

مهدي دهقاني^۱، عباس بهجت^۲، فريبا تاج‌آبادي^۳
 نيما تقوي نيا^{۴*}

۱. گروه اتمی مولکولی، دانشکده‌ی فیزیک، دانشگاه یزد، یزد
۲. گروه تحقیقاتی فوتونیک، مرکز تحقیقات مهندسی، دانشگاه یزد
۳. پژوهشکده‌ی فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج
۴. دانشکده‌ی فیزیک و پژوهشکده‌ی علوم و فناوری نانو، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

سلول خورشیدی لایه نازک CuInS_2 قابل چاپ

چکیده

استفاده از لایه‌نشانی به روش محلول در ساخت سلول‌های خورشیدی لایه نازک CuInS_2 (CIS_2) به منظور اجتناب از روش‌های پرهزینه خلا مورد بررسی قرار گرفته است. روش‌های لایه‌نشانی تمام لایه‌های سلول به روش‌های ارزان قیمت و قابل چاپ صورت گرفته است. با استفاده از ساختار رولایه و روش افشانه کردن محلول آبی در دمای ۳۲۰ درجه کریستال CIS_2 شکل گرفته است. برای جلوگیری از نفوذ مس در لایه‌ی بافر از یک حلال آلی آمین دار استفاده شده است. با این کار علاوه بر افزایش بازده، جریان، ولتاژ و دمای شکل دهی کریستال CIS_2 نیز به اندازه‌ی ۷۰ درجه‌ی سانتیگراد کاهش می‌یابد. نسبت مس به ایندیوم برای بدست آوردن مقدار بهینه تغییر داده شده است. این کمیت‌ها به طور مستقیم بر عملکرد سلول خورشیدی اثر می‌گذارند. بررسی‌ها نشان داد که سلول‌های جوهر آلی نسبت به سلول‌های جوهر آبی بازدهی بیش از ۲/۵ برابر تولید می‌کنند.

کلمات کلیدی: سلول خورشیدی لایه نازک، نانوکریستال CuInS_2 ، ساختار رولایه، روش‌های لایه‌نشانی محلول

۱- مقدمه

به دلیل ناکارآمدی روش‌های خلا برای سرعت بخشیدن به تولیدات تجاری در حجم بالا، نیمه رساناهای فیلم نازک که با روش‌های محلول تهیه می‌شوند امروزه در خیلی از حوزه‌های الکترونیک نوری همانند سلول‌های خورشیدی لایه نازک $\text{Cu}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})(\text{S}_y\text{Se}_{1-y})$ [۴-۱]، ترانزیستورهای فیلم نازک [۶ و ۵] و اپتیک غیرخطی [۷] جایگاه ویژه‌ای کسب کرده‌اند. در این میان سلول‌های خورشیدی لایه نازک $\text{Cu}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})(\text{S}_y\text{Se}_{1-y})_2$ که به اختصار (CIGS) نامیده می‌شوند به دلیل نیاز قابل ملاحظه به بخش انرژی تجدیدپذیر در آینده، بخش مهم‌تری از این حوزه را به خود اختصاص داده‌اند. در سال‌های اخیر روش‌های بسیار زیادی برای تولید سلول‌های خورشیدی CIGS بدون استفاده از سیستم‌های خلاء و عمدتاً بر پایه‌ی محلول شیمیایی ابداع شده است [۸]. این روش‌ها شامل ساخت نانوذرات CIGS و یا CuInS_2 [۹-۱۱، ۳] و یا استفاده از محلول پیش‌ماده‌هاست [۱۶-۱۲، ۱، ۲]. مزیت روش پیش‌ماده‌ها در این است که در حین گرماده‌ی برای از بین بردن حلال و مواد آلی اضافی کریستال هم شکل می‌گیرد و نیاز به فرایندهای اضافی شستشو و خالص‌سازی نیست. ولی در مقایسه با روش ساخت به کمک نانوذرات، کربن بیش‌تری در فیلم نهایی باقی می‌ماند [۱۲ و ۱۵ و ۱۶]. بیش‌ترین بازده از روش پیش‌ماده‌ها با حلال هیدرازین و گرماده‌ی در دمای ۵۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بدست آمده است [۱]. سمی بودن و اشتعال‌زا بودن هیدرازین از تجاری‌شدن این روش جلوگیری نموده است. برای بدست آوردن بازده بالاترین لایه‌ها بعد از خشک‌شدن در دماهای پایین، نیاز به بازپخت در مجاورت سولفور، سلنیوم یا هیدروژن سلنید در دمای بالا دارند [۱۲ و ۱۷ و ۱۸].

