

بررسی تاثیر نانوساختارها در جریان فتوالکتروشیمیایی ساختارهای

ناهمگون بر پایه Cu_2O لیلا شوشتری^۱ | اعظم ایرجی زاد^{۱،۲*} | راحله محمدپور^۱^۱ پژوهشکده علوم و فن آوری نانو، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، تهران^۲ دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، تهران

► iraji@sharif.edu

چکیده:

در این تحقیق تاثیر بکارگیری نانوکره‌ها و نانومیله‌های Cu_2O بر روی پوشش Cu_2O که به ترتیب به روش ترسیب الکتروشیمیایی و اکسیداسیون حرارتی فراهم شده است، بررسی شده است. سطح لایه‌ی Cu_2O با بکارگیری نانوساختارهای این اکسید اصلاح شده است؛ نانومیله‌های اکسید مس با استفاده از روش اکسیداسیون آندی در محیط قلیایی از سطح فلز مس صیقل یافته، ساخته می‌شوند. این ساختارهای با طول متوسط ۱۵۰ نانومتر، برای دستیابی به فاز خالص Cu_2O در فرآیند حرارت دهی در دمای دمای 700°C در محیط آرگون قرار می‌گیرند. ساختار ناهمگون توده‌ای دوم از لایه نشانی چرخشی نانوکره‌های تجاری شده به ابعاد 350 نانومتر بر روی لایه توده‌ای Cu_2O به روش ترسیب الکتروشیمیایی، فراهم شد. منحنی چگالی جریان-ولتاژ در آنالیز فتوالکتروشیمیایی، از هر دو ساختار ناهمگون بر پایه‌ی نانومیله‌ها و نانوکره‌ها در حالت بهینه خود به ترتیب بهبود جریان فتوالکتروشیمیایی در حدود 76% و 28% نسبت به ساختار فقط توده‌ای نشان می‌دهد. آنالیز اسپکتروسکوپ آمپدانس الکتروشیمیایی (EIS) نشان می‌دهد که مقاومت ساختارهای ناهمگون کاهش می‌یابد و سطح موثر آن‌ها افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: اکسید مس، اکسیداسیون آندی، اکسیداسیون حرارتی، آنالیز فتوالکتروشیمیایی، آنالیز اسپکتروسکوپی الکتروشیمیایی

۱ مقدمه

محسوب می‌شود. از این جهت استفاده از سیستم‌های فتوالکتروشیمیایی (PEC) ضرورت می‌یابد. همچنین امروزه برای تولید هیدروژن در مقیاس صنعتی، از تکنولوژی‌های آلایندگی یعنی از انرژی‌های تجدیدناپذیر استفاده می‌شود، درحالی‌که استفاده از تفکیک کننده فتوالکتروشیمیایی آب که از نور خورشید برای شکستن مولکول‌های آب به گازهای هیدروژن و اکسیژن استفاده می‌کند، به عنوان یکی از بهترین تکنولوژی‌ها برای تولید پاک و تجدیدپذیر هیدروژن مطرح است. در این تکنولوژی یک لایه جاذب فعال بکار می‌رود که هنگامی که نور خورشید به آن می‌رسد، جفت

با توجه به افزایش نیازمندی انرژی در جهان و تمایل زیاد به تولید و استفاده از انرژی‌های پاک، سیستم‌های فتوولتاییکی (PVs) بعنوان یکی از منابع تولید انرژی تجدید پذیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. در دهه‌ی اخیر سیستم‌های فتوولتاییکی توسعه چشمگیری داشته‌اند، بطوریکه پیش بینی می‌شود اگر این روند ادامه داشته باشد این سیستم‌ها به اصلی‌ترین منابع تولید الکتریسیته پاک تبدیل شوند [۱]. یکی از چالش‌هایی که در حوزه انرژی خورشیدی وجود دارد ذخیره سازی انرژی با هزینه پایین است که پارامتر مهمی برای گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی

