

مقاله پژوهشی

بررسی پارامترهای موثر در ساخت ساختارهای اکسید مس برای استفاده در فرآیندهای فوتوالکتروشیمیایی تجزیه آب

سولماز جمالی^۱ و احمد مشاعی^{۱*}

۱- بخش فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۸/۰۷/۰۲، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۸/۰۸/۲۹، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۸/۱۰/۲۷

چکیده

در این تحقیق پارامترهای تاثیرگذار در ساخت نانوساختارهای نیمرسانای اکسید مس به روش رسوب الکتریکی جهت کاربرد در تجزیه فتوالکتروشیمیایی آب مورد مطالعه قرار گرفته است. این پارامترها شامل اثر pH الکترولیت، پتانسیل اعمال شده، مدت زمان سنتز نمونه و دمای الکترولیت می‌باشند. اکسید مس به دلیل دارا بودن بالاترین بازده نظری برای تجزیه فتوالکتروشیمیایی آب، بسیار مورد توجه می‌باشد. از آزمون‌های پراش پرتو ایکس، میکروسکوپ الکترونی، طیف جذب UV-Vis و آزمون EDX برای بررسی ویژگی‌های ساختاری اکسید مس ساخته شده، استفاده شده است. در هر مرحله، فعالیت فوتوالکتروشیمیایی نمونه‌های ساخته شده از طریق آزمون جریان-ولتاژ تجزیه آب مورد مطالعه قرار گرفته است. بر این اساس، بهترین کارکرد تجزیه آب، از نمونه‌های اکسید مس ساخته شده در pH الکترولیت ۱۳، در دمای ۶۰ °C و با اعمال پتانسیل ۰/۶ V- به مدت ۳۰ دقیقه حاصل گردید.

واژه‌های کلیدی: نانوساختارهای Cu₂O، تجزیه فوتوالکتروشیمیایی آب، جریان فوتونی، شرایط بهینه ساخت.

۱- مقدمه

[۱-۶]. در سال‌های اخیر نیمرسانای اکسید فلزی Cu₂O در

سلول‌های خورشیدی و در فرآیندهای فوتوالکتروشیمیایی

تجزیه آب بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۲۰-۷].

اکسید مس نیمرسانای نوع p است که دارای شکاف انرژی

مستقیم حدود ۲ الکترون ولتی می‌باشد. جریان فوتونی نظری

محاسبه شده برای اکسید مس در تجزیه فتوالکتروشیمیایی

آب برابر ۱۴/۷ mA/cm²- تعیین می‌شود که متناسب با بازده

نیمرساناهای اکسید فلزی به دلیل ویژگی‌های منحصربفردشان

شامل فراوانی در طبیعت، سازگاری با محیط زیست و ارزان

بودن بسیار مورد توجه هستند. این نوع از نیمرساناها، برای

دسته فراوانی از کاربردها شامل کاتالیست‌ها، سنسورها،

سلول‌های خورشیدی، دیودها و ترانزیستورها مناسب هستند

* عهده‌دار مکاتبات: احمد مشاعی

نشانی: تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پایه، بخش فیزیک

تلفن: ۸۲۸۸۴۴۹۳-۰۲۱، دورنگار: ۸۲۸۸۳۴۵۹-۰۲۱، پست الکترونیکی: moshahi@modares.ac.ir

فوتوالکتروشیمیایی اکسید مس، نمونه‌های مختلفی با تغییر شرایط pH و دمای الکترولیت، پتانسیل اعمالی و دمای الکترولیت سنتز شدند. سپس نمونه‌های سنتز شده با تغییر پارامترهای عنوان شده، مورد مطالعه فوتوالکتروشیمیایی قرار گرفته‌اند و با تعیین بهترین نمونه سنتز شده تحت شرایط مختلف، شرایط بهینه ساخت رسوب‌دهی الکتریکی اکسید مس استخراج شده است.

۲- فعالیت‌های تجربی

برای ساخت نانوساختارهای اکسید مس بر روی FTO به روش رسوب‌دهی الکتریکی از چیدمان سه الکترودی استفاده شده است که در آن، زیرلایه FTO به عنوان کاتد یا الکترود کار، الکترود پلاتین به عنوان آنود یا الکترود شمارنده و الکترود رفرنس Ag/AgCl به عنوان الکترود مرجع استفاده شدند. زیرلایه‌های FTO قبل از لایه‌نشانی با استفاده از استون، اتانول و آب دیونیزه به مدت ده دقیقه در دستگاه اولتراسونیک شسته و تمیز شدند. بر اساس مطالعات انجام شده و گزارشات موجود الکترولیت بهینه برای سنتز، شامل محلول ۰/۲ مولار CuSO_4 و ۳ مولار اسید لاکتیک به همراه بافر نیم مولار K_2HPO_4 می‌باشد [۵-۱۱]. pH محلول با استفاده از محلول KOH تنظیم می‌شود. دمای الکترولیت با استفاده از حمام آبی کنترل می‌شود. در این روش الکترودها در محلول الکترولیت قرار گرفته و ظرف حاوی الکترولیت برای کنترل دمایی در داخل حمام آبی قرار می‌گیرد. فرآیند اعمال و تنظیم ولتاژ توسط دستگاه پتانسیواستات انجام می‌گیرد.

