و مشخصه‌یابی‌های موردنظر صورت پذیرفت. نکته‌ای که باید در این جا مدنظر داشت این است که مولکول‌های رنگدانه باید در ارتباط مناسبی با نانوذرات TiO₂ باشند و رنگدانه‌ها به خوبی جذب TiO₂ شوند تا انتقال الکترون از رنگدانه به TiO₂ صورت پذیرد، پس باید فوتون‌اند سلول به گونه‌ای طراحی شود که نانوذرات طلا جای مولکول‌های رنگدانه را اشغال نکنند.

۳. نتایج و بحث

شکل (۱-الف) تصویر FESEM گرفته‌شده از نانوذرات طلای عامل دار شده با گروه کربوکسیلی است و شکل (۱-ب) تصویر SEM نانوذرات TiO₂ و طلا پس از پخت را نشان می‌دهد. شکل (۱-ج) نیز مربوط به تصویر TEM نانوذرات طلا پس از ساخت است. قسمت‌های سفید، دی‌اکسید تیتانیوم و قسمت‌های خاکستری (مات) نشان‌دهنده در داخل دایره‌ها، نمک‌های طلا هستند.



شکل (۱-الف): تصویر FESEM نانوذرات Au، شکل (۱-ب) تصویر SEM فوتون‌اند Au TiO₂، شکل (۱-ج) تصویر TEM نانوذرات طلا

طبق شکل (۱-ج) اندازه نانوذرات طلا پس از ساخت حدود ۲ نانومتر است. اما با توجه به شکل (۱-ب) و الف اندازه نانوذرات پس از پخت به دلیل جمع‌شدگی افزایش می‌یابد. شکل (۲) میزان جذب رنگ در فوتون‌دهای با ساختار ۱ و ۲ را نشان می‌دهد. همان طور که از شکل پیداست، فوتون‌اند ۱ جذب رنگ بیشتری دارد زیرا پس از حرارت‌دهی احتمال جمع‌شدگی و جزیره‌ای شدن نانوذرات وجود دارد و در ساختار ۲ که لایه‌نشانی نانوذرات طلا روی سطح TiO₂ انجام شده است، حضور این نانوذرات روی سطح TiO₂ سطح مؤثر TiO₂ در ارتباط با مولکول‌های رنگ را کاهش داده و می‌تواند مانع جذب مولکول‌های رنگدانه روی سطح TiO₂ شود که

می‌شود. این امر موجب کاهش ضخامت بهینه مورد نیاز سلول می‌شود که به دو دلیل مزیت دارد: ۱. مقدار ماده کاهش می‌یابد که باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود؛ ۲. بازده جمع شدن حامل‌های بار به دلیل مسافت انتقال کوتاه‌تر می‌تواند بهبود یابد؛ به‌ویژه برای مواد با طول پخش کوتاه‌تر اهمیت بیشتری دارد [۱۴].

۱.۳. بررسی اثر میزان استفاده از نسبت‌های جرمی متفاوت نانوذرات طلا-تیتانیوم دی‌اکسید در فوتوآنود بر بازدهی سلول

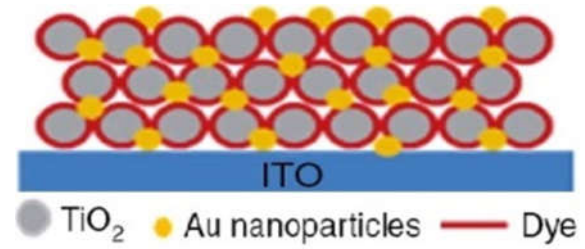
در اینجا از نتیجه به‌دست آمده در قسمت قبل برای نحوه استفاده از نانوذرات طلا در فوتوآنود سلول استفاده گردید و فوتوآنود شامل خمیر TiO_2 و نانوذرات طلا به‌صورت ساختار ۱ به کار برده شد. نانوذرات طلای عامل‌دار شده به دلیل قابلیت حل در حلال قطبی را دارند به‌راحتی با خمیر تیتانیوم دی‌اکسید و اسیداستیک مخلوط می‌شوند. برای ساخت فوتوآنود، همان‌طور که گفته شد، ابتدا تیتانیوم دی‌اکسید را در استیک اسید حل کرده و سپس محلول حاوی نانوذرات طلا در تتراهیدرافوران را به آن اضافه می‌کنیم. برای جذب بهتر نانوذرات طلا روی سطح تیتانیوم دی‌اکسید از حمام آتراسونیک به مدت ۶ دقیقه استفاده شد. پس از آن لایه‌نشانی خمیر حاوی نانوذرات طلا و تیتانیوم دی‌اکسید به روش دکتر بلید و با ضخامت تقریبی ۱۰ میکرومتر انجام شد. به‌منظور بهینه‌سازی سلول از مقادیر متفاوت برای نسبت‌های جرمی نانوذرات طلا و TiO_2 در فوتوآنود سلول استفاده شد. در شکل (۵) مشاهده می‌شود که با افزایش میزان نانوذره طلا در TiO_2 رنگ خمیر بنفش‌تر می‌شود.