^۲ Photoelectrochemical cell^۱ Photovoltaics

باز ترکیب حامل‌های بار در مرز اتصال ساختارهای ناهمگون بر پایه این اکسید فلزی افزایش می‌یابد. برای غلبه بر این چالش، کم کردن ضخامت ماده فعال یک راهکار محسوب می‌شود که البته باعث کاهش جذب فوتون‌های ورودی نیز می‌شود. راهکار موثر در این زمینه بکار بردن نانو ساختارها می‌باشد بطوریکه با بکار بردن‌ها بتوان طول جمع‌آوری حامل‌های بار اقلیت راه کاهش داد. بطوریکه یک جاذب با جهت‌گیری عمودی مانند نانومیل‌ها در عمل می‌تواند میزان جذب اپتیکی بالایی در راستای محور داشته باشد در حالیکه جمع‌آوری حامل‌های بار اقلیت در راستای شعاعی و در فاصله نسبتاً کوتاهی فراهم شود. [۴ و ۱۱ و ۱۲]. همچنین بکار بردن نانو ساختارها در سطح باعث بهبود جدایش بار در فصل مشترک ساختار می‌شود [۱۳]. در این تحقیق ساختارهای ناهمگون از پوشش دهی نانومیل‌ها و نانوکره‌ها به ترتیب بر روی پوشش Cu_2O که به دو روش اکسیداسیون حرارتی و ترسیب الکتروشیمیایی حاصل می‌شود، فراهم می‌شود. نمودار چگالی جریان-ولتاژ این ساختارهای ناهمگون بهبود جریان را نسبت به حالت توده‌ای نشان می‌دهد. بررسی تاثیر نانو ساختارها با آنالیز اسپکتروسکوپی امپدانس الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت.

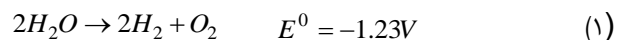
۲ بخش تجربی

مواد و تجهیزات

در این پژوهش برای تهیه پوشش اکسید مس از فویل مس باهنر ایرانی با خلوص ۹۹/۸٪ استفاده شد. فویل مس با استفاده از پودر آلومینیا آلفا محصول شرکت آمریکا صیقل کاری شد. نمک‌های KOH و Na_2SO_4 بکار رفته محصول شرکت مرک آلمان است. همچنین برای ساخت پوشش‌های Cu_2O از نمک سولفات مس و اسید لاکتیک استفاده شد. همچنین سوسپانسیون تجاری مشتمل بر نانوکره‌های Cu_2O با ابعاد حدود ۳۵۰nm در محیط آب-اتانول محصول شرکت آلدريج است.

آنالیز پراش اشعه ایکس با استفاده از دستگاه Spectro Ametek بدست آمد. مورفولوژی ساختارها با دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی TE-SCAN مدل MIRA3

الکترون-حفره تولید می‌شود که می‌توانند در واکنش‌های تجزیه آب بصورت زیر شرکت کنند.



که در آن E^0 حداقل ولتاژ لازم برای انجام این واکنش را نشان می‌دهد. بدین منظور استفاده از نیم‌رسانای مناسب که هزینه کمی برای تولید و ساخت آن نیاز باشد، ضرورت می‌یابد. در این بین اکسیدهای فلزی گزینه‌ای مناسب هستند. علت علاقمندی و توجه به نیم‌رساناهای اکسیدی، فراوانی در طبیعت، غیر سمی بودن آن‌ها، پایداری شیمیایی نسبتاً بالا و همچنین روش‌های ساخت در دمای اتاق و در محیط اتمسفر معمولی می‌باشد که خود هزینه کمی را در پی دارد. [۲]

در میان نیم رساناهای اکسید فلزی، Cu_2O کاندیدی مناسبی برای تبدیل انرژی خورشیدی به حساب می‌آید. وادیا^۳ و همکارانش نشان داده‌اند هزینه‌ی خام مواد فتوولتایی مشتمل بر مس (شامل Cu_2O) از نازلترین قیمت‌ها می‌باشد. [۳]

