www.nanomeghyas.ir

بررسی تاثیر نانوساختارها در جریان فتوالکتروشیمیایی ساختارهای ناهمگون بر یایه Cu2O

لیلا شوشتری^۱ | اعظم ایرجی زاد^{۰٬۰} *| راحله محمدپور^۱

^۱ پژوهشکده علوم و فنآوری نانو، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، تهران ۲ دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، تهران

▶iraji@sharif.edu

چکیدہ:

نانومقياس

در این تحقیق تاثیر بکارگیری نانوکرهها و نانومیلههای Cu2O بر روی پوشش Cu2O که به ترتیب به روش ترسیب الکتروشیمیایی و اکسیداسیون حرارتی فراهم شده است، بررسی شده است. سطح لایهی Cu2O 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 می شوند. این ساختارهای با طول متوسط ۱۵۰ نانومتر، برای دستیابی به فاز خالص Ou2O در فرآیند حرارت دهی د دمای دمای ۲۰۰۰ در محیط آرگون قرار می گیرند. ساختار ناهمگون تودهای دوم از لایه نشانی چرخشی نانوکرههای تجاری شده به ابعاد ۳۵۰ نانومتر بر روی لایه توده ای Cu2O به روش ترسیب الکتروشیمیایی، فراهم شد. منحنی چگالی جریان – ولتاژ در آنالیز فتوالکتروشیمیایی، از هر دو ساختار ناهمگون بر پایه ی نانوکرهها در حالت بهینه خود به ترتیب بهبود جریان فتوالکتروشیمیایی در حدود ۶۷٪ و ۲۸٪ نسبت به ساختار فقط تودهای نشان می دهد. آنالیز اسپکتروسکوپ آمپدانس الکتروشیمیایی در حدود که مقاومت ساختارهای ناهمگون کاهش می یابد و سطح موثر آنها افزایش می داد

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

۱ مقدمه

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

Photoelectrochemical cell ^v

محسوب می شود. از این جهت استفاده از سیستم های

فتوالكتروشيمى (PEC) ضرورت مى يابد. همچنين امروزه

برای تولید هیدروژن در مقیاس صنعتی، از تکنولوژی های

آلاینده یعنی از انرژی های تجدیدناپذیر استفاده می شود،

درحالیکه استفاده از تفکیک کننده فتوالکتروشیمیایی آب که

از نور خورشید برای شکستن مولکول های آب به گازهای

هیدروژن و اکسیژن استفاده می کند، به عنوان یکی از

بهترین تکنولوژی ها برای تولید پاک و تجدیدپذیر هیدروژن

مطرح است. در این تکنولوژی یک لایه جاذب فعال بکار

می رود که هنگامی که نور خورشید به آن می رسد، جفت

Photovoltaics V

مقاله پژوهشی

نانومقياس

الکترون-حفره تولید می شود که می توانند در واکنش های تجزیه آب بصورت زیر شرکت کنند.

(۱) $E^0 = -1.23V$ (۱) که در آن $E^0 = -1.23V$ در آن E^0 حداقل ولتاژ لازم برای انجام این واکنش را نشان میدهد. بدین منظور استفاده از نیم رسانای مناسب که هزینه کمی برای تولید و ساخت آن نیاز باشد، ضرورت می-یابد. در این بین اکسیدهای فلزی گزینه ای مناسب هستند. علت علاقمندی و توجه به نیم رساناهای اکسیدی، فراوانی در طبیعت، غیر سمی بودن آنها، پایداری شیمیایی نسبتاً بالا و همچنین روش های ساخت در دمای اتاق و در محیط اتمسفر

معمولی میباشد که خود هزینه یکمی را در پی دارد.[۲] در میان نیم رساناهای اکسید فلزی، Cu₂O کاندیدای مناسبی برای تبدیل انرژی خورشیدی به حساب میآید. وادیا^۳ و همکارانش نشان دادهاند هزینه یخام مواد فتوولتایی مشتمل بر مس (شامل Cu₂O) از نازلیترین قیمتها میباشد. [۳]