شکل (۵): تغییر رنگ فوتوآنود با افزودن نانوذرات طلا

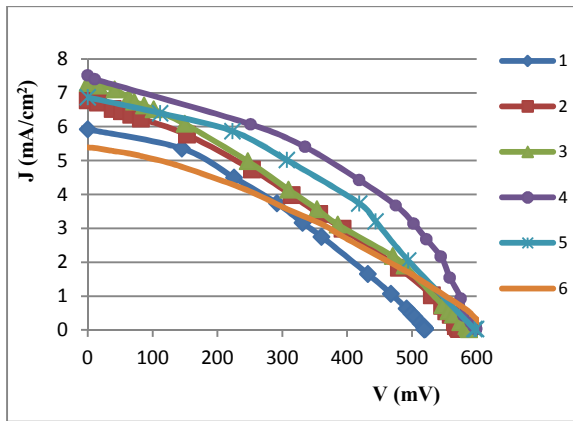
این مقادیر برای نسبت جرم نانوذرات طلا به جرم نانوذرات TiO_2 به‌صورت ۰/۲۸۵ wt%، ۰/۵۷۱ wt%، ۰/۸۵۷ wt%، ۰/۱۴۳ wt% و ۰/۱۷ wt% و ۰/۴۳ wt% در فوتوآنودهای مختلف (به ترتیب از فوتوآنود شماره ۱ تا ۶)، استفاده شد. بهینه بازده به‌ازای نسبت جرمی $Au-TiO_2$ ۰/۱۴۳ wt% (سلول شماره ۴) به دست آمد.

افزایش بازدهی سلول شوند. منحنی شکل (۳) بیانگر نمودار J-V برای دو ساختار ذکر شده است و اطلاعات مربوط به آن در جدول (۱) خلاصه شده است. همان‌طور که بیان شد، افزایش بازده در حالت ساختار ۱ ناشی از افزایش جذب بیشتر رنگ و قرارگیری مناسب نانوذرات طلا در فوتوآنود سلول است. شکل (۴) نیز نشان‌دهنده استفاده از نانوذرات فلزی درون فوتوآنود و در مجاورت رنگدانه است.