Cu_2O دارای انرژی گاف مستقیم در حدود ۲-۲/۲ eV با ساختار شبکه‌ای مکعبی است؛ بطوریکه به علت وجود تهی جاهای اکسیژن در این ساختار، نیم‌رسانای ذاتی نوع P است. [۵ و ۶] روش‌های مختلفی برای لایه نشانی اکسید مس (I) وجود دارد که از عمده‌ترین آن‌ها کندوپاش [۷]، پالس لیزری [۸]، اکسیداسیون حرارتی^۴ [۹] و رسوب‌دهی الکتروشیمیایی^۵ [۱۰] است. روش اکسیداسیون حرارتی که در آن از حرارت دهی فویل مس خالص در دماهای حدوداً بالاتر از ۹۰۰°C، به اکسید مس (I) دست می‌یابند، روشی کم هزینه و قابل اطمینان است. همچنین روش ترسیب الکتروشیمیایی امکان ساخت پوشش‌های Cu_2O در دمای اتاق و بر زیرلایه هادی با مورفولوژی مختلف را فراهم می‌کند و بنابراین از روش‌های قابل دسترسی محسوب می‌شود.

یکی از چالش‌های استفاده از نیم‌رسانای Cu_2O بعنوان لایه جاذب، کم بودن طول نفوذ حامل‌های بار اقلیت نسبت به عمق نفوذ طول موج فوتون ورودی می‌باشد. لذا احتمال

^۳ Wadia

^۴ Thermal Oxidation

^۵ Electrodeposition

محلول آبی KOH با $\text{pH} = 11$ است. ولتاژ اعمالی برای انجام فرآیند اکسیداسیون آندی مقدار 10 V و زمان انجام فرآیند، حداقل 10 دقیقه است. نانو ساختارهای تهیه شده از این فرآیند از انتهای سلول الکتروشیمیایی جمع آوری شده و برای انجام فرآیند حرارت دهی در بوتله تنگستنی در کوره استوانه‌ای قرار می‌گیرند و فرآیندهای حرارت دهی مختلفی برای دستیابی به فاز خالص Cu_2O از این نانو ساختارها انجام می‌شود.

تهیه ساختار ناهمگون توده‌ای

از آنجائیکه هدف نهایی دستیابی به ساختارهای ناهمگون از پوشش‌های توده‌ای و نانو ساختارهای اکسید مس است، لازم است که نانو ساختارهای تهیه شده بگونه‌ای روی پوشش‌های ویفری Cu_2O قرار گیرند. بدین منظور از روش لایه‌نشانی چرخشی استفاده می‌شود.

بدین ترتیب نانومیله‌های تشکیل شده از فرآیند اکسیداسیون آندی از طریق این لایه نشانی بر روی پوشش Cu_2O به روش اکسیداسیون حرارتی قرار می‌گیرند و سپس ساختار جدید، تحت فرآیند بهینه شده در کوره و در معرض شارش گاز آرگون قرار می‌گیرد. نانو ساختارهای ناهمگون مختلفی با استفاده از لایه نشانی چرخشی مقادیر مختلف 101 ، 115 و 15 از سوسپانسیون پایدار نانوکره Cu_2O بر روی ترسیب الکتروشیمیایی Cu_2O فراهم می‌شوند.

آنالیز فتوالکتروشیمیایی برای ساختار ناهمگون چیدمان الکتروشیمیایی با بکارگرفتن الکتروده شمارش پلاتین و الکتروده رفرنس Ag/AgCl در محلول 3 M از KCl بدست می‌آید که ساختارهای ناهمگون الکتروده کار است. الکترولیت مورد استفاده برای این آنالیز محلول آبی از Na_2SO_4 می‌باشد. نور فرودی بصورت متناوب در این سیستم اعمال می‌شود.

۳ نتایج و بحث

آنالیز XRD

پس از ساخت پوشش‌های توده‌ای Cu_2O به دو روش این نمونه‌ها تحت آنالیز XRD قرار می‌گیرند که در شکل ۱ الف

بررسی شد. تمامی آنالیزهای الکتروشیمیایی با دستگاه دستگاه پتانسیواستات/ گالوانواستات AutoLab مدل PGSTAT302N انجام شده است.