Cu2O. دارای انرژی گاف مستقیم در حدود ۲-۲/۲ eV با ساختار شبکهای مکعبی است؛ بطوریکه بهعلت وجود تهی جاهای اکسیژن در این ساختار، نیمرسانای ذاتی نوع p است.[۵و 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 [۱۰] است. روش اکسیداسیون حرارتی که در آن از حرارت دهی فویل مس خالص در دماهای حدوداً بالاتر از ۲۰۰°C، به اکسید مس (I) دست مییابند، روشی کم هزينه و قابل اطمينان است. همچنين روش ترسيب الکتروشیمیایی امکان ساخت یوشش های Cu₂O در دمای اتاق و بر زیرلایه هادی با مورفولوژی مختلف را فراهم می-کند و بنابراین از روشهای قابل دستری محسوب می شود. یکی از چالشهای استفاده از نیمرسانای Cu₂O بعنوان لایه جاذب، کم بودن طول نفوذ حاملهای بار اقلیت نسبت به عمق نفوذ طول موج فوتون ورودى مىباشد. لذا احتمال

بازترکیب حاملهای بار در مرز اتصال ساختارهای ناهمگون برپایه این اکسید فلزی افزایش مییابد .برای غلبه براین چالش، کم کردن ضخامت ماده فعال یک راهکار محسوب مى شودكه البته باعث كاهش جذب فوتون هاى ورودى نيز می شود. راهکار موثر در این زمینه بکار بردن نانو ساختارها مىباشد بطوريكه با بكار بردن ها بتوان طول جمع آورى حامل های بار اقلیت راه کاهش داد. بطوریکه یک جاذب با جهت گیری عمودی مانند نانومیلهها در عمل می تواند میزان جذب ایتیکی بالایی در راستای محور داشته باشد در حالیکه جمع آوری حاملهای بار اقلیت در راستای شعاعی و در فاصله نسبتاً كوتاهي فراهم شود .[۴و ۱۱و ۱۲].همچنين بکاربردن نانوساختارها در سطح باعث بهبود جدایش بار در فصل مشترک ساختار می شود [۱۳]. در این تحقیق ساختارهای ناهمگون از پوش دهی نانومیلهها و نانوکرهها به ترتیب بر روی پوشش Cu2O که به دو روش اکسیداسیون حرارتی و ترسیب الکتروشیمیایی حاصل می شود، فراهم می-شود. نمودار چگالی جریان -ولتاژ این ساختارهای ناهمگون بهبود جریان را نسبت به حالت تودهای نشان میدهد. بررسی تاثير نانوساختارها با آناليز اسپكتروسكوپى امپدانس الكتروشيميايي مورد بررسي 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 Na₂SO₄ بکار رفته محصول شرکت مرک آلمان است. همچنین برای ساخت پوششهای شرکت مرک آلمان است. همچنین برای ساخت پوششهای Cu₂O از نمک سولفات مس و اسید لاکتیک استفاده شد. همچنین سوسپانسیون تجاری مشتمل بر نانوکره های Cu₂O با ابعاد حدود ۳۵۰nm در محیط آب–اتانول محصول شرکت آلدریچ است.

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

Wadia "

Thermal Oxidation *

Electrodeposition ^a

سال چهارم| شماره چهارم |زمستان ۱۳۹٦

مقاله پژوهشی

بررسی شد. تمامی آنالیزهای الکتروشیمیایی با دستگاه دستگاه پتانسیواستات/ گالوانواستات AutoLab مدل

روش آزمایش

نانومقياس

PGSTAT302N انجام شده است.

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

ساخت Cu₂O به روش اکسیداسیون حرارتی فویل مس (باهنر– ساخت ایران– خلوص ۹۹۸٪) پس از شسشتو در مواد شوینده و استون و آبکشی با آب ID ، در اسید نیتریک رقیق شده به نسبت ۱:۱ نیز قرار می گیرد تا لایه اکسید شده روی آن خورده شود. سپس در کوره متحرک در معرض شارش گاز آرگون با نرخ حرارت دهی O/min ۷۰ به دمای C/min گاز آرگون با نرخ حرارت دهی ۱۰۲۵ ۲۰ به دمای C/min گاز آرگون با نرخ مرارت دهی ماعت در این در این دما، گاز آرگون قطع و نمونه در معرض هوا قرار در این دما، گاز آرگون قطع و نمونه در معرض هوا قرار میگیرد. سپس دمای کوره با نرخ این دما، نمونه در معرض مرض مای کار میران در این دما، تاز جابجایی کوره در این دما، نمونه در معرض