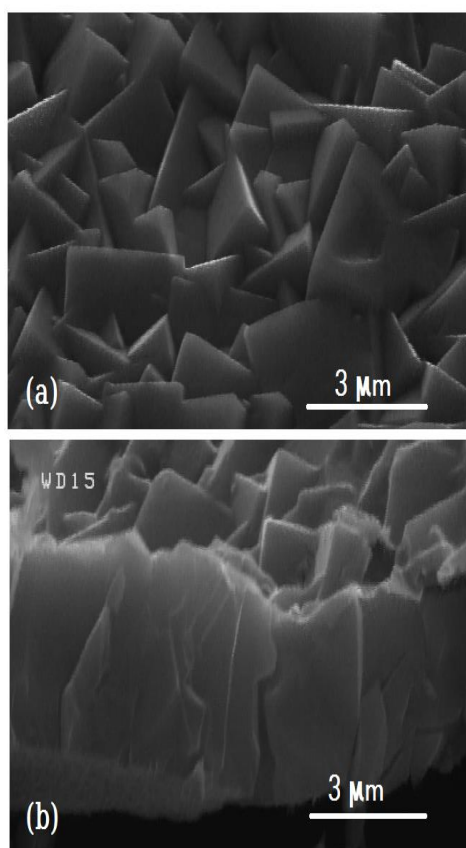
ریخت‌شناسی و ساختار نمونه‌های Cu_2O ، توسط میکروسکوپ الکترونی FESEM و آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD, Xpert, Philips) با تابش $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1.54 \text{ \AA}$) مورد بررسی قرار گرفت. کارایی فوتوالکتروشیمیایی نمونه‌ها در یک سیستم سه الکترودی با استفاده از Na_2SO_4 ۱ مولار به عنوان الکترولیت با دستگاه پتانسیواستات (OrigaMaster) مطالعه شد. پیکربندی سه الکترودی از یک الکترود رفرنس

تبدیل انرژی خورشیدی به هیدروژن برابر ۱۸٪ می‌باشد [۲۵-۲۱]. شکاف انرژی مستقیم Cu_2O معمولاً برای کاربردهای خورشیدی مطلوب است زیرا فرآیند جذب نور در این حالت شامل انتقال مستقیم یک الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش بدون هیچ تغییری در تکانه آن می‌باشد. نوارهای انرژی رسانش و ظرفیت اکسید مس، پتانسیل‌های اکسایش و کاهش آب را در برمی‌گیرد و نیازمندی‌های واکنش‌های تجزیه آب را بطور کامل تامین می‌کند. علاوه بر آن نوار رسانش اکسید Cu در حدود ۰/۷ V منفی‌تر از پتانسیل کاهش آب قرار گرفته است که اضافه پتانسیل قوی‌ای را برای واکنش تولید هیدروژن تامین می‌کند. طول دیفیوژن حامل‌های اقلیت در Cu_2O ، ۱۰۰-۲۰ گزارش شده است [۳۰-۲۶].

تاکنون روش‌های فراوانی برای ساخت اکسید مس شامل رسوب‌دهی الکتریکی، آندی کردن الکروشیمیایی و اکسایش حرارتی لایه‌های Cu بکار گرفته شده‌اند [۳۹-۳۱]. از بین روش‌های استفاده شده، رسوب‌دهی الکتریکی به دلیل راحتی، ارزان بودن و تولید نمونه‌های Cu_2O با بیشترین بازده فوتوالکتروشیمیایی بیش از سایر روش‌ها مورد توجه قرار گرفته است. تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه بهبود شرایط تاثیرگذار در سنتز اکسید مس به روش رسوب‌دهی الکتریکی انجام شده است. به عنوان مثال در مقالات مختلف اثر پارامترهای مختلف بر روی سنتز اکسید مس برای استفاده در کاربردهای مختلف به صورت جداگانه بررسی شده است و شرایط بهینه سنتز نمونه‌ها در شرایط مختلف گزارش شده است [۴۴-۴۰]. در این تحقیق به دنبال بهینه کردن ساخت نمونه‌های اکسید مس به روش رسوب‌دهی الکتریکی جهت کاربرد در فرآیندهای تجزیه الکروشیمیایی آب هستیم. بر این اساس، در ابتدا با مرور یافته‌های پیشین پارامترهای موثر در سنتز اکسید مس به روش رسوب‌دهی الکتریکی شناسایی شد. این پارامترها شامل pH الکترولیت، پتانسیل اعمال شده، مدت زمان سنتز نمونه و دمای الکترولیت می‌باشند. برای بررسی اثر هر یک از این پارامترها بر روی ویژگی‌های