روش آزمایش

در این بخش، ابتدا ساخت پوشش‌های توده‌ای و ناهمگون شرح داده می‌شود.

ساخت Cu_2O به روش اکسیداسیون حرارتی

فویل مس (باهتر- ساخت ایران- خلوص 99.8%) پس از شستشو در مواد شوینده و استون و آبکشی با آب DI، در اسید نیتریک رقیق شده به نسبت $1:1$ نیز قرار می‌گیرد تا لایه اکسید شده روی آن خورده شود. سپس در کوره متحرک در معرض شارش گاز آرگون با نرخ حرارت دهی $17^\circ\text{C}/\text{min}$ به دمای 1025°C رسیده است و به مدت 5 ساعت در این دما قرار می‌گیرد. دو ساعت از ابتدای قرار گیری فویل مس در این دما، گاز آرگون قطع و نمونه در معرض هوا قرار می‌گیرد. سپس دمای کوره با نرخ $8^\circ\text{C}/\text{min}$ به دمای 500°C می‌رسد. با جابجایی کوره در این دما، نمونه در معرض دمای اتاق قرار می‌گیرد.

تهیه پوشش Cu_2O به روش ترسیب الکتروشیمیایی

لایه‌نشانی پوشش Cu_2O در چیدمان سه الکترودی مشتمل بر الکتروده رفرنس Ag/AgCl در الکترولیت 3 M KCl و الکتروده شمارش پلاتین و همچنین الکتروده کار ITO انجام می‌شود. الکترولیت مورد استفاده از 0.2 M CuSO_4 و اسید لاکتیک 3 M است، که pH آن با اضافه کردن هیدروکسید سدیم برابر 12 تنظیم می‌شود. درجه حرارت حمام لایه‌نشانی دمای 63°C است. ولتاژ اعمالی $0/5 \text{ V}$ بر حسب Ag/AgCl است.

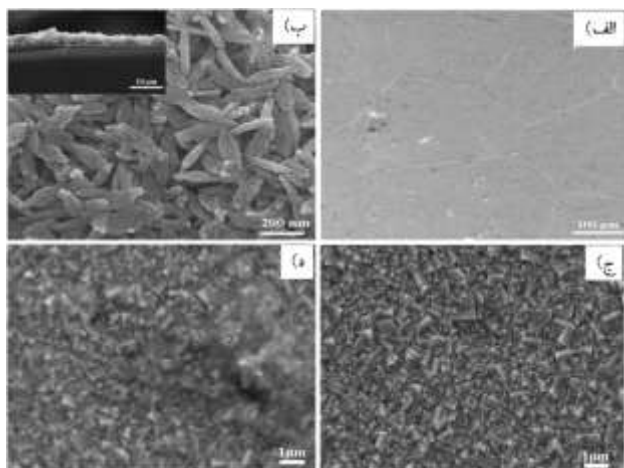
تهیه میله‌های Cu_2O :

برای تولید نانو ساختار Cu_2O از روش اکسیداسیون آندی^۶ استفاده می‌شود. فویل مس مورد نظر پس از شستشوهای اولیه با استفاده از پودر آلومینیا 500 nm ، مورد صیقل کاری قرار می‌گیرد که علاوه بر حذف فیزیکی لایه اکسیدی، سطحی آینه‌ای شکل فراهم شود. الکترولیت مورد استفاده،

^۶ Anodize

مشخص است با این روش نانوساختارها پس از فرآیند حرارت دهی چسبندگی مناسبی را به سطح Cu_2O توده‌ای دارند.

همچنین در شکل ج تصویری از سطح پوشش Cu_2O به روش ترسیب الکتروشیمیایی فراهم شده است. مشخص است که دانه‌هایی با شکل هرمی و هشت وجهی که دارای مرزهای مشخصی با یکدیگر هستند در این روش ایجاد می‌شوند که این امر از مرجع بودن فاز (۱۱۱) در آنالیز XRD را تایید می‌کند. پس از لایه نشانی نانوکره‌های Cu_2O سطح پوشش بصورت یکنواخت از این نانوساختارها پوشانده می‌شود که فاصله موجود بین دانه‌های شکل گرفته در ساختار اولیه را می‌پوشاند و فاصله‌ی دانه‌بندی‌ها را نیز کاهش می‌دهد.



