



مقاله کامل پژوهشی

## بهبود عملکرد سلول خورشیدی $\text{CuInS}_2$ ساخته شده مبتنی بر محلول با بهینه‌سازی شرایط لایه نشانی فیلم جاذب

سارا مشحون<sup>۱</sup>، امیرحسین چشمه خاور<sup>۲</sup>، مهدی دهقانی<sup>۳</sup>، فریبا تاج آبادی<sup>۴</sup>، نیما تقوی نیا<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> محقق فرادکتری، بخش شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> محقق فرادکتری، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، تهران، ایران

<sup>۴</sup> استادیار، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، مشکین دشت، البرز، ایران

<sup>۵</sup> استاد، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، تهران، ایران

**چکیده** در این پژوهش، سلول‌های خورشیدی لایه‌نازک  $\text{CuInS}_2$  (CIS) مبتنی بر محلول با ساختار  $\text{glass/FTO/TiO}_2/\text{In}_2\text{S}_3/\text{CIS/Carbon}$  از جوهر نانوذرات CIS ساخته شدند. تمامی لایه‌های سلول، به روش غیر خلاء و از محلول، لایه‌نشانی شدند. لایه جاذب CIS که مهمترین قسمت سلول را تشکیل می‌دهد به روش قطره‌اندازی از جوهر نانوذرات CIS پخش شده در DMF و عملیات حرارتی در دمای ۲۵۰ درجه سلسیوس، لایه نشانی شد. مشخصه‌یابی پراش پرتو ایکس (XRD) و جذب اپتیکی نشان داد که فیلم حاصل، خالص بوده و از بلورینگی مناسب و جذب بالا در ناحیه مرئی برخوردار است. تصاویر میکروسکوپی لایه CIS، وجود ترک و ناپیوستگی در لایه را نشان داد. ناپیوستگی و ترک در لایه جاذب، اثر مستقیمی بر عملکرد سلول دارد و مانع انتقال مناسب حامل‌های بار است. غیریکنواختی در لایه جاذب، با کنترل فشار بخار حین حرارت‌دهی جوهر نانوذرات، کاهش یافت و در نتیجه، لایه جاذب پکیده‌تر شد. بهینه‌سازی شرایط لایه‌نشانی فیلم جاذب، به افزایش ۱۳۶ درصدی در بازدهی سلول از ۲/۲ به ۵/۲ درصد منجر شد.

**تاریخچه مقاله:**

ثبت اولیه: ۱۳۹۸/۱۰/۱۴

دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۹/۰۷/۰۳

پذیرش قطعی: ۱۴۰۰/۰۳/۳۰

**کلیدواژه‌ها:**

سلول خورشیدی،

جوهر نانوذرات CIS،

بهینه‌سازی لایه‌نشانی جاذب،

بهبود بازدهی

<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.212974.1068> URL: [http://www.jamt.ir/article\\_126426.html](http://www.jamt.ir/article_126426.html)

Original Research Article

Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT): Vol. 10, No. 1, (Spring 2021), 45-52

## Performance Improvement in Solution Based $\text{CuInS}_2$ Solar Cell by Optimizing the Absorber Layer Deposition

Sara Mashhoun<sup>1</sup>, Amir Hossein Cheshmeh-Khavar<sup>2</sup>, Mehdi Dehghani<sup>3</sup>, Fariba Tajabadi<sup>4\*</sup>, Nima Taghavinia<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Ph. D. Student, Institute for Nanoscience & Nanotechnology (INST), Sharif University of Technology, Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Postdoctoral Researcher, Department of Chemistry, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modarres University, Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Postdoctoral Researcher, Department of Physics, Sharif University of Technology, Tehran, Tehran, Iran

\*عهده دار مکاتبات

نشانی: ایران، البرز، مشکین دشت، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، تلفن: ۰۲۶-۳۶۲۸۰۰۴۰، دورنگار: ۰۲۶-۳۶۲۰۱۸۸۸

پیام نگار: [ftajabadi@gmail.com](mailto:ftajabadi@gmail.com)

Please cite this article as: Mashhoun, S., Cheshmeh-Khavar, A. H., Dehghani, M., Tajabadi, F., Taghavinia, N., "Performance improvement in solution based  $\text{CuInS}_2$  solar cell by optimizing the absorber layer deposition", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 10, No. 1, (2021), 45-52. (<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.212974.1068>).