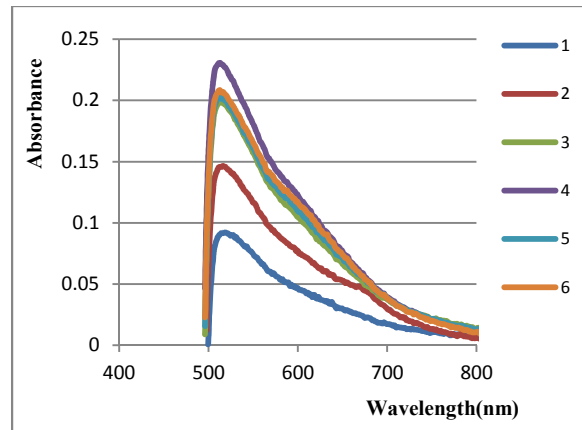


شکل (۴): قرارگیری نانوذرات طلا در فوتوآنود سلول

قرار گرفتن نانوذرات فلزی در مجاورت رنگدانه می‌تواند باعث برانگیختگی مولکول‌های رنگدانه توسط میدان نزدیک ناشی از این نانوذرات فلزی شود [۱۲]. همچنین نانوذرات پلاسمونیک می‌توانند در فوتوآنود سلول رنگدانه‌ای با قرار گرفتن بین مولکول‌های رنگدانه و TiO_2 ، نقش انتقال الکترون را به عهده بگیرند. نانوذرات طلا دارای سطوح انرژی خالی بسیاری در بالای سطح فرمی خود هستند. اثر تشدید پلاسمون در این نانوذرات باعث جذب انرژی خورشید شده و الکترون‌های پرنانرژی تولید می‌کند که باعث می‌شود سطح فرمی نانوذرات طلا به سطوح بالاتری منتقل شود و امکان تزیق این الکترون‌های پرنانرژی و همچنین انتقال الکترون‌های رنگدانه به TiO_2 میسر گردد [۱۳]. این نانوذرات فلزی ویژگی‌های پلاسمونیک نشان می‌دهند و می‌توانند در قسمت‌های مختلف دستگاه‌های فتوولتائیک جای بگیرند و سعی می‌کنند که به‌دام‌اندازی نور در دستگاه را افزایش دهند. نکته دیگر ضخامت لایه جذب سلول خورشیدی است که پارامتر مهمی برای بهینه‌سازی محسوب می‌شود و در همه انواع سلول‌ها اهمیت دارد. ضخامت‌های بیشتر باعث جذب نور بیشتر نیز می‌شوند، اما از طرفی با کوتاه بودن طول عمر الکترون، احتمال بازترکیب آن افزایش می‌یابد. لایه جذب نازک به دلیل مسافت انتقال کوتاه‌تر برای جمع کردن حامل‌های بار مطلوب‌تر است، اما جذب نور کمتری دارد. پس یک سلول خورشیدی که به‌طور فیزیکی نازک باشد اما در عین حال بتواند جذب بالایی داشته باشد بسیار مطلوب است. همان‌گونه که بحث شد استفاده از نانوذرات پلاسمونیک باعث به‌دام‌اندازی بیشتر نور و افزایش جذب در سلول خورشیدی



شکل (۷): منحنی چگالی جریان-ولتاژ برای سلول‌های رنگدانه‌ای با فوتوآندهای مختلف (شماره‌های ۱ تا ۶ برای نسبت‌های جرمی طلا و TiO_2 به ترتیب به صورت $0.285\text{wt}\%$ ، $0.571\text{wt}\%$ ، $0.857\text{wt}\%$ ، $1.143\text{wt}\%$ ، $1.429\text{wt}\%$ و $1.714\text{wt}\%$)



شکل (۶): طیف جذب UV-VIS برای فوتوآندهای مختلف (شماره‌های ۱ تا ۶ برای نسبت‌های جرمی طلا و TiO_2 به ترتیب به صورت $0.285\text{wt}\%$ ، $0.571\text{wt}\%$ ، $0.857\text{wt}\%$ ، $1.143\text{wt}\%$ ، $1.429\text{wt}\%$ و $1.714\text{wt}\%$)

جدول (۲): مقایسه مشخصات سلول‌های ۱ تا ۶

	$J_{sc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc}(\text{mV})$	FF	$\eta(\%)$
Cell 1	5.9	518.9	0.36	1.10
Cell 2	6.8	573.4	0.32	1.25
Cell 3	7.3	588.1	0.31	1.33
Cell 4	7.5	600.7	0.41	1.85
Cell 5	6.9	600.9	0.38	1.58
Cell 6	5.4	613.2	0.34	1.13

شکل (۷) نشان‌دهنده چگالی جریان برحسب ولتاژ، با توجه به نتایج مشخصه‌یابی، برای سلول‌های با فوتوآندهای مختلف (شماره‌های ۱ تا ۶ برای نسبت‌های جرمی طلا به TiO_2 به ترتیب به صورت $0.285\text{wt}\%$ ، $0.571\text{wt}\%$ ، $0.857\text{wt}\%$ ، $1.143\text{wt}\%$ ، $1.429\text{wt}\%$ و $1.714\text{wt}\%$) می‌باشد و اطلاعات مربوط به آن در جدول (۲) خلاصه شده است. همان‌گونه که عنوان شد، با افزایش نسبت جرمی ابتدا افزایش و سپس کاهش بازده اتفاق می‌افتد. این منحنی‌ها با نمودار جذب شکل (۶) همخوانی دارند و بیشترین میزان چگالی جریان و بازده به‌ازای نسبت جرمی Au-TiO_2 $1.143\text{wt}\%$ است. افزایش چگالی جریان با حضور نانوذرات طلا با مقدار مشخص با توجه به شکل (۶) شرح داده شد.