Cu₂O را بر روی زیرلایه FTO نشان می‌دهند. قله‌های مشخصه SnO₂ نمایانگر زیرلایه FTO بر روی سطح زیرلایه می‌باشد.

تصاویر SEM سطح بالا و سطح مقطع نانوساختارهای اکسید مس ساخته شده به روش رسوب‌دهی الکتریکی در شکل ۲ نشان داده شده است. برای این نمونه‌ها حضور دانه‌هایی با شکل اهرام چهارگوش به وضوح قابل مشاهده می‌باشند که مطابق با گزارش‌های پیشین می‌باشد [۷].



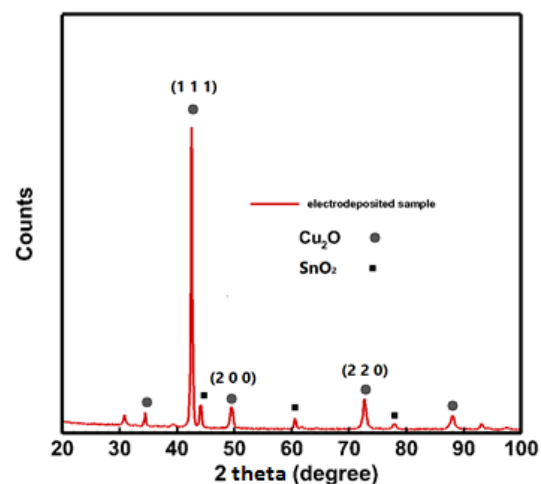
شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه اکسید مس سنتز شده در شرایط: pH الکترولیت ۱۳، دمای الکترولیت ۶۰ °C، پتانسیل اعمالی ۰/۶ V- و مدت زمان سنتز ۳۰ دقیقه به روش رسوب‌دهی الکتریکی (الف) از بالا و (ب) سطح مقطع عرضی.

اندازه دانه‌های تشکیل شده در این سطوح در حدود ۲۰۰ nm تا ۶۰۰ nm بوده و ضخامت لایه تشکیل شده در حدود ۲ میکرون تا ۳ میکرون می‌باشد. از آنجایی که طول دیفیوژن حامل‌های اقلیت در Cu₂O، ۱۰۰-۲۰۰ nm گزارش شده است

در Ag/AgCl اشباع شده بعنوان الکترود مرجع، یک سیم پلاتینی بعنوان الکترود شمارشگر و نمونه Cu₂O ساخته شده به روش رسوب‌دهی الکتریکی بعنوان الکترود کار تشکیل شده است. پاسخ نوری تحت تابش یک لامپ زنون ۳۰۰ W (Oriol) با شدت ۱۰۰ mW/cm² (مشابه تابش خورشید تحت AM 1.5) بررسی شد. برای تمامی نمونه‌ها نرخ پویش ۵۰ mVs⁻¹ برای اندازه‌گیری منحنی‌های جریان-ولتاژ استفاده شد.

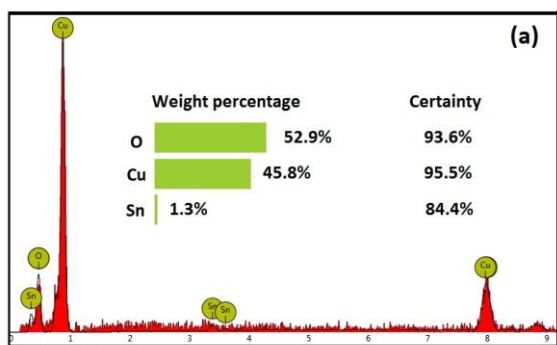
۳- نتایج و بحث

پس از ساخت نانوساختارهای اکسید مس به روش رسوب‌دهی الکتریکی سه الکترودی، نمونه‌ها برای بررسی ساختار و شکل، توسط میکروسکوپ الکترونی و الگوی پراش پرتو ایکس مورد بررسی قرار گرفتند. نمودار پراش پرتو ایکس یک نمونه از نانوساختارهای اکسید مس سنتز شده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: الگوی پراش اشعه ایکس یک نمونه نوعی از نانوساختارهای اکسید مس Cu₂O سنتز شده به روش رسوب‌دهی الکتریکی در شرایط: pH الکترولیت ۱۳، دمای الکترولیت ۶۰ °C، پتانسیل اعمالی ۰/۶ V- و مدت زمان سنتز ۳۰ دقیقه.