2783-0829/© 2021 The Author(s). Published by MERC.

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



<sup>4</sup> Assistant Professor, Department of Nanotechnology and Advanced Materials, Materials and Energy Research Center (MERC), MeshkinDasht, Alborz, Iran

<sup>5</sup> Professor, Department of Physics, Sharif University of Technology, Tehran, Tehran, Iran

#### Paper History:

Received: 2020-01-04  
Revised in revised form: 2020-09-24  
Accepted: 2021-06-20

#### Keywords:

Solar Cell,  
CIS Nanoparticles Ink,  
Optimizing the Absorber Layer  
Deposition,  
Efficiency Improvement

#### Abstract

In this research, solution based CuInS<sub>2</sub> (CIS) thin film solar cell with glass/FTO/TiO<sub>2</sub>/In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>/CIS/Carbon structure fabricated from CIS nanoparticle ink. The CIS absorber layer, which is the most important part of the cell, is deposited by drop casting CIS nanoparticle ink dispersed in DMF followed by heat treatment to 250 °C. X-Ray diffraction (XRD) of the absorber layer shows respectable crystallinity with pure chalcopyrite phase. UV-Vis spectrum of the CIS nanoparticle ink confirms high optical absorption in visible wavelengths. Micrographs of the CIS layer show obvious voids and discontinuity in the layer. The discontinuity in the absorber layer has direct impact on the cell performance. In the absence of a packed absorber layer, the charge carriers' transfer reduces significantly. The absorber layer's morphology has been improved by controlling the vapor pressure during heat treatment. As a result, the absorber layer changes to a more packed structure with fewer voids. Optimization of the absorber layer deposition leads to and efficiency is enhancement of 136 % from 2.2 % to 5.2 %.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.212974.1068>

URL: [http://www.jamt.ir/article\\_126426.html](http://www.jamt.ir/article_126426.html)

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، با افزایش مصرف انرژی و کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، صنعت فتوولتائیک، اهمیت دوچندانی یافته است. ماده اصلی مورد استفاده در این صنعت، یک نیم‌رساناست. اولین سلول‌های خورشیدی، بر پایه نیم‌رسانای سیلیکون ساخته شدند. در ساخت این سلول‌ها، مقدار ماده زیادی مصرف می‌شد و هزینه ساخت، به دلیل استفاده از تک‌بلور، بالا بود؛ از همین رو، سلول‌های خورشیدی لایه نازک، با هدف کاهش میزان مصرف ماده جاذب، معرفی شدند. این سلول‌ها از نیم‌رساناهایی همچون کادمیم تلورید (CdTe) و یا مس ایندیوم گالیم سولفید (CuInGaS<sub>2</sub>) CIGS به‌عنوان جاذب نور استفاده می‌کنند. از آنجا که این نیم‌رساناها، ضریب جذب بالایی دارند، لایه نازکی از آنها برای جذب نور، کافی است [۱]. سلول‌های خورشیدی بر پایه کادمیم تلورید، به بازدهی بیش از ۲۱ درصد دست یافته‌اند [۲]. با این حال، سرعت رشد فناوری سلول‌های CdTe، به دلیل مخاطرات زیست محیطی کادمیم [۳] و کمیاب بودن تلوریم [۳ و ۴] رو به کنده است.

تاریخچه سلول‌های خورشیدی (CuInS<sub>2</sub>)(Se) CIS، به فعالیت‌های انجام شده در اوایل دهه ۱۹۷۰ در آزمایشگاه‌های بل<sup>۱</sup> برمی‌گردد؛ هرچند که ساخت و مشخصه‌یابی این ماده، به همراه دیگر کلکوپیریت‌ها<sup>۲</sup>، اولین بار توسط هان<sup>۳</sup> در ۱۹۵۳ گزارش شده بود. گروه لابراتوارهای بل، بلور دسته‌های مختلفی از مواد کلکوپیریت را رشد دادند و ویژگی‌های ساختاری، الکترونیکی و اپتیکی آنها را مشخصه‌یابی