ولتاژ مدار باز (V_{oc})، تفاوت سطح پتانسیل الکترولیت و سطح شبه‌فرمی آند است. سطح پتانسیل شبه فرمی ترکیب Au-TiO_2 شیفت منفی تری نسبت به آند TiO_2 خالص دارد که می‌تواند عامل اصلی افزایش V_{oc} باشد. نانوذرات طلا مثل آنتن برای نور فرودی عمل کرده و اثر تشدید پلاسمون سطحی می‌تواند باعث ایجاد میدان در اطراف نانوذرات شده و در واقع با جذب بیشتر و تزریق الکترون‌های بیشتر به فوتوآند، سطح باند رسانش فوتوآند در حضور

شکل (۶) نشان‌دهنده این است که نانوذرات طلا نقش آنتن را برای نور فرودی بازی می‌کنند و انرژی خورشید را به صورت مد پلاسمون سطحی متمرکز می‌کنند. تهییج تشدید پلاسمون نانوذرات طلا می‌تواند باعث افزایش میدان الکترومغناطیسی موضعی شدیدی اطراف نانوذرات طلا و بنابراین افزایش قابل توجه جذب در مولکول‌های رنگ مجاور شود [۱۵]. چون نانوذرات طلا مستقیماً درون فوتوآند و روی سطح TiO_2 به کار برده شده‌اند، بنابراین به مولکول‌های رنگ نزدیک‌اند. این پلاسمون ارتقایافته نوری تا رسیدن به مقدار $1.143\text{wt}\%$ برای نسبت جرمی طلا به TiO_2 ، افزایش می‌یابد و پس از آن ثابت می‌ماند. با افزایش نسبت جرمی طلا به TiO_2 بیشتر از مقدار $1.143\text{wt}\%$ ، به دلیل افزایش مقدار طلا که موجب کاهش مساحت سطح مؤثر TiO_2 در ارتباط با مولکول‌های رنگ جذب‌شده به سطح آن می‌شود، میزان جذب کاهش می‌یابد که با نمودار جذب نشان داده شده در شکل (۶) مطابقت دارد. به‌رغم کاهش مقدار رنگ جذب‌شده، توانایی جذب فیلم TiO_2 حاوی نانوذرات طلا و رنگ تا رسیدن به مقدار نسبت جرمی Au-TiO_2 $1.143\text{wt}\%$ افزایش می‌یابد و سپس با افزایش بیشتر مقدار طلا، جذب کاهش می‌یابد. بنابراین کاهش در توانایی جذب برای مقادیر Au-TiO_2 بالاتر از $1.143\text{wt}\%$ ، به کاهش جذب سطحی رنگ نسبت داده می‌شود. با توجه به هر دو مسئله، افزایش میدان موضعی و کاهش جذب سطحی رنگ، بالاترین میزان به‌دام‌اندازی نور و در نتیجه بیشترین چگالی جریان و بازده مربوط به سلول شماره ۴ با فوتوآند حاوی خمیر پلاسمونیک با نسبت جرمی Au-TiO_2 $1.143\text{wt}\%$ است که در جدول (۲) نیز پارامترهای به‌دست‌آمده برای سلول‌ها به صورت خلاصه آمده است.

خوبی با TiO_2 برقرار کرده‌اند. غلظت نانوذرات طلا در سلول، عامل مهمی بر بازدهی سلول است که بهینه شد. غلظت طلا به صورت نسبت جرمی نانوذرات طلا به TiO_2 بهینه شد و بهترین بازده به‌زای $0.143wt\%$ به دست آمد. بررسی طیف جذب این فوتوآنها نشانگر افزایش جذب فوتوآند با افزایش میزان طلا تا رسیدن به نسبت جرمی $0.143wt\%$ ، به دلیل اثر تشدید پلاسمون نانوذرات طلا بود. اما از این نسبت به بعد، کاهش جذب در اثر افزایش نسبت طلای استفاده شده در فوتوآند مشاهده شد که ناشی از کاهش مساحت سطح مؤثر نانوذرات TiO_2 در ارتباط با رنگ بود.

نانوذرات طلا افزایش یافته و در نتیجه مقدار ولتاژ مدار باز نیز افزایش می‌یابد. در نهایت افزایش ولتاژ مدار باز و جریان مدار اتصال کوتاه به افزایش بازده سلول می‌انجامد. (نتایج این بخش با نتایج مرجع [۱۶] مطابقت دارد).