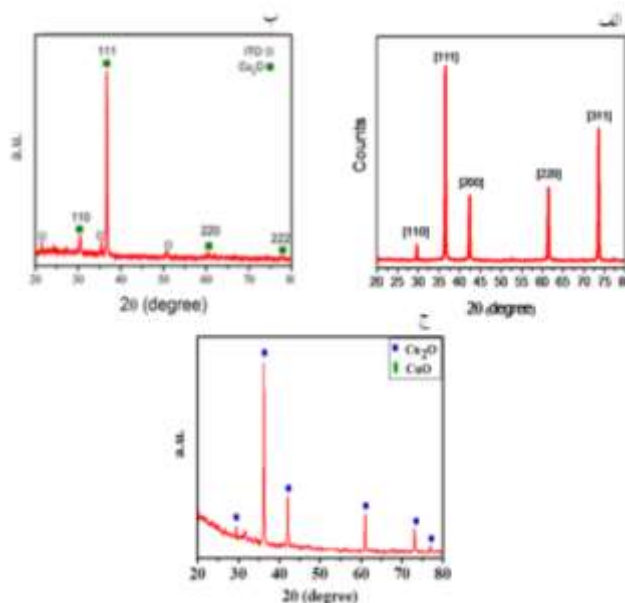
شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از الف) سطح پوشش اکسید مس ساخته شده به روش اکسیداسیون حرارتی، ب) نانومیله‌های تشکیل شده به روش اکسیداسیون آندی - تصویر داخل نشان دهنده پوشش تهیه شده از این نانوساختارها بر روی Cu_2O توده‌ای، ج) سطح پوشش نانوساختار ایجاد شده به روش ترسیب الکتروشیمیایی و د) پوشش ایجاد شده از نانوکره‌های لایه‌نشانی شده به روش چرخشی بر روی Cu_2O توده‌ای

آنالیزهای فتوالکتروشیمیایی ساختارهای ناهمگون Cu_2O

در این قسمت آنالیزهای مربوط به ساختار Cu_2O نانوساختار/توده‌ای مورد بررسی قرار می‌دهیم. همانطور که ذکر شد ساختار ناهمگون توده‌ای از لایه نشانی چرخشی نانوساختارهای بر ویفر Cu_2O ساخته شده به دو روش

و ب آمده است. مشخص است که هیچ پیکی مبنی بر وجود مس و اکسید مس (II) وجود ندارد. لذا فویل مس اولیه تماماً به نیم رسانای اکسیدی Cu_2O خالص با پیک مرجع (۱۱۱) تبدیل شده است.

برای دستیابی به نانوساختارهایی با فاز خالص از Cu_2O فرآیند حرارت دهی در دمای 700°C به مدت ۱۵ دقیقه و در گاز آرگون انجام شد. آنالیز XRD از این نمونه‌ها که در شکل ج آمده است، فاز Cu_2O را در هیچ زاویه‌ای نشان نمی‌دهد.

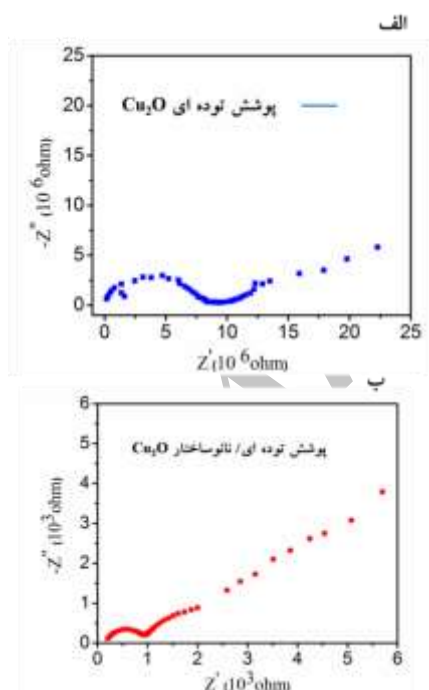


شکل ۱. آنالیز XRD از الف) پوشش Cu_2O به روش اکسیداسیون حرارتی، ب) پوشش Cu_2O به روش ترسیب الکتروشیمیایی و ج) نانوساختارهای بدست آمده از اکسیداسیون آندی پس از حرارت دهی در دمای 700°C به مدت ۱۵ دقیقه