در حالی که اکثر گزارش‌های قبلی بر استفاده از ساختار زیرلایه^۱ ZnO /Al /ZnO /CdS /Mo/CIGS /sodalime glass تاکید دارند و بعد از آن عملیات سلنیزاسیون و سولفوریزاسیون انجام می‌دهند، سلول‌های خورشیدی بر پایه‌ی ساختار ناهمگون رولایه-TCO/Blocking-layer/buffer^۲ (layer/absorber-layer/back-contact) از نظر فرایند ساخت بسیار ساده‌تر هستند. در این ساختار می‌توان استفاده از روش‌های خلا را به حداقل رساند. هر چند بازده آن‌ها نسبت به روش‌های خلاء بسیار پایین است. همچنین گرمادهی در این‌گونه ساختارها محدود است زیرا لایه‌ی بافر قبل از لایه‌ی جاذب لایه‌نشانی می‌شود [۱]. در ساخت سلول‌های خورشیدی با این نوع ساختار گزارش‌های خیلی کمی وجود دارد. برخی گزارش‌ها بر ساخت سلول خورشیدی با استفاده از ساختار رولایه و با افشانه کردن محلول آبی از ایندیوم کلرید، مس کلرید (II) و تیواوره به عنوان منبع سولفور دلالت دارند [۴]. در این کار آن‌ها با استفاده از یک لایه‌ی یک میکرومتری نانوذرات تیتانیوم دی اکسید بعد از لایه‌ی پکیده یک ساختار سه بعدی ایجاد کرده‌اند. در حالی که جریان و بازده در ساختار دوبعدی آن‌ها بسیار پایین است.

هدف اصلی در این مقاله ساخت سلول‌های خورشیدی قابل چاپ (محلول پایه) با استفاده از ساختار دوبعدی ناهمگون رولایه با بازده قابل قبول است. برای انجام این کار ابتدا با استفاده از پیش‌ماده‌هایی که در آب حل شده‌اند سلول‌های ابتدایی ساخته می‌شوند تمام لایه‌ها در محلول آبی با روش افشانه کردن که پتانسیل بیشتری برای خط تولید تجاری دارد بر بستر FTO/TiO₂/In₂S₃ انجام می‌شود. دمای لایه‌نشانی لایه‌ی جاذب در این روش ۳۰۰-۳۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است. سپس برای افزایش بازده، روش ساخت لایه‌ی جاذب تغییر داده می‌شود و با استفاده از حلال‌های آلی آمین دار دمای ساخت لایه‌ی جاذب پایین‌تر آمده (۲۵۰ درجه) ولی کیفیت کریستالی و در نتیجه بازده افزایش می‌یابد. لایه‌نشانی این جوهر با استفاده از روش قطره‌اندازی، روش چرخشی یا دکتر بلید استفاده می‌شود. با این کار سرعت ساخت سلول هم بالاتر می‌رود. برای هر دو نوع سلول، اتصال پشتی نیز توسط لایه‌نشانی چسب کربنی و حرارت دهی در ۱۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه مهیا می‌گردد. در این روش از هیچ‌گونه سولفوریزاسیون یا سلنیزاسیون استفاده نمی‌شود و عنصر سلنیوم نیز به علت سمی بودن حذف می‌گردد.

۲- روش تجربی

در ساخت پیش‌ماده‌ی لایه‌ی جاذب به روش محلول آبی: ایندیوم کلرید ۴ آبه (استریم کیمیکال)، مس کلرید ۲ آبه و تیواوره (مرک). برای ساخت جوهر CuInS₂ به روش محلول آبی: استیک اسید و تیواوره و بوتیل آمین (مرک)، ایندیوم استیل استونات (استریم کیمیکال)، ایندیوم کلرید و مس کلرید (I) (استریم کیمیکال)، برای ساخت لایه‌ی پکیده‌ی تیتانیوم دی‌اکساید: اتانول و تیتانیوم ایزوپروپوکساید و استیل استون (مرک) برای ساخت لایه‌ی بافر: ایندیوم کلرید چهار آبه (استریم کیمیکال) و تیواوره (مرک)، چسب کربنی (شریف سولار).