کردند. اولین سلول با تبخیر CdS روی لایه‌ای از تک بلور CuInSe<sub>2</sub> ساخته شد. ابتدا این ادوات به‌عنوان آشکارساز نوری فرسوخ نزدیک<sup>۴</sup> مورد توجه قرار گرفتند؛ چرا که پاسخ طیفی آنها گسترده‌تر و یکنواخت‌تر از آشکارسازهای نوری<sup>۵</sup> سیلیکونی بود. ساخت اولین ابزارهای لایه نازک CuInSe<sub>2</sub>/CdS توسط کازمرسکی<sup>۶</sup> و همکاران انجام شد. این گروه، از لایه‌های نشانداده شده با تبخیر پودر CuInSe<sub>2</sub> در معرض Se اضافی، استفاده کردند. وقتی توجه بیشتر به سلول‌های لایه نازک CuInSe<sub>2</sub> معطوف شد که اولین سلول‌های با بازده بیش از ۹/۴ درصد توسط شرکت بوئینگ<sup>۷</sup> ساخته شد. در طول دهه ۱۹۸۰، بوئینگ و آرکوسولار<sup>۸</sup> در صدد حل مسائل پیچیده در حوزه تولید، از قبیل تولید انبوه، بهبود بازده و توان عملیاتی برآمدند که منجر به پیشرفت‌های بسیاری در فناوری سلول‌های خورشیدی CIGS شد [۵].

روش‌های لایه‌نشانی جاذب در سلول‌های لایه نازک، به دو دسته بر پایه خلاء و بر پایه محلول (بدون خلاء) تقسیم می‌شوند. روش‌های بر پایه خلاء همچون تبخیر پرتو الکترونی<sup>۹</sup>، تبخیر حرارتی<sup>۱۰</sup> و کندو پاش<sup>۱۱</sup>، پرهزینه هستند و بازده تولید سلول به ازای انرژی مصرفی در این روش‌ها پایین است. روش‌های محلول که در سال‌های اخیر بیش از پیش مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است و شامل ساخت جوهر نانوذرات و یا استفاده از محلول پیش‌ماده‌ها است، هزینه

<sup>4</sup> Near-Infrared

<sup>5</sup> Photodetector

<sup>6</sup> Kazmerski

<sup>7</sup> Boeing

<sup>8</sup> ARCO Solar

<sup>9</sup> Electron Beam Evaporation

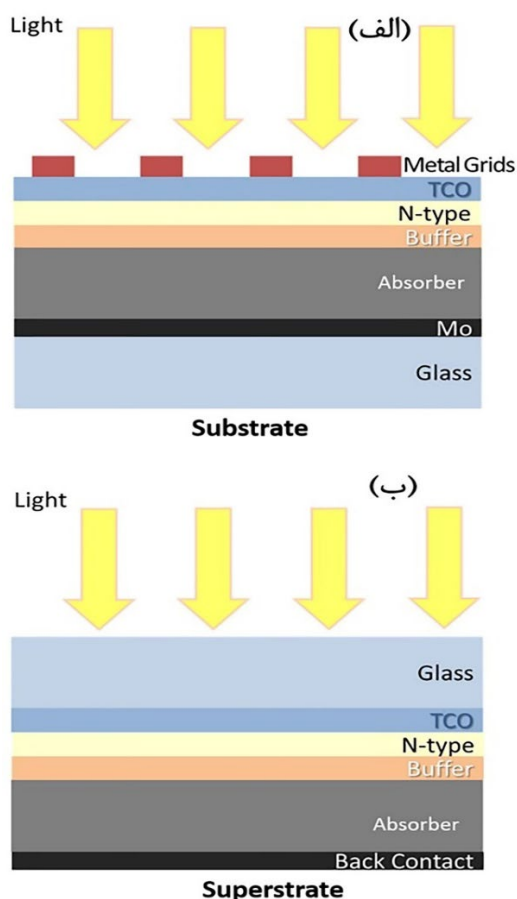
<sup>10</sup> Thermal Evaporation

<sup>11</sup> Sputtering

<sup>1</sup> Bell Laboratories

<sup>2</sup> Chalcopyrites

<sup>3</sup> Hahn



شکل ۱. ساختار سلول خورشیدی لایه نازک، (الف) زیرلایه و (ب) رولایه

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- مواد مصرفی

مس (I) برمید (۹۹ درصد) و ایندیوم سولفید چهارآبه (۹۹ درصد) محصول آلفا ایسار<sup>۷</sup> استفاده شد. بوتیل آمین، تیواوره، تیتانیوم ایزوپروپوکسید، استیل استون، اتانول، استیک اسید و دی متیل فرمامید (DMF) از مرک<sup>۸</sup> خریداری شد. خمیر کربنی از شریف سولار تهیه شد.