تهیه پوشش Cu₂O به روش ترسیب الکتروشیمیایی لایهنشانی پوشش Cu₂O درچیدمان سه الکترودی مشتمل بر الکترود رفرنس Ag/AgCl در الکترولیت MKCl و الکترود شمارش پلاتین و همچنین الکترود کار ITO انجام میشود. الکترولیت مورد استفاده از 0.2M CuSO4 و اسید میشود. الکترولیت مورد استفاده از با اضافه کردن هیدروکسید لاکتیک MR است، که PH آن با اضافه کردن هیدروکسید سدیم برابر ۲۲تنظیم می-شود. درجه حرارت حمام لایهنشانی دمای ۲°۳۶ است. ولتاژ اعمالی ۸۵/۰۰ بر حسب Ag/AgCl است.

تهیه میلههای Cu₂O:

برای تولید نانوساختار Cu₂O از روش اکسیداسیون آندی^۶ استفاده میشود. فویل مس مورد نظر پس از شستشوهای اولیه با استفاده از پودر آلومینیا ۵۰۰nm، مورد صیقل کاری قرار می گیرد که علاوه برحذف فیزیکی لایه اکسیدی، سطحی آینهای شکل فراهم شود. الکترولیت مورد استفاده،

محلول آبی KOH با ۱۱ = pH است. ولتاژ اعمالی برای انجام فرآیند اکسیداسیون آندی مقدار ۷ ۱۰ و زمان انجام فرآیند، حداقل ۱۰ دقیقه است. نانوساختارهای تهیه شده از این فرآیند از انتهای سلول الکتروشیمیایی جمع آوری شده و برای انجام فرآیند حرارت دهی در بوته تنگستنی در کوره استوانهای قرار می گیرند وفرآیندهای حرارت دهی مختلفی برای دستیابی به فاز خالص Cu₂O از این نانوساختارها انجام میشود.

تهيه ساختار ناهمگون تودهاي

از آنجائیکه هدف نهایی دستیابی به ساختارهای ناهمگون از پوششهای تودهای و نانوساختارهای اکسید مس است، لازم است که نانوساختارهای تهیه شده بگونهای روی پوششهای ویفری Cu₂O قرار گیرند. بدین منظور از روش لایهنشانی چرخشی استفاده می شود،

بدین ترتیب نانومیلههای تشکیل شده از فرآیند اکسیداسیون آندی از طریق این لایه نشانی بر روی پوششCu₂O به روش اکسیداسیون حرارتی قرار میگیرند و سپس ساختار جدید، تحت فرآیند بهینه شده در کوره و در معرض شارش گاز آرگون قرار میگیرد. نانوساختارهای ناهمگون مختلفی با استفاده از لایه نشانی چرخشی مقادیر مختلف ۱۰۱ ،μ۹ و ۱۵ از سوسپانسیون پایدار نانوکره Cu₂O بر روی ترسیب الکتروشیمیایی Cu₂O فراهم میشوند.

آنالیز فتوالکتروشیمیایی برای ساختار ناهمگون چیدمان الکتروشیمیایی با بکارگرفتن الکترود شمارش پلاتین و الکترود رفرنس Ag/AgCl در محلول ۳M از KCl بدست می آید که ساختارهای ناهمگون الکترود کار است.. می آید که ساختارهای ناهمگون الکترود کار است.. الکترولیت مورد استفاده برای این آنالیز محلول آبی از Na2SO4 می باشد. نور فرودی بصورت متناوب در این سیستم اعمال می شود.

۳ نتایج و بحث

أناليز XRD

پس از ساخت پوشش های تودهای Cu₂O به دو روش این نمونه ها تحت آنالیز XRD قرار می گیرند که در شکل ۱ الف

Anodize '

نانومقياس

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 Cu2O خالص با پیک مرجح (۱۱۱) تبدیل شده است.