عکس‌های میکروسکوپ الکترونی و آنالیز پراکندگی انرژی پرتو ایکس با دستگاه (SEM, Philips, XL30) که مجهز به دستگاه EDS است. ساختار کریستالی با دستگاه پراش پرتو ایکس مرکز نانوی کفا (XRD, X'Pert, Pro MPD, PAnalytical). دستگاه شبیه ساز نور خورشید (شریف سولار) و در شدت ۱۰۰ میلی وات بر سانتی متر مربع و دستگاه اندازه گیری جریان ولتاژ (Keithely 2400).

۱-۲. ساخت لایه‌ی جاذب CIS₂: ساخت پیش‌ماده‌ی آبی CIS₂: از محلول ۷ میلی مولار آبی ایندیوم کلرید ۴ آبه، مس کلرید ۲ آبه و تیواوره ساخته می‌شود. هنگام لایه‌نشانی دمای زیر لایه در ۳۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد ثابت می‌شود آهنگ لایه‌نشانی در ۳ میلی‌لیتر بر دقیقه ثابت است. فاصله‌ی نازل اسپری در هنگام افشانه کردن ۲۵ سانتیمتر و لایه‌نشانی به صورت پالسی است.

برای ساخت جوهر CIS₂ به روش آلی، ۵۰ میکرولیتر استیک اسید، ۰/۱ میلی مول ایندیوم استیل استونات، ۰/۱۰۵ میلی مول مس کلرید (I) و ۰/۴ میلی مول تیواوره بعنوان منبع سولفور با ۰/۶ میکرولیتر بوتیل آمین مخلوط می‌شوند. این جوهرها به روش لایه‌نشانی چرخشی، دکتر بلید یا قطره اندازی لایه‌نشانی می‌شوند. در روش لایه‌نشانی چرخشی تکرار لایه‌نشانی تا دوبرابر ضروری است. این لایه‌ها در دمای ۱۵۰ درجه برای

تبخیر حلال آلی به مدت ۱۰ دقیقه حرارت داده می‌شوند. سپس به منظور کریستاله‌شدن به مدت ده دقیقه در دمای ۲۵۰ درجه باقی می‌مانند.

۲-۲ ساخت سلول خورشیدی: این سلول بر پایه‌ی ساختار ناهمگون دوبعدی ساخته می‌شود و لایه‌های آن به صورت زیر است/FTO $\text{TiO}_2/\text{In}_2\text{S}_3/\text{CIS}_2/\text{carbon paste}$. برای لایه‌های دی اکسید تیتانیوم و ایندیوم سولفید از روش افشانه‌کردن استفاده می‌کنیم. تمام مراحل ساخت سلول در فضای آزاد و بدون استفاده از سیستم‌های خلاء انجام شده است. مراحل ساخت به شرح زیر است:

۱. لایه‌ی سدکننده‌ی دی‌اکسید تیتانیوم:

برای لایه‌نشان‌ی دی اکسید تیتانیوم به روش افشانه کردن محلولی از اتانول (۵ میلی‌لیتر)، استیل استون (۰/۳۶ میلی‌لیتر) و تیتانیوم ایزوپروپوکساید (۰/۲۴ میلی‌لیتر) تهیه می‌شود. این محلول با آهنگ ۲ میلی‌لیتر بر دقیقه بر زیرلایه‌ی رسانای شفاف که در دمای ۴۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار دارد افشانه می‌شود.

۲. لایه‌ی بافر ایندیوم سولفید:

برای لایه‌نشان‌ی ایندیوم سولفید از محلول آبی ۲۵ میلی مولار ایندیوم استفاده می‌کنیم. از تیواوره بعنوان منبع گوگرد استفاده می‌شود. نسبت مولی گوگرد به ایندیوم معمولا ۶ است. این محلول در دمای ۳۲۰ درجه با آهنگ ۲/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه بر لایه‌ی دی اکسید تیتانیوم که از قبل ساخته شده لایه‌نشان‌ی شود. بعد از آن لایه‌ی جاذب به روش‌هایی که در قبل گفته شد قرار می‌گیرد.

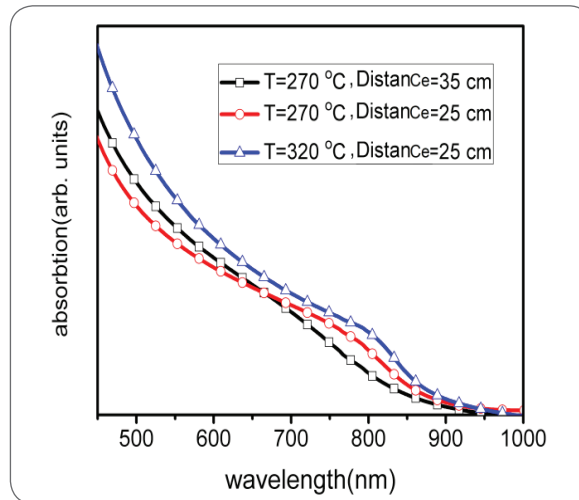
۳. اتصال پشتی:

برای ساخت این لایه از چسب کربنی که بصورت تجاری از شرکت شریف سولار خریداری شده استفاده می‌گردد.