قله‌های مشخصه (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۲۰) در زوایای پراش ۴۲/۵°، ۴۹/۵° و ۷۲/۶° به وضوح تشکیل نانوکریستال‌های



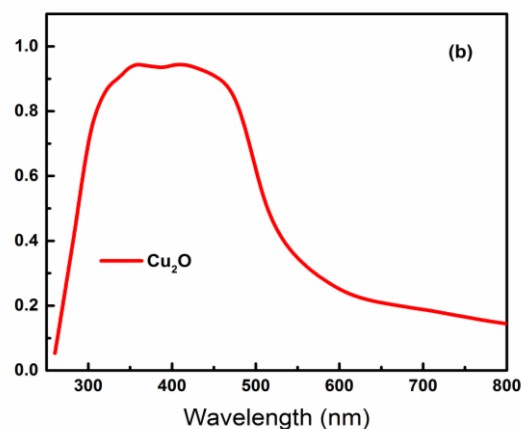
شکل ۴: نمودار اندازه‌گیری EDX نمونه Cu_2O سنتز شده به روش رسوب‌دهی الکتریکی تحت شرایط pH الکترولیت ۱۳، دمای الکترولیت 60°C ، پتانسیل اعمالی $0/6\text{V}$ - و مدت زمان سنتز ۳۰ دقیقه.

یکی از جنبه‌های مورد توجه رسوب‌دهی الکتریکی Cu_2O این است که چگونه pH الکترولیت جهت‌گیری دانه‌ها را در لایه‌ها تحت تاثیر قرار می‌دهد. به عنوان مثال Ma و همکارانش گزارش داده‌اند که اکسید مس رشد داده شده در pH ۱۲ بهترین بازدهی را در تولید هیدروژن به روش فوتوالکتروشیمیایی نشان می‌دهد که منجر به بالاترین جریان فوتونی می‌شود [۴۵]. در این بخش تاثیر pH الکترولیت بر روی جهت‌گیری دانه‌ها و شکل کریستالی نمونه‌های Cu_2O و اثر آن بر روی ویژگی‌های فوتوالکتروشیمیایی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. برای دستیابی به این منظور نمونه‌های اکسید مس در الکترولیت با pHهای مختلف ۱۱، ۱۲ و ۱۳ ساخته شدند و ویژگی‌های فوتوالکتروشیمیایی آنها مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج بدست آمده در شکل ۵ برای دو حالت تاریکی و تابش نور، نمایش داده شده‌اند.

بررسی نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد که مقدار بهینه pH الکترولیت برای ساخت لایه‌های اکسید مس برای استفاده در فرآیندهای فوتوالکتروشیمیایی تجزیه آب برابر ۱۳ می‌باشد. نمونه‌های اکسید مس ساخته شده در این مقدار pH بهترین جریان فوتونی را در مقایسه با سایر نمونه‌های ساخته شده در سایر مقادیر pH نشان می‌دهند. مقایسه این مقدار جریان فوتونی با مقادیر جریان فوتونی گزارش شده در سایر مقالات نشان می‌دهد که نمونه‌های سنتز شده در این تحقیق بازدهی

[۲۷] برای داشتن ویژگی‌های فوتوالکتروشیمیایی قابل قبول وجود نانوساختارهایی با لبه‌های در ابعاد ۲۰ nm تا ۶۰ nm در سطح نانوساختارهای اکسید مس تشکیل شده قابل پیش‌بینی می‌باشد.

طیف جذب UV-Vis یک نمونه نانوساختار اکسید مس ساخته شده در شکل ۳ نشان داده شده است. نمودار طیف جذب، محدوده جذب فوتونی Cu_2O را نشان می‌دهد. بررسی این نمودار، تاییدکننده جذب بالای نانوساختارهای اکسید مس تولید شده به روش رسوب‌دهی الکتریکی در ناحیه مرئی می‌باشد. این محدوده جذب گزارش شده موید تشکیل نانوساختارهای اکسید مس می‌باشد.