آنالیز SEM و XRD از نانوساختارها

در شکل زیر آنالیز SEM از سطح پوشش Cu_2O ساخته شده به روش اکسیداسیون حرارتی نشان داده شده است. مشخص است که سطحی کاملاً یکنواخت با حضور مرزدانه‌هایی با ابعاد چند ۱۰۰ میکرومتر با استفاده از این روش بدست می‌آید. همچنین شکل ۴-ب نشان می‌دهد که طول نانومیله‌های تشکیل شده در فرآیند اکسیداسیون آندی حدود ۱۵۰ نانومتر است. تصویری از نانوساختار ناهمگون که از لایه نشانی چرخشی نانومیله‌ها بر روی سطح Cu_2O فراهم شده است، در داخل شکل ۴-ب نشان داده شده است؛

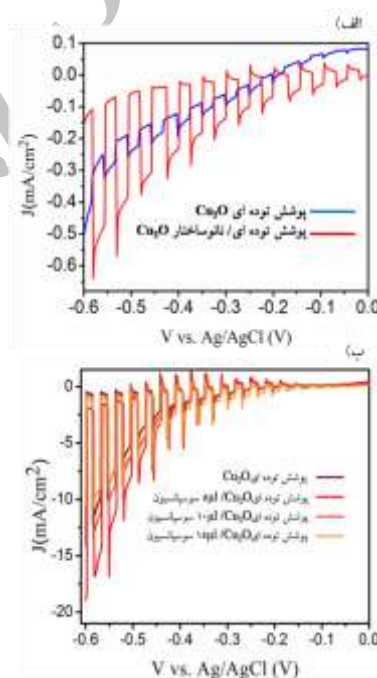
از نمودار تغییرات چگالی جریان بر حسب ولتاژ مشخص است که بهترین پاسخ از ساختار ناهمگون توده‌ای با بکارگیری از $5 \mu\text{l}$ از سوسپانسیون پیادار حاوی نانوکره‌های Cu_2O فراهم می‌شود. این ساختار افزایش جریان حدود 28% را نسبت به حالت توده‌ای خود در ولتاژ $0/6\text{V}$ - نشان می‌دهد. برای اطلاع بیشتر از میزان افزایش چگالی جریان با تابش نور پالسی برای ساختار ناهمگون توده‌ای / نانو ساختار Cu_2O از آنالیز EIS استفاده می‌شود. این آنالیز در سلول الکتروشیمیایی سه الکترود انجام شد که فرکانس اعمالی در این آنالیز 10^6 Hz - $0/01$ بوده است. آنالیز EIS برای دو ساختار توده‌ای و ناهمگون توده‌ای انجام شد؛ منحنی نایکوئیست ساختارها، در شکل ۴ الف نشان می‌دهد که مقاومت انتقال بار در ساختار توده‌ای در حدود $20 \text{ M}\Omega$ است در حالیکه این مقدار برای ساختار فیلم/نانومیله Cu_2O در مقایسه با مقاومت فیلم اکسید مس در حدود $10^3 \Omega$ کاهش یافته است (شکل ۴ ب).



شکل ۴. منحنی نایکوئیست در تاریکی و ولتاژ مدار باز در محلول $\text{Na}_2\text{SO}_4(1\text{M})$ برای الف) پوشش Cu_2O تهیه شده به روش اکسیداسیون حرارتی و ب) ساختار ناهمگون نانومیله / لایه Cu_2O

اکسیداسیون حرارتی و ترسیب الکتروشیمیایی فراهم می‌شود.