### ۲-۲- سنتز نانوذرات CIS

روش سنتز نانوذرات به کار رفته در این پژوهش، به تفصیل در مقاله چشمه خاور و همکاران ذکر شده است [۱۵]. پیش ماده مس، در جو آرگون، به بالون سه دهانه حاوی بوتیل آمین و استیک اسید اضافه شد. ایندیوم کلرید چهارآبه و تیواوره، در ظرف‌های جداگانه، در محلول حاوی بوتیل آمین و استیک اسید حل شدند. نسبت مولی مس/ایندیوم/سولفور برابر

نهایی تولید پایینی دارد و با روش‌های تولید در مقیاس بزرگ مثل چاپ<sup>۱</sup> سازگار است [۷-۹]. بلورینگی لایه جاذب، تأثیر مهمی در عملکرد سلول دارد. از همین رو، برای بهبود بلورینگی جاذب، عملیات سولفوریزاسیون<sup>۲</sup> یا سلنیزاسیون<sup>۳</sup> انجام می‌شود [۱۰]. سولفوریزاسیون یا سلنیزاسیون، در دمای بالا (در حدود ۵۰۰ درجه سلسیوس) انجام می‌گیرد و به علت حضور بخار سولفور و سلنیوم، فرآیندی پرخطر است. نانوذرات جاذب برای ساخت جوهر نانوذرات، با استفاده از پیش ماده‌های جاذب، سنتز می‌شوند [۱۱]. ذرات تشکیل دهنده جوهر نانوذرات، ساختار بلوری دارند و به همین دلیل، لایه‌ای جاذب با خواص بلوری مناسب‌تری نسبت به جوهر پیش ماده‌ها ایجاد می‌کنند.

سلول خورشیدی لایه نازک، آنچنان که در شکل ۱ نشان داده شده، در دو ساختار «زیرلایه» و «رولایه» ساخته می‌شود [۱۲]. در ساختار متداول سلول خورشیدی CIS (ساختار زیرلایه)، یک لایه مولیبدن، بین زیرلایه شیشه‌ای و جاذب، نشانده می‌شود. در مقابل، ساختار رولایه، بدون مولیبدن است. حذف لایه مولیبدن که فلزی دیرگداز و گران قیمت است و به روش‌های پرمصرف و نیازمند به خلاء مثل کندوپاش و تبخیر لایه‌نشانی می‌شود، هزینه تمام شده ماژول<sup>۶</sup> را کاهش می‌دهد. در ساختار زیرلایه، برای جمع کردن جریان، خطوط فلزی ایجاد می‌شود؛ اما در ساختار رولایه، نیازی به ایجاد این خطوط نیست. بنابراین، علاوه بر کاهش هزینه، اثر نامطلوب سایه اندازی این خطوط و کاهش سطح فعال سلول نیز از بین می‌رود [۱۳ و ۱۴].

هدف این پژوهش، ساخت سلول خورشیدی CIS با ساختار رولایه (شکل ۱) به روش مبتنی بر محلول از نانوذرات CIS بدون فرآیند سلنیزاسیون یا سولفوریزاسیون است. فیلم جاذب به روش قطره‌اندازی جوهر نانوذرات CIS لایه‌نشانی شد. بازدهی سلول ۲/۲ درصد به دست آمد. با بهینه‌سازی شرایط لایه‌نشانی جاذب، عملکرد فتوولتایی سلول بهبود یافته و بازدهی به ۵/۲ درصد رسید.