برای دستیابی به نانوساختارهایی با فاز خالص از Cu2O فرآیند حرارت دهی در دمای C° ۲۰۰ به مدت ۱۵ دقیقه و در گاز ارگون انجام شد. آنالیز XRD ازین نمونهها که در شکل ۱ج آمده است، فاز CuO را در هیج زاویه ای نشان نمی دهد.



شکل ۱. آنالیز XRD از الف) پوشش Cu₂O به روش اکسیداسیون حرارتی، ب) پوشش Cu₂O به روش ترسیب الکتروشیمیایی و ج) نانوساختارهای بدست آمده از اکسیداسیون آندی پس از حرارت دهی در دمای C۰۰۰C به مدت ۱۵ دقیقه

آنالیز SEM و XRD از نانوساختارها

در شکل زیر آنالیز SEM از سطح پوشش Cu₂O ساخته شده به روش اکسیداسیون حرارتی نشان داده شده است. مشخص است که سطحی کاملا یکنواخت با حضورمرزدانه-هایی 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 Cu₂O فراهم شده است، در داخل شکل ۴-ب نشان داده شده است.

مشخص است با این روش نانوس اختارها پس از فرآیند حرارت دهی چسبندگب مناسبی را به سطح Cu2O تودهای دارند.

همچنین در شکل ج تصویری از سطح پوشش Cu₂O 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 می-شوند که این امر از مرجح بودن فاز (۱۱۱) در آنالیز XRD را تایید می کند. پس از لایه نشانی نانوکرههای Cu₂O سطح پوشش بصورت یکنواخت ازین نانوساختارها پوشانده می شود که فاصله موجود بین دانههای شکل گرفته در ساختار اولیه را می پوشاند و فاصله ی دانه بندی ها را نیز کاهش می دهد.



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 Cu₂O 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 Cu₂O تودهای

آنالیزهای فتوالکتروشیمیایی ساختارهای ناهمگون Cu2O

در این قسمت آنالیزهای مربوط به ساختار Cu₂O نانوساختار/تودهای مورد بررسی قرار می دهیم. همانطور که ذکر شد ساختار ناهمگون تودهای از لایه نشانی چرخشی نانوساختارهای بر ویفر Cu₂O ساخته شده به دو روش

سال چهارم| شماره چهارم |زمستان ۱۳۹٦

مقاله پژوهشی

نانومقياس

اکسیداسیون حرارتی و ترسیب الکتروشیمیایی فراهم می-شود.

برای بررسی عملکرد خاصیت فتوالکتروشیمیایی ساختار تودهای و ساختار ناهمگون Cu₂O، 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 Cu₂O را نشان میدهد. مشخص است که در ساختار ناهمگون اول چگالی میدهد. مشخص است که در ساختار ناهمگون اول چگالی جریان بصورت چشمگیری افزایش پیدا کرده است، بطوریکه جریان بصورت چشمگیری افزایش پیدا کرده است، بطوریکه در ولتاژ V۶/۰– افزایش جریان حدود ۷۶٪ افزایش یافته و به مقدار 2mA/cm² /میرسد. همچنین تغییرات جریان زمان برای ساختارهای ناهمگون ساخته شده با مقادیر مختلف نانوکرههای Cu₂O نیز در شکل۳–ب نشان داده شده است.



شکل ۳. تغییرات جریان بر حسب ولتاژ برای الف) پوشش تودهای Cu₂O ساخته شده به روش اکسیداسیون حرارتی و ساختار ناهمگون تودهای بر پایه آن با بکارگیری نانومیلههای اکسیداسیون و آندی و باختار ب) پوشش تودهای به روش ترسیب الکتروشیمیایی و ساختار ناهمگون تودهای بر پایه آن با بکارگیری مقادیر مختلف سوسپانسیون مشتمل بر نانوکرههای Cu₂O