برای بررسی عملکرد خاصیت فتوالکتروشیمیایی ساختار توده‌ای و ساختار ناهمگون Cu_2O ، نحوه‌ی تغییرات جریان نسبت به ولتاژهای اعمالی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۳-الف تغییرات جریان بر حسب ولتاژ، برای ساختار توده‌ای و ناهمگون متشکل از نانومیله‌های Cu_2O را نشان می‌دهد. مشخص است که در ساختار ناهمگون اول چگالی جریان بصورت چشمگیری افزایش پیدا کرده است، بطوریکه در ولتاژ $0/6\text{V}$ - افزایش جریان حدود 76% افزایش یافته و به مقدار $0/6 \text{ mA/cm}^2$ می‌رسد. همچنین تغییرات جریان زمان برای ساختارهای ناهمگون ساخته شده با مقادیر مختلف نانوکره‌های Cu_2O نیز در شکل ۳-ب نشان داده شده است.



شکل ۳. تغییرات جریان بر حسب ولتاژ برای الف) پوشش توده‌ای Cu_2O ساخته شده به روش اکسیداسیون حرارتی و ساختار ناهمگون توده‌ای بر پایه آن با بکارگیری نانومیله‌های اکسیداسیون و آندی و ب) پوشش توده‌ای به روش ترسیب الکتروشیمیایی و ساختار ناهمگون توده‌ای بر پایه آن با بکارگیری مقادیر مختلف سوسپانسیون مشتمل بر نانوکره‌های Cu_2O

۴ نتیجه گیری

در این مطالعه دو ساختار ناهمگون توده‌ای با استفاده از نانوکوره‌ها و نانومیله‌های Cu_2O بر پوششی از این نیم‌رسانای اکسید فلزی ساخته شد. تصاویر SEM نشان می‌دهد که پوشش‌هایی همگن از این ساختارهای فراهم شده است. تغییرات چگالی جریان بر حسب ولتاژ، افزایش ۷۶٪ و ۲۸٪ ای را نسبت به حالت توده‌ای خود نشان می‌دهد. آنالیز امپدانس اسپکتروسکوپی برای این دو ساختار کاهش مقاومت انتقال بار در نانوساختار ناهمگون و همچنین افزایش سطح موثر در این ساختارها را نسبت به حالت توده‌ای خود نشان می‌دهد.

تشکر و قدردانی

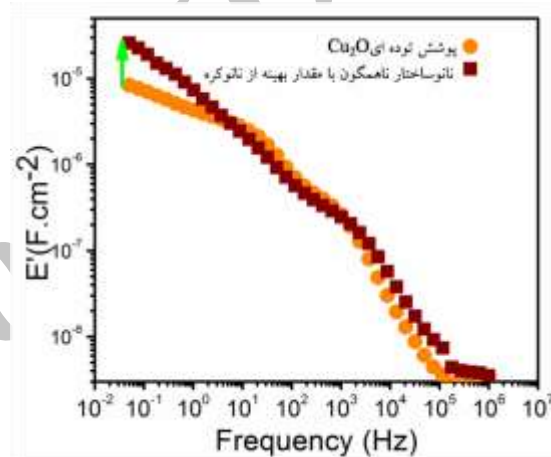
بدینوسیله از حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران (INSF) (با شماره ۹۵۸۴۲۴۱۳) و همچنین گرنه دانشگاه معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف (با شماره گرنه ۹۳۱۱۳) برای انجام این پروژه تقدیر و تشکر می‌شود.

مراجع

- [1] A. Jager-Waldau, "Thin Film Photovoltaics: Markets and Industry", *Int. J. Photoenergy*, 768368, 2012.
- [2] R. Wick, S. D. Tilley, "Photovoltaic and Photoelectrochemical Solar Energy Conversion with Cu_2O ", *J. Phys. Chem. C*, 119,47, 26243-26257, 2015
- [3] C. Wadia, A. Paul, E. Fortunato, D. Ginley, H. Hosono, D. C. Paine; "Transparent Conducting Oxides for Photovoltaics", *Environ. Sci. Technol.*, 43,6, 2072-2077, 2009.
- [4] S Rühle, A Y. Anderson and A. Zaban, "All-Oxide Photovoltaics", *J. Phys. Chem. Lett.*, 3, 3755-3764, 2012.
- [5] W. Shockley, H. J. Queisser, "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction

کاهش مقاومت می‌تواند ناشی از افزایش سطح باشد. یکی از تاثیرات افزایش سطح، افزایش در تعداد حامل‌های بار می‌باشد؛ یعنی با توسعه سطح فعال، میزان جذب نور بیشتر و در نتیجه تعداد حامل‌های بار بیشتری فراهم می‌شود.