۳- بحث و نتایج

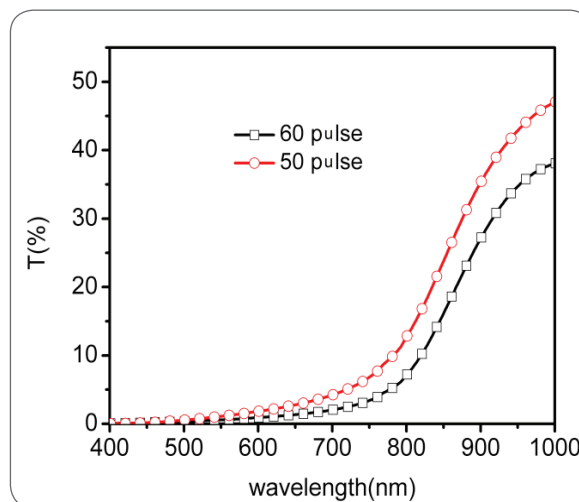
در این کار سعی شده است تا تمام مراحل با کم‌ترین زمان و حداقل امکانات لازم و در هوای آزاد لایه‌نشان‌ی شوند. هیچ کدام از لایه‌ها تحت خلاء نبوده و روش‌های لایه‌نشان‌ی آسان، در دسترس و محلول- پایه هستند. مطابق آنچه در قبل گفته شد جوهر CIS_2 با استفاده از دونوع پیش‌ماده‌ی آلی و آبی ساخته می‌شود. برای ساخت لایه‌ی جاذب ابتدا از محلول ۷ میلی مولار آبی استفاده می‌شود. نسبت مس به ایندیوم در این روش لایه‌نشان‌ی بسیار حیاتی است. لایه‌هایی که با درصد مس غنی ساخته می‌شوند از لحاظ کریستالی بسیار بهترند. همچنین آهنگ لایه‌نشان‌ی و فاصله‌ی نازل افشانه از لایه و دمای زیر لایه در این روش بسیار موثرند. فاصله‌ی نازل و آهنگ لایه‌نشان‌ی در حقیقت اندازه‌ی قطراتی که روی لایه می‌نشینند را تعیین می‌کند. بهرحال این پارامترها به همراه فاصله‌ی بین دو پالس متوالی طوری باید تنظیم شوند تا قطرات روی لایه نشسته و تا پالس بعدی آب خود را از دست بدهند. اگر فاصله کم باشد و یا آهنگ بالا باشد لایه‌ها نمی‌توانند آب کافی از دست بدهند و در نتیجه آب اضافی که در لایه تبخیر می‌شود ایجاد ترک یا حباب می‌کند. اگر فاصله زیاد باشد قطرات قبل از رسیدن به لایه آب خود را از دست می‌دهند و بنابراین پیش‌ماده‌ها به صورت خشک روی هم قرار می‌گیرند. و فاز کریستالی خوبی تشکیل نمی‌شود. شکل ۱ نمودار جذب لایه‌های CIS_2 که بروش افشانه کردن لایه‌نشان‌ی شده‌اند را نشان می‌دهد. از روی این شکل مشخص است که دمای ۲۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و فاصله‌ی ۳۵ سانتی متری برای لایه‌نشان‌ی مناسب نیست. در نمودار جذب که با مربع مشخص شده اندازه‌ی باند ممنوعه‌ی انرژی ۱/۶۴ الکترون ولت است در صورتی که همین لایه در فاصله‌ی ۲۵ سانتیمتری باند انرژی ممنوعه‌ی ۱/۵۲ الکترون ولت را نشان می‌دهد. از طرف دیگر هر چه لایه‌ی جذب در نمودار جذب تیزتر باشد نشانگر این است که حالت‌های مزاحم کم‌تری ایجاد شده‌اند و به اصطلاح حالت‌های ناخالصی و نقص کم‌ترند. اگر دما بالا برود کریستال بهتر شکل می‌گیرد ولی در این موضوع محدودیت جدی وجود دارد به دلیل اینکه ساختار ما رولایه است نمی‌توان دما را خیلی بالا برد همچنین