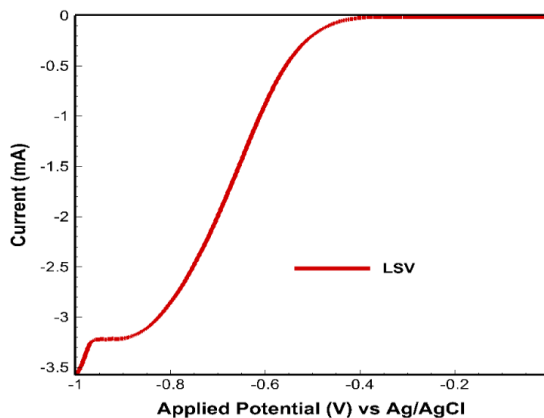


شکل ۳: طیف جذب اپتیکی یک نمونه نوعی اکسید مس سنتز شده در شرایط pH الکترولیت ۱۳، دمای الکترولیت 60°C ، پتانسیل اعمالی $0/6\text{V}$ - و مدت زمان سنتز ۳۰ دقیقه.

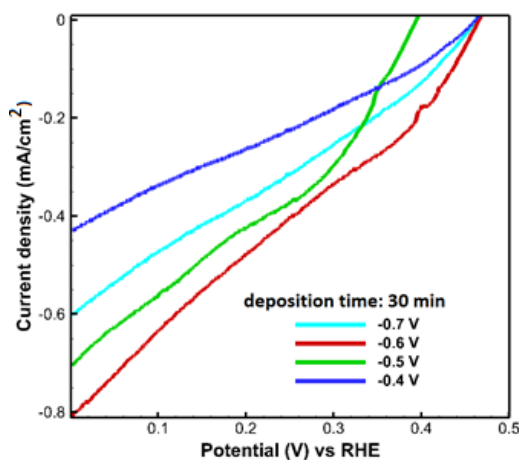
برای بررسی مقادیر و درصد عناصر موجود بر روی سطح نمونه‌های ساخته شده از اندازه‌گیری EDX استفاده شد. بررسی نمودار شکل ۴ حضور عناصر Cu، O و Sn را بر روی سطح نشان می‌دهد. بنابراین تشکیل لایه Cu_2O بر روی سطح FTO با ساختار کریستالی منظم تایید می‌گردد.

در ادامه برای بدست آوردن نمونه‌های اکسید مس با بهترین بازده در فرآیندهای فوتوالکتروشیمیایی تجزیه آب، عوامل مختلف تاثیرگذار بر روی فرآیند لایه‌نشانی اکسید مس مورد بررسی قرار گرفته و مقادیر بهینه هر یک از عوامل بدست آمده است.

انجام گرفت و نمودارهای جریان ولتاژ آن‌ها برای بررسی ویژگی‌های فوتوالکتروشیمیایی آن‌ها و مقایسه چگالی جریان فوتونی هر یک از نمونه‌های ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در شکل ۷ نمایش داده شده است.



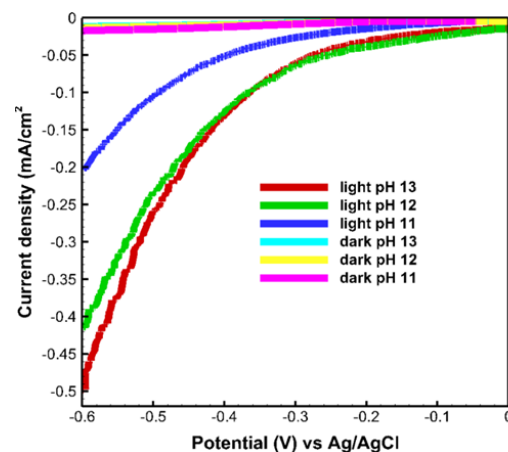
شکل ۶: نمودار ولتامتری چرخه‌ای برای محلول شامل ۰/۲ مولار CuSO_4 و ۳ مولار اسید لاکتیک (pH الکتروولت ۱۳ و دمای 65°C).



شکل ۷: نمودار جریان-ولتاژ I-V نمونه‌های اکسید مس ساخته شده در ولتاژهای مختلف ۰/۴ V، ۰/۵ V، ۰/۶ V و ۰/۷ V.

با بررسی مقادیر چگالی جریان فوتونی بدست آمده از نمونه‌های ساخته شده در پتانسیل‌های مختلف مشاهده می‌شود که نمونه ساخته شده در پتانسیل ۰/۶ V - بهترین جریان فوتونی را در مقایسه با سایر نمونه‌ها از خود نشان می‌دهد بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ولتاژ بهینه برای ساخت نمونه‌های اکسید مس برابر ۰/۶ V خواهد بود.

فوتوالکتروشیمیایی بهتری نسبت به سایر نمونه‌های گزارش شده دارد.