از نمودار تغییرات چگالی جریان برحسب ولتاز مشخص است که بهترین پاسخ از ساختار ناهمگون تودهای با بکارگیری ۵µ۱ از سوسپانسون پیادار حاوی نانوکرههای Cu₂O فراهم می شود. این ساختار افزایش جریان حدود ۲۸٪ را نسبت به حالت توده ای خود در ولتاژ ۰۰/۶۷ نشان میدهد. برای اطلاع بیشتر از میزان افزایش چگالی جریان با تابش نور پالسی برای ساختار ناهمگون تودهای/ نانوساختار Cu₂O از آناليز EIS استفاده مي شود. اين آناليز در سلول الكتروشيميايي سه الكترود انجام شد كه فركانس اعمالي در این آنالیز EIS ۲۰۰۰ –۰/۰۱ بوده است. آنالیز EIS برای دو ساختار تودهای و ناهمگون تودهای انجام شد؛ منحنی نایکوئیست ساختارها، در شکل۴الف نشان میدهد که مقاومت انتقال بار در ساختار تودهای در حدود مگا اهم است در حالیکه این مقدار برای ساختار فیلم/نانومیله Cu2O در مقایسه با مقاومت فیلم اکسید مس در حدود Ω ۱۰ کاهش یافته است (شکل۴ب).



شکل ۴. منحنی نایکوئیست در تاریکی و ولتاز مدار باز در محلول Na₂SO₄(1M) برای الف) پوشش Cu₂O تهیه شده به روش اکسیداسیون حرارتی و ب) ساختار ناهمگون نانومیله/ لایه Cu₂O

مقاله پژوهشی

نانومقياس

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

بررسی امپدانس الکتروشیمیایی از نانوساختار ناهمگون از نانوکرههای Cu₂O نیز انجام شد. با استفاده از آنالیز می وان ظرفیت خازنی شکل گرفته بین نیمرسانا و الکترولیت را بررسی کرد. در شکل۵، تغییرات ظرفیت خازنی بر حسب فرکانس برای حالت تودهای Cu₂O 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 Cu₂O تهیه شده به روش ساختار ناهمگون بر پایه ان با بکارگیری مقدار بهینه شده از نانوکرههای Cu₂O

مشخص است که افزایش ظرفیت خازنی در ساختار ناهمگون در فرکانسهای پایین اتفاق افتاده است. از انجائیکه فرکانس-های پایین تحولات در سطح مشترک الکترود و الکترولیت را نشان میدهد، افزایش ظرفیت خازنی میتواند به افزایش سطح ساختار ناهمگون با بکارگیری نانوکرههای Cu2O مربوط شود . لذا مشخص است که با بکارگیری نانوکرهها، سطح موثر ساختار بهبود بخشیده شده است.

٤ نتيجه گيري

در این مطالعه دو ساختار ناهمگون تودهای با استفاده از نانوکرهها و نانومیلههای Cu₂O بر پوششی از این نیم رسانای اکسید فلزی ساخته شد. تصاویر SEM نشان می-دهد که پوشش هایی همگن ازین ساختار های فراهم شده است.. تغییرات چگالی جریان بر حسب ولتاژ، افزایش ۷۶٪ و ۲۸٪ ای را نسبت به حالت تودهای خود نشان میدهد. آنالیز ای را نسبت به حالت تودهای خود نشان میدهد. آنالیز امپدانس اسپکتروسکوپی برای این دو ساختار کاهش مقاومت امپدانس اس ماختارها را نسبت به حالت تودهای خود نشان موثر در این ساختارها را نسبت به حالت تودهای خود نشان

تشکر و قدردانی

مراجع

بدینوسیله از حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران (INSF) (با شماره ۹۵۸۴۲۴۱۳) و همچنین گرنت دانشگاه معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف (با شماره گرنت۹۳۱۱۳) برای انجام این پروژه تقدیر و تشکر می شود

[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 Cu₂O", 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

سال چهارم| شماره چهارم |زمستان ۱۳۹٦

مقاله پژوهشی

[11] K. P. Musselman, A. Marin, L. Schmidt-Mende, J. L. MacManus-Driscoll,
"Incompatible Length Scales in Nanostructured Cu₂O", 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 Cu₂O". Nanoscale Research Letters 2015, 10, 465

Solar Cells", J. Appl. Phys., 32, 510-519, 1961.

نانومقياس

[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 Cu₂O:
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 Cu₂O 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.