<sup>1</sup> Printing

<sup>2</sup> Sulfurization

<sup>3</sup> Selenization

<sup>4</sup> Substrate

<sup>5</sup> Superstrate

<sup>6</sup> Module

<sup>7</sup> Alfa Aesar

<sup>8</sup> Merck

۱. حرارت‌دهی در شرایط محیطی (روی هیتر در هوا)  
 ۲. حرارت‌دهی با فشار بخار کنترل شده (با درپوش روی لایه حین حرارت‌دهی)  
 شکل ۲، طرح‌واره‌ای از مراحل ساخت سلول را نشان می‌دهد.  
 در ادامه، اتصال پشتی از خمیر کربنی به روش دکتر بلید<sup>۴</sup> روی لایه جاذب نشانده شده و در ۱۲۰ درجه سلسیوس خشک شد.

## ۲-۴- مشخصه‌یابی

بررسی عملکرد فتوولتایی سلول‌های خورشیدی ساخته شده با دستگاه شبیه‌ساز نور خورشید (شریف‌سولار) و پتانسیواستات پالم‌سنس<sup>۵</sup> تحت نور شبیه‌سازی شده AM 1.5 اندازه‌گیری شد.  
 اندازه‌گیری جذب اپتیکی با استفاده از طیف‌سنج پراکین المر<sup>۶</sup> انجام شده است.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- مشخصه‌یابی لایه جاذب

ساختار بلوری لایه ایجاد شده با استفاده از جوهر نانوذرات CIS با آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) بررسی شد. مطابق شکل ۳، ذرات جوهر با حرارت‌دهی تا ۲۵۰ درجه سلسیوس لایه‌ای بلوری ایجاد کرده‌اند که طیف پراش پرتو ایکس آن منطبق بر طیف مرجع  $\text{CuInS}_2$  با ساختار بلوری کلکوپیریت (کد ICSD No. 750106) است.  
 به منظور بررسی خواص نوری لایه جاذب حاصل از جوهر نانوذرات CIS، جذب اپتیکی فیلم نهایی اندازه‌گیری شد. همان‌طور که شکل ۴ نشان می‌دهد فیلم به‌دست آمده در بازه ۶۰۰-۴۰۰ نانومتر جذب بالایی دارد و لذا برای کاربرد در سلول خورشیدی مناسب است. همچنین با رسم منحنی تاک<sup>۷</sup> گاف انرژی لایه برابر با ۱/۵۵ eV به دست آمد که انطباق مناسبی با قله‌ی طیف تابشی خورشید دارد.

۱/۱: ۱: ۵ تنظیم شد. محلول ایندیوم، به بالون حاوی نمک مس، تزریق و تحت آرگون به مدت ۴۵ دقیقه در دمای ۸۰ درجه سلسیوس هم زده شد. در ادامه، محلول تیواوره به بالون واکنش تزریق شد و دما تا ۱۲۰ درجه سلسیوس افزایش یافت. مخلوط واکنش، تحت شرایط رفلکس<sup>۱</sup>، به مدت ۶۰ دقیقه قرار داده شد و پس از سرد شدن تا دمای اتاق، نانوذرات به وسیله سانتریفیوژ جدا شده و با غلظت ۲۰۰ mg/ml در حلال DMF توزیع شد.

## ۲-۳- ساخت سلول خورشیدی

پیش از لایه‌نشانی، زیرلایه‌های FTO طی چند مرحله با آب و صابون، استون، آب دیونیزه و اتانول، شستشو و خشک شدند.  
 لایه سد کننده عبور حفره از جنس دی اکسید تیتانیوم ( $\text{TiO}_2$ ) به روش اسپری پیرولیز<sup>۲</sup> نشانده شد. برای لایه‌نشانی دی اکسید تیتانیوم، محلولی از اتانول (۵ میلی‌لیتر)، استیل استون (۰/۳۶ میلی‌لیتر) و تیتانیوم ایزوپروپوکسید (۰/۲۴ میلی‌لیتر) تهیه شد. این محلول با آهنگ ۲ میلی‌لیتر بر دقیقه روی زیرلایه رسانای شفاف که در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس قرار دارد اسپری شد. ضخامت تقریبی لایه  $\text{TiO}_2$  اسپری شده به این روش ۱۰۰ نانومتر است.  
 لایه بافر<sup>۳</sup> از جنس ایندیوم سولفید ( $\text{In}_2\text{S}_3$ ) نیز به روش اسپری پیرولیز ایجاد شد. برای لایه‌نشانی ایندیوم سولفید، از محلول آبی ۲۵ میلی مولار ایندیوم کلرید چهار آبه و از تیواوره به‌عنوان منبع گوگرد استفاده شد. نسبت مولی گوگرد به ایندیوم در این محلول، ۶ بود. این محلول در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس با آهنگ ۴ ml/min روی لایه  $\text{TiO}_2$  که از قبل ساخته شده، لایه‌نشانی شد.  
 پس از آن، لایه جاذب از جوهر نانوذرات CIS پخش شده در DMF به روش قطره اندازی ایجاد شد. حرارت‌دهی لایه جاذب طی دو مرحله در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس و ۲۵۰ درجه سلسیوس هر کدام به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد. حرارت‌دهی به دو روش انجام شد:

<sup>4</sup> Doctor Blade

<sup>5</sup> PalmSense

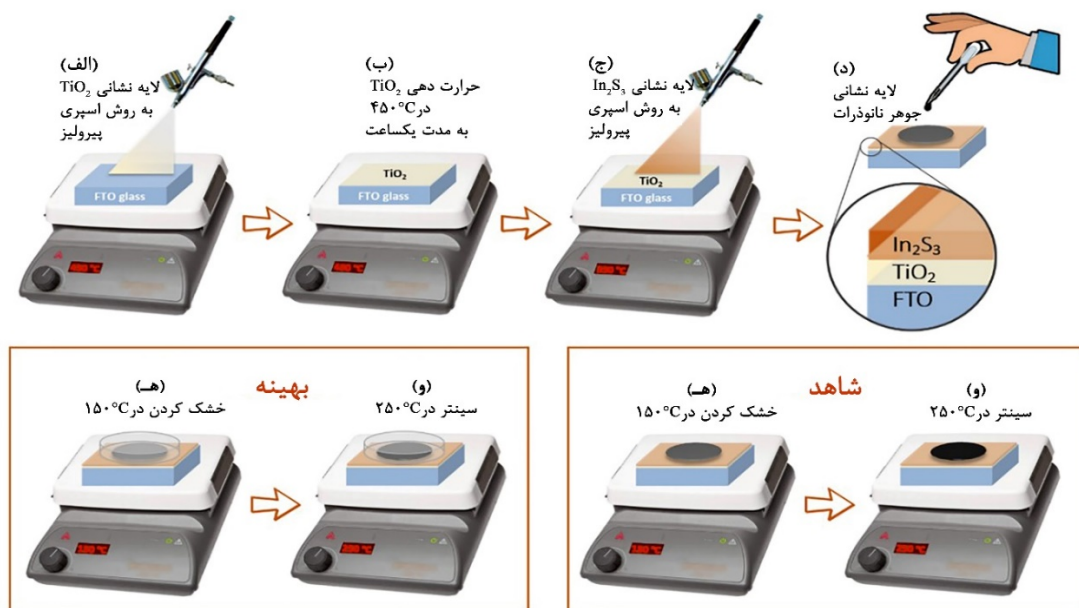
<sup>6</sup> Perkin Elmer

<sup>7</sup> Tauc Plot

<sup>1</sup> Reflux

<sup>2</sup> Spray Pyrolysis

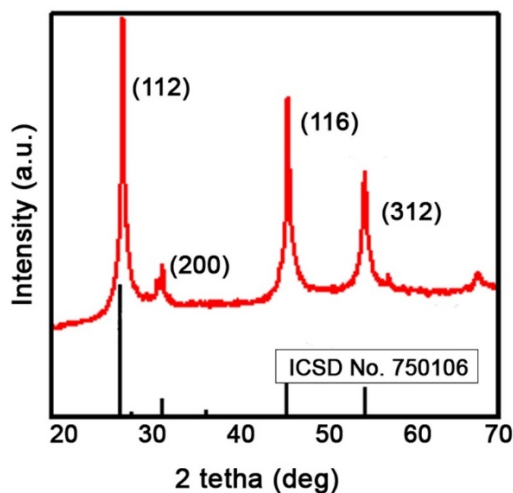
<sup>3</sup> Buffer



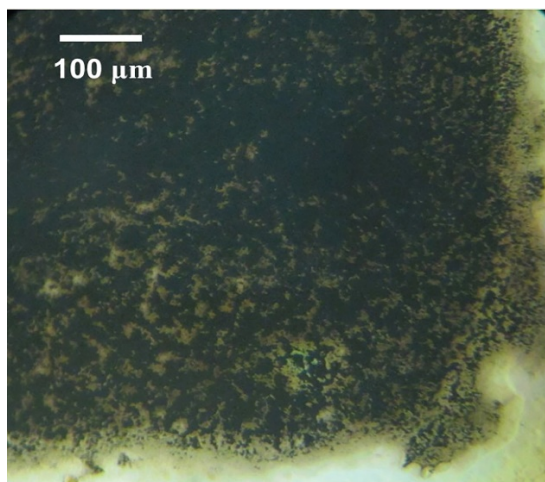
شکل ۲. طرح‌واره مراحل ساخت سلول خورشیدی لایه نازک CIS

۳-۲- عملکرد سلول خورشیدی

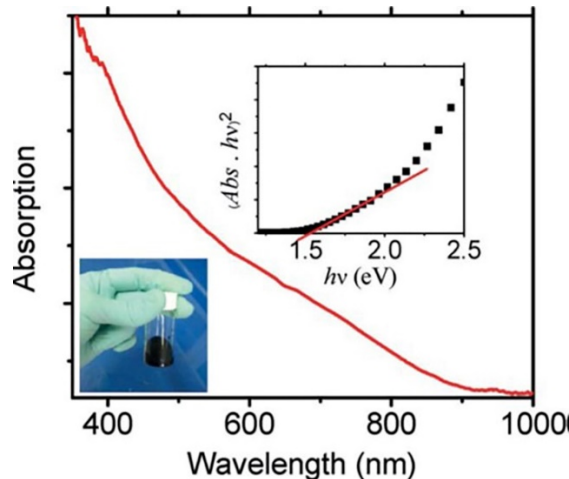
عملکرد سلول خورشیدی ساخته شده با این جوهر به روش معمول (حرارت‌دهی جاذب روی هیتر در هوا) تحت تابش نور شبیه‌سازی شده خورشید (AM 1.5) اندازه‌گیری