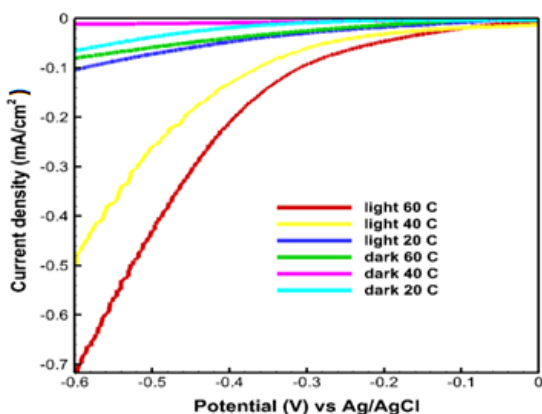


شکل ۸: نمودار جریان-ولتاژ I-V نمونه‌های Cu_2O سنتز شده در pHهای مختلف ۱۱، ۱۲ و ۱۳ تحت شرایط تاریکی و تابش نور.

قبل از انجام هر گونه فرآیند رسوب‌دهی الکتریکی، لازم است اندازه‌گیری ولتامتری چرخه‌ای CV برای بدست آوردن پارامترهای مورد نیاز برای لایه‌نشانی اکسید مس انجام شود. بر اساس نمودار ولتامتری چرخه‌ای CV، می‌توان محدوده پتانسیلی مورد نظر برای رسوب‌دهی الکتریکی لایه Cu_2O را بدست آورد. بررسی نمودار ولتامتری چرخه‌ای CV مراجع مختلف نشان می‌دهد که میزان لایه‌نشانی Cu_2O با افزایش پتانسیل رسوب‌دهی الکتریکی کاهش می‌یابد و در پتانسیل‌های حدود ۰/۹ V - ناپدید می‌شود [۴۶]. بر این اساس در ابتدا نمودار ولتامتری چرخه‌ای لایه‌نشانی Cu_2O بر روی الکتروود بدست آمد که در شکل ۶ نمایش داده شده است. بر اساس نتیجه این شکل، محدوده مورد نظر برای ساخت Cu_2O برابر ۰/۴ V تا ۰/۸ V - بدست آمد.

برای بررسی اثر پتانسیل‌های اعمالی مختلف، نمونه‌های اکسید مس در پتانسیل‌های لایه‌نشانی مختلف ۰/۴ V -، ۰/۵ V -، ۰/۶ V - و ۰/۷ V - ساخته شدند تا بهترین مقدار پتانسیل لایه‌نشانی برای بدست آوردن نمونه‌های فعال الکتروشیمیایی بدست آید. سپس برای بدست آوردن فعالیت نمونه‌ها، اندازه‌گیری فوتوالکتروشیمیایی بر روی نمونه‌ها

ویژگی های فوتوالکتروشیمیایی نمونه های اکسید مس ساخته شده، دمای الکترولیت با استفاده از حمام آبی بر روی دماهای مختلف ۲۰، ۴۰ و ۶۰ °C تنظیم شد و نمونه های ساخته شده تحت شرایط مختلف دمایی مورد اندازه گیری فوتوالکتروشیمیایی قرار گرفتند و نمودارهای جریان ولتاژ آن ها بدست آمد. نتایج در نمودار شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹: نمودار جریان-ولتاژ I-V نمونه های سنتز شده به روش رسوب دهی الکتریکی در دماهای مختلف ۲۰، ۴۰ و ۶۰ °C.

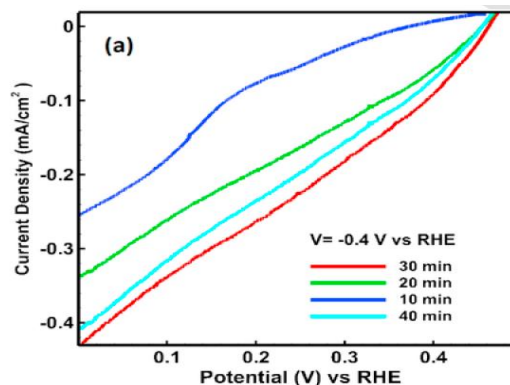
بر اساس نتایج بدست آمده از نمودار جریان-ولتاژ شکل ۹ بهترین چگالی جریان فوتونی از نمونه ساخته شده در دمای ۶۰ °C بدست آمده است. بنابراین دمای بهینه برای ساخت نانوساختارهای اکسید مس ۶۰ °C می باشد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله اثر پارامترهای مختلف سنتز به روش رسوب دهی الکتریکی بر روی نانوساختارهای نیم رسانای اکسید فلزی Cu_2O برای استفاده در فرآیندهای فوتوالکتروشیمیایی تجزیه آب مورد بررسی قرار گرفت و مقادیر بهینه این پارامترها بدست آمد. این پارامترها شامل pH الکترولیت، دمای الکترولیت، پتانسیل اعمالی و مدت زمان سنتز اکسید مس می باشند. با اندازه گیری های فوتوالکتروشیمیایی و منحنی های جریان-ولتاژ، مقادیر بهینه پارامترهای فوق برای بدست

مدت زمان ساخت در فرآیند رسوب دهی الکتریکی Cu_2O ، تعیین کننده مقدار و ضخامت لایه نازک ایجاد شده بر روی سطح زیر لایه می باشد. با افزایش زمان ساخت، ضخامت ساختار ایجاد شده بر روی سطح افزایش می یابد. ضخامت لایه فوتوکاتالیست دارای مقدار بهینه ای می باشد که بیشتر شدن آن تاثیری در بهبود ویژگی های فوتوالکتروشیمیایی آن نخواهد داشت.