۴. نتیجه گیری

نتایج نشان می‌دهد که با مجاورت نانوذرات طلا و رنگ در فوتوآند، به دلیل اثر میدان نزدیک نانوذرات طلا، جذب نور در رنگ افزایش می‌یابد که در نهایت بازده سلول با ساختار فوتوآند حاوی خمیر پلاسمونیک را افزایش داده است. این نانوذرات طلا که سطحشان اصلاح شده و با گروه عاملی کربوکسیلی عامل دار شده است، پیوند

مراجع

- [1] Lansaker, P., *Gold Based Nanoparticles and Thin Film*, Ph.D. Thesis, Uppsala University, Sweden, Chap.1, 2012.
- [2] Zhang, Q. and Cao, G., "Nanostructured Photoelectrodes for Dye-Sensitized Solar Cells", *Nano Today*, Vol. 6, pp. 91-109, 2011.
- [3] Geoffrey, B.S. and Claes-Goran, S., *Green Nanotechnology: Solutions for Sustainability and Energy in the Built Environment*, Crs Press, 1st edition, Publisher of Humanities, Social Science & STEM Books, 2011.
- [4] Salehi, A. and zamani, S., "Efficiency Enhancement of $In_0.5Ga_0.5P$ Solar Cell by Optimizing Structural Parameters Using Parametric Method", *Journal of Energy Engineering & Management*, 7 (4), pp. 12-19, 2018.
- [5] Hardin, B.E., Snaith, H.J. and Mcgehee, M.D., "The Renaissance of Dye-Sensitized Solar Cells", *Nature Photonics*, Vol. 6, pp. 162-169, 2012.
- [6] Khalili, M., Abedi, M., Salar Amoli, H. and Mozaffari, S.A., "Dye Sensitized Solar Cells with Chitosan and Carboxy Methyl Cellulose Gel Electrolytes", *Journal of Energy Engineering & Management*, 5 (3), pp. 30-35, 2015.
- [7] Ding, K., Zhu, J., Cai, W., Moon, S-J. and Cai, N., "Plasmonic Dye-Sensitized Solar Cells", *Advanced Energy Materials*, Vol. 1, pp. 52-57, 2011.
- [8] Ding, B., Lee, B.J., Yang, M., Jung, H.S. and Lee, J-K., "Surface Plasmon Assisted Energy Conversion in Dye-Sensitized Solar Cells", *Advanced Energy Materials*, Vol. 1, pp. 415-421, 2011.
- [9] YoungYang, H. and HunLee, S., "Plasmonic and Charging Effects in Dye-Sensitized Solar-Cells with Au Nanoparticles Incorporated into the Channels of Freestanding TiO_2 Nanotube Arrays", *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 80, pp. 311-317, 2019.
- [10] Kaur, N. and Mahajan, A., "Fabrication of Plasmonic Dye-Sensitized Solar Cells using Ion-Implanted Photoanodes", *Royal Society of Chemistry Advances*, Vol. 9, pp. 20375-20384, 2019.
- [11] Hasanzadeh Jeshari, H., Rooholamini Nejad, H., Rezaee, V. and Deymehkar, E., "Applying the Synthesized Gold Nanoparticles and Investigating the Effect of Ligand-Functionalized Nanoparticles on Efficiency of Dye Sensitized Solar Cells", *IOP Publishing, Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 9, Number 3, pp. 035017 (8pp.), 2018.
- [12] Cushing, S. K. and Wu, N., "Plasmon-Enhanced Solar Energy Harvesting", *The Electrochemical Society Interface*, Vol. 4, pp.4650-4655, 2013.
- [13] Gusak, V., *Nanoplasmonics for Solar Cells*, Ph.D. Thesis, Department of Applied Physics Chalmers University of Technology, Sweden, 2014.
- [14] Alizadeh, A., Khodaei, M., Karami, Ch., Sworkentin, M., Shamsipur, M. and Sadeghi, M., "Rapid and Selective Lead (II) Colorimetric Sensor Based on Azacrown Ether-Functionalized Gold Nanoparticles", *Nanotechnology*, Vol. 21, pp. 315503-315511, 2010.
- [15] Calogero, G., Calandra, P., Irrera, A., Sinopoli, A., Citro, I. and Di Marco, G., "A New Type of Transparent and Low Cost Counter-Electrode Based on Platinum Nanoparticles for Dye-Sensitized Solar

- Cells*", Energy and Environmental Science, Vol. 4, pp. 1838-1844, 2011.
- [16] Li, Y., Wang, H., Feng, Q., Zhou, G. and Wang, Z-S., "*Gold Nanoparticles Inlaid TiO_2 Photoanodes: A Superior Candidate for High-Efficiency Dye-Sensitized Solar Cells*", Energy and Environmental Science, Vol. 6, pp. 2156–2165, 2013.