سولفورهای موجود در فیلم اکسید می‌شوند و به جای آن‌ها اکسیژن می‌نشینند. در دمای ۳۲۰ درجه کریستال‌ها بهتر شکل می‌گیرند و همان‌طور که در



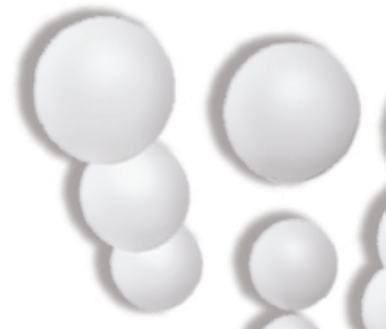
شکل ۱: نمودار جذب لایه‌ی CIS₂ که در دماهای مختلف و در فواصل ۲۵ و ۳۵ سانتی‌متری به روش افشانه کردن لایه‌نشانی شده‌اند

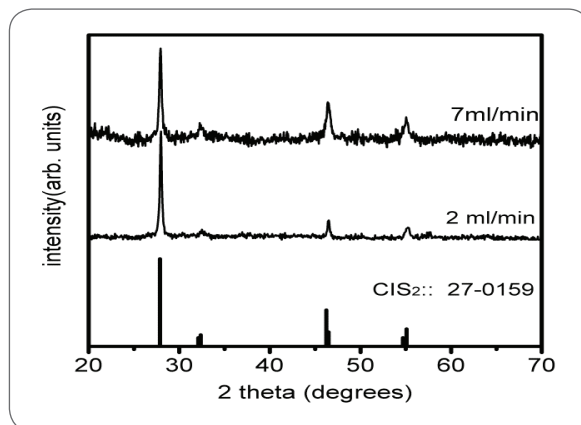
شکل ۱ آمده لبه‌ی جذب تیزتری از خود نشان می‌دهند. دمای بهینه زمانی مورد قبول است که در ساخت سلول هم بازده قابل قبولی نتیجه دهد. بعد از لایه‌نشانی لایه‌های تیتانیم دی اکسید و ایندیوم سولفید و لایه‌ی جاذب CIS₂ از کل سلول طیف عبور گرفته می‌شود. همان‌طور که در قبل اشاره شد افشانه کردن لایه‌ی جاذب به صورت پالس‌های خیلی کوتاه و متوالی انجام می‌شود. شکل ۲ عبور سلول‌ها را در طول موج‌های مختلف به ازای ۵۰ پالس و ۶۰ پالس نشان می‌دهد. زیاد ماندن بر روی صفحه‌ی داغ نمی‌تواند عامل کریستاله شدن خوبی باشد زیرا در هوای آزاد سولفور به شدت از دست می‌رود.



شکل ۲: نمودار طیف عبور لایه‌های FTO/TiO₂/In₂S₃/CIS₂

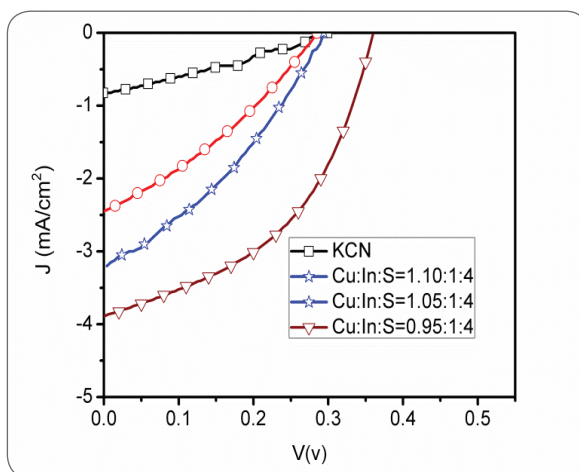
کمیت‌هایی که بر کیفیت طیف پراش پرتو ایکس کریستال‌ها بیش‌تر اثر می‌کند دما و مقدار مس است. شکل ۳ طیف پراش پرتو ایکس در آهنگ لایه‌نشانی ۷ میلی‌لیتر بر دقیقه و ۲ میلی‌لیتر بر دقیقه را در دمای ۳۲۰ درجه نشان می‌دهد. هرچند آهنگ لایه‌نشانی با آهنگ پایین‌تر خلوص بیش‌تری خواهد داشت اما در ساخت سلول که بعداً مورد بررسی قرار می‌گیرد آهنگ پایین جواب خوبی ندارد.