برای بدست آوردن ضخامت بهینه، نمونه های اکسید مس در زمان های مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ دقیقه ساخته شدند. نتایج حاصل در نمودار شکل ۸ نشان داده شده است. با بررسی مقادیر مختلف چگالی جریان فوتونی بدست آمده از نمونه های Cu_2O ساخته شده در زمان های مختلف می توان مشاهده کرد که نمونه های ساخته شده در زمان ۳۰ دقیقه بهترین جریان فوتونی را در مقایسه با نمونه های ساخته شده در زمان های دیگر از خود نشان می دهند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که مدت زمان بهینه برای ساخت ضخامت مناسب لایه های اکسید مس برابر ۳۰ دقیقه می باشد.



شکل ۸: نمودار جریان-ولتاژ I-V نمونه های اکسید مس سنتز شده به روش رسوب دهی الکتریکی در زمان های مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ دقیقه.

دمای الکترولیت بر روی شکل ساختارهای اکسید مس ایجاد شده و ساختار کریستالی آن ها تاثیر می گذارد. بر اساس گزارش های موجود، محدوده دمایی مناسب برای رسوب دهی الکتریکی اکسید مس بین ۲۰ تا ۶۰ °C می باشد [۴۴]. برای بررسی اثر پارامتر دما بر روی ساختار و

- [20] M. Chhetri, C.N.R. Rao, *Physical Chemistry Chemical Physics*, **22**, 2018
- [21] Y. Lim, C.S. Chua, C.J. J. Lee, D. Chi, *Physical Chemistry Chemical Physics*, **16**, 2014, 25928.
- [22] J.S. Sagu, T.N. Peiris, K.U. Wijayantha, *Electrochemistry Communications*, **42**, 2014, 68.
- [23] X. Guo, P. Diao, D. Xu, S. Huang, Y. Yang, T. Jin, Q. Wu, M. Xiang, M. Zhang, *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**, 2014, 7686.
- [24] P. De Jongh, D. Vanmaekelbergh, J.J. Kelly, *Journal of the Electrochemical Society*, **147**, 2000, 486.
- [25] N.D. Khiavi, R. Katal, S.K. Eshkalak, S. Masudy-Panah, S. Ramakrishna, H. Jiangyong, *Nanomaterials*, **9**, 2019, 1011.
- [26] W. Siripala, A. Ivanovskaya, T.F. Jaramillo, E.W. McFarland, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **77**, 2003, 229.
- [27] C. Hu, J. Nian, H. Teng, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **92**, 2008, 1071.
- [28] J. Nian, C. Hu, H. Teng, *International Journal of Hydrogen Energy*, **33**, 2008, 2897.
- [29] D. Barreca, P. Fornasiero, A. Gasparotto, V. Gombac, C. Maccato, T. Montini, E. Tondello, *Chem Sus Chem*, **2**, 2009, 230.
- [30] S. Hilaire, M.J. Suess, N. Kranzlin, K. Bienkowski, M. Niederberger, *Journal of Materials Chemistry A*, **48**, 2014, 20530.
- [31] E.W. Bohannan, L. Huang, F.S. Miller, M.G. Shumsky, J.A. Switzer, *Langmuir*, **15**, 1999, 813.
- [32] P.E. de Jongh, D. Vanmaekelbergh, J.J. Kelly, *Journal of the Electrochemical Society*, **147**, 2000, 486.
- [33] J.A. Switzer, B.M. Maune, E.R. Raub, E.W. Bohannan, *The Journal of Physical Chemistry B*, **103**, 1999, 395.
- [34] M. Kim, S. Yoon, H. Jung, K.J. Lee, D.C. Lim, I.S. Kim, B. Yoo, J.H. Lim, *Japanese Journal of Applied Physics*, **53**, 2014, 80.
- [35] J.L. Sculfort, D. Guyomard, M. Herlem, *Electrochimica Acta*, **29**, 1984, 459.
- [36] Y. Lin, G. Yuan, S. Sheehan, S. Zhou, D. Wang, *Energy and Environmental Science*, **4**, 2011, 4862.
- [37] M. Hara, T. Kondo, M. Komoda, S. Ikeda, K. Shinohara, A. Tanaka, J.N. Kondo, K. Domen, *Chemical Communications*, **3**, 1998, 357.
- [38] L. Gou, C.J. Murphy, *Nano Letters*, **3**, 2003, 231.
- [39] W. Wang, G. Wang, X. Wang, Y. Zhan, Y. Liu, C. Zheng, *Advanced Materials*, **14**, 2002, 67.
- [40] S. Ho-Kimura, *Acs sus Che and engineering*, **3**, 2015, 710.
- [41] A. Jiang, *Nanoscale Research Letters*, **9**, 2014, 219.
- [42] P. Taneja, R. Chandra, R. Banerjee, P. Ayyub, *Scripta Materialia*, **44**, 2001, 1915.
- [43] V. Figueiredo, E. Elangovan, G. Goncalves, P. Barquinha, L. Pereira, N. Franco, E. Alves, R. Martins, E. Fortunato, *Applied Surface Science*, **254**, 2008, 3949.
- [44] Z.S. Hong, Y. Cao, J.F. Deng, *Materials Letters*, **52**, 2002, 34.
- [45] B. Balamurugan, B.R. Mehta, S.M. Shivaprasad, *Applied Physics Letters*, **79**, 2001, 3176.
- [46] Q.B. Ma, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **141**, 2015, 178.