بررسی امپدانس الکتروشیمیایی از نانوساختار ناهمگون از نانوکوره‌های Cu_2O نیز انجام شد. با استفاده از آنالیز می‌توان ظرفیت خازنی شکل گرفته بین نیم‌رسانا و الکترولیت را بررسی کرد. در شکل ۵، تغییرات ظرفیت خازنی بر حسب فرکانس برای حالت توده‌ای Cu_2O به روش ترسیب الکتروشیمیایی و نانوساختار ناهمگون برپایه آن نشان داده شده است.



شکل ۵. نحوه تغییرات ظرفیت خازنی بر حسب فرکانس اعمالی برای پوشش Cu_2O تهیه شده به روش ساختار ناهمگون بر پایه آن با بکارگیری مقدار بهینه شده از نانوکوره‌های Cu_2O

مشخص است که افزایش ظرفیت خازنی در ساختار ناهمگون در فرکانس‌های پایین اتفاق افتاده است. از آنجائیکه فرکانس‌های پایین تحولات در سطح مشترک الکترو و الکترولیت را نشان می‌دهد، افزایش ظرفیت خازنی می‌تواند به افزایش سطح ساختار ناهمگون با بکارگیری نانوکوره‌های Cu_2O مربوط شود. لذا مشخص است که با بکارگیری نانوکوره‌ها، سطح موثر ساختار بهبود بخشیده شده است.

- [11] K. P. Musselman, A. Marin, L. Schmidt-Mende, J. L. MacManus-Driscoll, "Incompatible Length Scales in Nanostructured Cu_2O ", *Solar Cells. Adv. Funct. Mater.* 22, 2202-2208, 2012.
- [12]. B. M. Kayes, H. A. Atwater, N. S. Lewis, "Comparision of the device physics principle of planar and radial p-n junction nanorods solar cells", *J. Appl. Phys*, 97, 114302, 2005.
- [13] L. Hang, H. Sun, L. Xie, J. Lu, L. Zhang, S. Wu, X. Gao, X. Lu, J. Li, J.-M. Liu, "Inorganic Solar Cells Based on Electrospun ZnO Nanofibrous Networks and Electrodeposited Cu_2O ". *Nanoscale Research Letters* 2015, 10, 465
- Solar Cells", *J. Appl. Phys.*, 32, 510-519, 1961.
- [6]. C. Malerba, F. Biccari, C. Leonor A. Ricardo, M. D'Incau, P. Scardi, A. Mittiga, "Absorption coefficient of bulk and thin film Cu_2O ", *Sol Energ Mat Sol C*, 95, 2848-2854, 2011.
- [7]. J. Deuermeier, J. Gassmann, A. Klein, "Reactive Magnetron Sputtering of Cu_2O : Dependence on Oxygen Pressure and Interface Formation with Indium Tin Oxide". *J. Appl. Phys*, 109, 113704-113707, 2011.
- [8]. A. Chen, H. Long, and P. Lu, "Controlled growth and characteristics of single-phase Cu_2O and CuO films by pulsed laser deposition", *Vacuum*, 83, 927-930, 2009.
- [9]. A. O. Musa, T. Akomolafe, M. J. Carter, "Production of Cuprous Oxide, a Solar Cell Material, by Thermal Oxidation and a Study of its Physical and Electrical Properties". *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 51, 305-316, 1998.
- [10] T. D. Golden, M. G. Shumsky, Y. Zhou, R. A. VanderWerf, R. A. Van Leeuwen, J. A. Switzer, "Electrochemical Deposition of Copper(I) Oxide Films." *Chem. Mater.* 8, 2499-2504., 1996.

Arhive