شکل ۳: طیف پراش پرتو ایکس مربوط به لایه‌هایی که با روش افشانه کردن لایه‌نشانی شده‌اند

برای تکمیل سلول کافی است چسب کربنی به روش دکتر بلید روی لایه جاذب لایه‌نشانی شود و در دمای ۱۲۰ درجه به مدت ۱۰ دقیقه قرار گیرد این کار حداقل ۲ بار تکرار می‌شود. چسب کربنی ماده‌ای بسیار ارزان است و نسبت به طلا و یا دیگر اتصال‌های موجود قیمتی ندارد. برای بررسی عملکرد سلول، لایه‌های CIS را در دمای یکسان ۳۲۰ درجه لایه‌نشانی می‌کنیم. نسبت مس به ایندیوم متغیر و نسبت سولفور به ایندیوم در محلول یکسان و برابر ۴ است.



شکل ۴: نمودار ولتاژ جریان در حالت روشنایی برای سلول‌هایی که با روش افشانه کردن ساخته شده‌اند

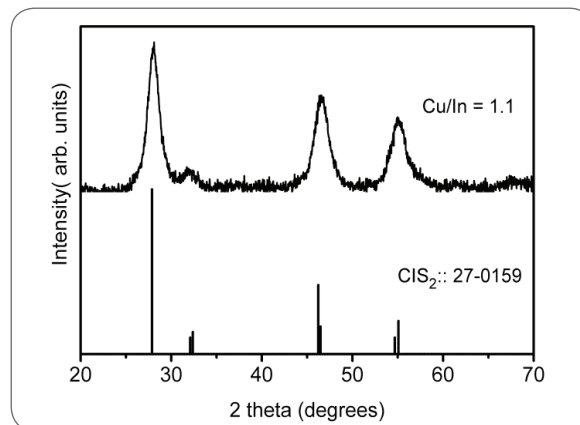
هنگامی که نسبت مس به ایندیوم بالاست یعنی حالت مس غنی کریستال‌ها بهتر شکل می‌گیرند اما متاسفانه در سلول، نتایج بسیار ضعیف است. این موضوع به دلیل نفوذ زیاد مس در لایه‌ی بافر است. هرچه دما هم بالاتر می‌رود نفوذ مس بیشتر می‌شود [۱۹]. پس با این ساختار در دمای بالا نمی‌توان کار کرد.

معمولاً برای از بین بردن فازهای اضافی مثل مس سولفید که در ترکیب مس غنی ایجاد می‌شود از عملیات شیمیایی پتاسیم سیانید استفاده می‌کنند. متاسفانه این عمل در این ساختار نتیجه بخش نبوده و با توجه به نمودار مربع‌ها در شکل ۴ بازده و جریان بسیار افت می‌کنند. به‌ناچار درصد مس پایین آورده می‌شود. هرچند می‌دانیم این عمل اندازه‌ی کریستال‌ها را کوچک می‌کند. با اینکه در درصد مس پایین کریستال‌ها خوب شکل نمی‌گیرند در سلول جواب بهتری دارند. جدول ۱ کمیت‌های مربوط به سلول‌های ساخته شده به روش افشانه کردن را نشان می‌دهد. وقتی که نسبت مس به ایندیوم به ۰/۹۵ می‌رسد نفوذ مس درون ایندیوم سولفید هم کم‌تر می‌شود. نکته‌ی دوم ممکن است در ایجاد فازهای ثانوی از مس سولفید باشد که در مواردی که مس نسبت به ایندیوم کم‌تر است کم‌تر ایجاد می‌شوند و نیاز به استفاده از محلول بسیار سمی پتاسیم سیانید

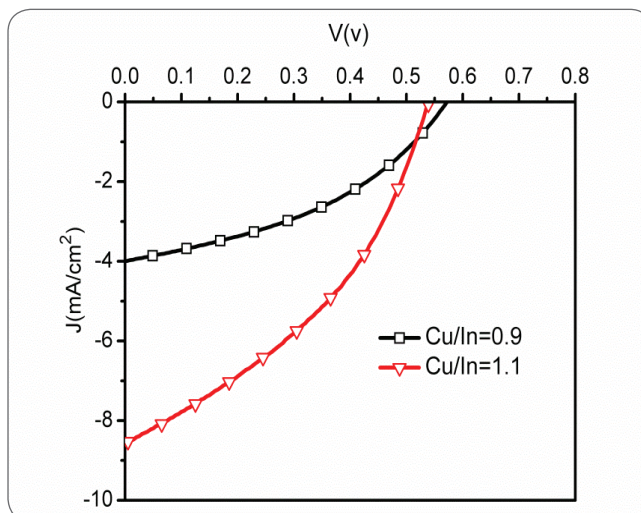
جدول ۱: کمیت‌های سلول خورشیدی در زیر نور شبیه سازی شده AM1.5