شد. سلول ساخته شده با ولتاژ مدار باز ( $V_{oc}$ ) ۰/۵۰۹ ولت و چگالی جریان مدار کوتاه ( $J_{sc}$ ) ۱۴/۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و ضریب پرکنندگی (FF) ۰/۳۰، بازدهی ۲/۲ درصد ارائه داد (جدول ۱). بررسی دقیق ظاهر جاذب با میکروسکوپ نشان داد که لایه جاذب CIS ترک‌هایی دارد و همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد در بعضی قسمت‌ها فواصل پوشش نیافته با جوهر وجود دارد.



شکل ۳. طیف پراش پرتو ایکس لایه نازک CIS



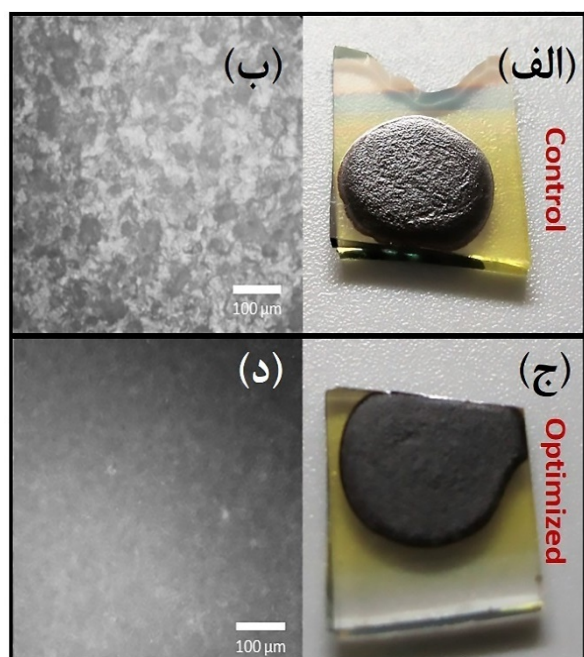
شکل ۳. تصویر میکروسکوپی لایه جاذب خشک شده در شرایط محیطی، مقیاس ۱۰۰ میکرومتر