آوردن بهترین مقادیر جریان فوتونی بدست آمدند. بر این اساس، شرایط بهینه ساخت نانوساختارهای اکسید مس به روش رسوبدهی الکتریکی شامل تنظیم pH الکترولیت بر روی ۱۳، تنظیم دمای آن بر روی ۶۰ °C و اعمال پتانسیل ۰/۶ V- به مدت زمان ۳۰ دقیقه می باشد.

مراجع

- [1] B. Cakiroglu1, M. Ozacar, *Electrochem. Soc.*, **166**, 2019, 728.
- [2] G. Eranna, B.C. Joshi, D.P. Runthala, R.P. Gupta, *Comprehensive Review*, **29**, 2004, 111.
- [3] M. Moskovits, A. Kolmakov, *Annual Review of Materials Research*, **34**, 2004, 151.
- [4] B.D. Yuhas, P. Yang, *Journal of the American Chemical Society*, **131**, 2009, 3756.
- [5] P.K. Pagare, A.P. Torane, *J Mater. Sci: Mater. Electron*, **29**, 2018, 8473.
- [6] H. You, Y. Dai, Z. Zhang, D. Ma, *Journal of Applied Physics*, **101**, 2007, 026105.
- [7] Y. Wang, Z. Lou, W. Niu, Z. Ye, L. Zhu, *Nanotechnology*, **29**, 2018, 14
- [8] Y. Ying, H. Juan, N. Xiaohui, S. Jinzhan, S. Jinwen, C. Wei, X. Wei, *International Journal of Energy Research*, **40**, 2016, 112.
- [9] M. Hara, T. Kondo, M. Komoda, S. Ikeda, K. Shinohara, A. Tanaka, J.N. Kondo, K. Domen, *Chemical Communications*, **3**, 1998, 357.
- [10] A. Mittiga, E. Salza, F. Sarto, M. Tucci, R. Vasanthi, *Applied Physics Letters*, **88**, 2006, 163502.
- [11] A. Paracchino, N. Mathews, T. Hisatomi, M. Stefik, S.D. Tilley, M. Gratzel, *Energy & Environmental Science*, **5**, 2012, 8673.
- [12] J. Kondo, *Chemical Communications*, **3**, 1998, 357.
- [13] Z. Zhang, P. Wang, *Journal of Materials Chemistry*, **22**, 2012, 2456.
- [14] A. Paracchino, V. Laporte, K. Sivula, M. Gratzel, E. Thimsen, *Nat. Mater.*, **10**, 2011, 456.
- [15] C. Li, T. Hisatomi, O. Watanabe, M. Nakabayashi, N. Shibata, K. Domen, J. Delaunay, *Energy & Environmental Science*, **8**, 2015, 1493.
- [16] F. Koffyberg, F. Benko, *Journal of Applied Physics*, **53**, 1982, 1173.
- [17] Y. Hsu, C. Yu, H. Lin, Y. Chen, Y. Lin, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **704**, 2013, 19.
- [18] C. Chiang, Y. Shin, K. Aroh, S. Ehrman, *International Journal of Hydrogen energy*, **37**, 2012, 8232.
- [19] C. Chiang, K. Aroh, N. Franson, V. R. Satsangi, S. Dass, S. Ehrman, *International Journal of Hydrogen Energy*, **36**, 2011, 15519.