نسبت Cu:In:S	ولتاژ مدار باز (mV)	چگالی جریان mA /Cm ²	بازده %	فاکتور پرشوندگی %
۱/۱:۱:۴	۲۸۵	۲/۵	۰/۲۲	۳۳
kCN ۱,۱:۱:۴	۲۸۴	۰/۸	۰/۰۸	۲۸
۱/۰.۵:۱:۴	۲۹۳	۳/۲	۰/۳۳	۳۵
۰/۹۵:۱:۴	۳۷۵	۳/۸	۰/۶۵	۴۶

هر چند در روش محلول آبی با کاهش مس مقداری جریان افزایش یافت اما هنوز برای اهدافی که در نظر داریم بسیار کم است. دلیل این موضوع نیز دمای بالاست که باعث می‌شود هنوز مقداری مس درون لایه‌ی جاذب نفوذ کند. با استفاده از محلول آلی مقدار دما را بسیار پایین می‌آوریم. برای این کار از ایندیوم استیل استونیت، مس کلرید (۱)، تیواوره بعنوان منبع گوگرد و بوتیل آمین و استیک اسید استفاده می‌کنیم. طبق دستوری که در قبل داده شد بعد از لایه‌نشانی این محلول لایه را ابتدا در دمای ۱۵۰ درجه و سپس ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد هر کدام به مدت ۱۰ دقیقه قرار می‌دهیم. شکل ۵ طیف پراش پرتو ایکس را برای فیلم CIS ساخته شده در دمای ۲۵۰ درجه با جوهر بوتیل آمین نشان می‌دهد. در مقایسه با شکل ۳ این کریستال‌ها بسیار کوچکترند. هرچند نسبت مس به ایندیوم در این فیلم برابر با ۱/۱ است.



شکل ۵: طیف پراش پرتو ایکس مربوط به CIS₂ ساخته شده با جوهر آلی در دمای ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد



شکل ۴: نمودار ولتاژ جریان در حالت روشنایی برای سلول‌هایی که با روش افشانه کردن ساخته شده‌اند

به منظور تحقیق عملکرد این نوع جوهر در سلول خورشیدی دو نوع مس فقیر ($Cu/In = 0/9$) و مس غنی ($Cu/In = 1/1$) ساخته می‌شود. شکل ۶ کمیت‌های سلول خورشیدی را در زیر نور شبیه سازی شده ($AM=1.5$) نشان می‌دهد. برای حالت مس فقیر چگالی جریان برابر با ۴ میلی آمپر و ولتاژ برابر با ۵۷۰ میلی ولت است در صورتی که با استفاده از جوهر با مس غنی این مقدار برای جریان برابر است با ۸/۵ میلی آمپر و ۵۳۸ میلی ولت.

۴- نتیجه‌گیری

برای ساخت سلول خورشیدی CIS_2 بر پایه‌ی ساختار دوبعدی ناهمگون از پیش‌ماده‌ی آبی استفاده شده است. فیلم‌های لایه‌ی جاذب و سلول‌های ساخته شده با این نوع جوهر آبی مورد بررسی قرار گرفته است. روش لایه‌نشانی تمام لایه‌ها با این جوهر روش افشانه کردن است. به دلیل استفاده از ساختار رولایه، در دمای بالا مس درون لایه‌ی بافر نفوذ می‌کند و ساختار آنرا تغییر می‌دهد در نتیجه بازده و جریان پایین است. برای رفع این مشکل و بالا بردن بازده و دیگر کمیت‌های سلول خورشیدی از حلال آلی استفاده شد. با این کار جریان، ولتاژ مدار باز افزایش و بازده به اندازه‌ی بیش از ۲/۵ برابر ارتقا می‌یابد. با اینکه دمای لازم برای تشکیل کریستال CIS_2 (۲۵۰ درجه در مقایسه با ۳۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) کاهش یافته است.

مراجع

1. Todorov T K, Gunawan O, Gokmen T and Mitzi D B 2013 Solution-processed $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$ absorber yielding a 15.2% efficient solar cell Prog. Photovoltaics Res. Appl. 21 82-7
2. Bob B, Lei B, Chung C-H, Yang W, Hsu W-C, Duan H-S, Hou W W-J, Li S-H and Yang Y 2012 The Development of Hydrazine-Processed $Cu(In,Ga)(Se,S)_2$ Solar Cells Adv. Energy Mater. 2 504-22
3. Kaelin M, Rudmann D, Kurdesau F and Zogg H 2005 Low-cost CIGS solar cells by paste coating and selenization Thin Solid Films 480-481 486-90
4. O'Hayre R, Nanu M, Schoonman J and Goossens A 2007 A parametric study of $TiO_2/CuInS_2$ nanocomposite solar cells: how cell thickness, buffer layer thickness, and TiO_2 particle size affect performance Nanotechnology 18 055702
5. Kim D, Jeong Y, Song K, Park S-K, Cao G and Moon J 2009 Inkjet-printed zinc tin oxide thin-film transistor. Langmuir 25 11149-54
6. Mitzi D B, Kosbar L L, Murray C E, Copel M and Afzali A 2004 High-mobility ultrathin semiconducting films prepared by spin coating. Nature 428 299-303

7. Chung I, Kim M-G, Jang J I, He J, Ketterson J B and Kanatzidis M G 2011 Strongly Nonlinear Optical Chalcogenide Thin Films of APSe₆ (A=K, Rb) from Spin-Coating Angew. Chemie 123 11059–62
8. Habas S E, Platt H A S, van Hest M F A M and Ginley D S 2010 Low-cost inorganic solar cells: from ink to printed device. Chem. Rev. 110 6571–94
9. Guo Q, Ford G M, Hillhouse H W and Agrawal R 2009 Sulfide nanocrystal inks for dense Cu(In_{1-x}Ga_x(S_{1-y}Se_y)₂ absorber films and their photovoltaic performance. Nano Lett. 9 3060–5
10. Guo Q, Ford G M, Agrawal R and Hillhouse H W 2013 Ink formulation and low-temperature incorporation of sodium to yield 12% efficient Cu(In,Ga)(S,Se)₂ solar cells from sulfide nanocrystal inks Prog. Photovoltaics Res. Appl. 21 64–71
11. Cho J W, Park S J, Kim W and Min B K 2012 Fabrication of nanocrystal ink based superstrate-type CuInS₂ thin film solar cells. Nanotechnology 23 265401
12. Ahn S, Son T H, Cho A, Gwak J, Yun J H, Shin K, Ahn S K, Park S H and Yoon K 2012 CuInSe₂ thin-film solar cells with 7.72 % efficiency prepared via direct coating of a metal salts/ alcohol-based precursor solution. ChemSusChem 5 1773–7
13. Azimi H, Heumüller T, Gerl A, Matt G, Kubis P, Distaso M, Ahmad R, Akdas T, Richter M, Peukert W and Brabec C J 2013 Relation of Nanostructure and Recombination Dynamics in a Low-Temperature Solution-Processed CuInS₂ Nanocrystalline Solar Cell Adv. Energy Mater. 3 1589–96
14. Li L, Coates N and Moses D 2010 Solution-Processed Inorganic Solar Cell Based on in Situ Synthesis and Film Deposition of CuInS₂ Nanocrystals J. Am. Chem. Soc 132 22–3
15. Uhl A R, Fella C, Chirilă A, Kaelin M R, Karvonen L, Weidenkaff A, Borca C N, Grolimund D, Romanyuk Y E and Tiwari A N 2012 Non-vacuum deposition of Cu(In,Ga)Se₂ absorber layers from binder free, alcohol solutions Prog. Photovoltaics Res. Appl. 20 526–33
16. Haug V, Quintilla A, Klugius I and Ahlswede E 2011 Influence of an additional carbon layer at the back contact-absorber interface in Cu(In,Ga)Se₂ thin film solar cells Thin Solid Films 519 7464–7
17. Weil B D, Connor S T and Cui Y 2010 CuInS₂ solar cells by air-stable ink rolling. J. Am. Chem. Soc. 132 6642–3
18. Lee E, Park S J, Cho J W, Gwak J, Oh M-K and Min B K 2011 Nearly carbon-free printable CIGS thin films for solar cell applications Sol. Energy Mater. Sol. Cells 95 2928–32
19. Juma A O, Pistor P, Fengler S, Dittrich T and Wendler E 2012 Copper diffusion in thin In₂S₃ layers investigated by Rutherford Backscattering Spectroscopy Thin Solid Films 520 6740–3