شکل ۴. طیف جذب لایه CIS، نمودار داخلی: نمودار تاک. عکسی از جوهر سیاه رنگ نانوذرات در تصویر دیده می‌شود

جدول ۱. عملکرد فتوولتاییک سلول خورشیدی لایه نازک CIS بر حسب روش حرارت‌دهی لایه جاذب

بازدهی PCE (%)	ضریب پرکنندگی FF	ولتاژ مدار باز Voc (V)	جریان مدار کوتاه Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	سلول	حرارت‌دهی
۲/۲	۰/۳۰	۰/۵۰۹	۱۴/۵	بهترین	حالت معمول
۱/۹±۰/۲	۰/۳۰±۰/۰۱	۰/۵۱۳±۰/۰۰۷	۱۲/۴±۱/۷	میانگین	
۵/۲	۰/۴۹	۰/۴۹۴	۲۱/۲	بهترین	حالت بهینه
۴/۷±۰/۳	۰/۴۳±۰/۰۷	۰/۵۰۳±۰/۰۱۷	۲۲/۲±۱/۷	میانگین	



شکل ۶. تصویر نوری و میکروسکوپی لایه جاذب لایه‌نشانی شده، (الف) و (ب) به روش مرسوم (شاهد)، (ج) و (د) با بهینه‌سازی شرایط لایه‌نشانی (بهینه)، مقیاس تصویر میکروسکوپی ۱۰۰ میکرومتر است

علاوه بر این، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح مقطع فیلم جاذب CIS بعد از بهینه‌سازی شرایط لایه‌نشانی که در شکل ۷ آمده است، نشان می‌دهد یک فیلم تقریباً یکنواخت و بدون ترک عمقی با ضخامت ۹۰۰ نانومتر بعد از بهینه‌سازی به دست آمده است.

همان‌طور که انتظار می‌رفت در نتیجه این فرآیند بهینه‌سازی، عملکرد فتوولتایی سلول، بهبود قابل توجهی نشان داد. جریان مدار کوتاه و ضریب پرکنندگی افزایش یافتند به طوری که Jsc بهترین سلول از ۱۴/۵ به ۲۱/۲ میلی آمپر بر سانتی‌متر مربع و FF از ۰/۳۰ به ۰/۴۹ رسید. با بهبود ریخت‌شناسی لایه جاذب، بازدهی سلول‌ها بیش از

در اینجا ساخت سلول خورشیدی لایه نازک با جاذب کالکوژناید<sup>۱</sup> به روش مبتنی بر محلول بدون سولفوریزاسیون و سلنیزاسیون مد نظر است که با چالش‌هایی نظیر کیفیت بلورینگی مواجه است. نداشتن بلورینگی مطلوب، منجر به کاهش طول نفوذ الکترون در لایه جاذب می‌شود؛ از همین رو احتمال این‌که الکترون و حفره، پیش از رسیدن به مرز، بازترکیب شوند، زیاد است. بنابراین، هرچه نانوذرات حین حرارت‌دهی لایه جاذب، اتصال بهتری به هم پیدا کنند و دانه‌های بزرگتری ایجاد کنند و به اصطلاح سینتر<sup>۳</sup> شوند، طول نفوذ حامل‌های بار در لایه، بیشتر شده و مسیر مناسب‌تری برای انتقال آنها به مدار خارجی ایجاد می‌شود [۱۱ و ۱۶]. در نتیجه، انتظار می‌رود با وجود لایه جاذب پکیده‌تر، جمع‌آوری حامل‌های بار، بهتر صورت گیرد و منجر به افزایش بازده نهایی سلول شود.

فشار بخار حین حرارت‌دهی جوهر، به منظور از بین بردن ناپیوستگی و ایجاد لایه جاذب پکیده، با قرار دادن درپوشی روی لایه، کنترل شد. شکل ۲ (ه) و (و)، طرح‌واره‌ای از این روش حرارت‌دهی را نشان می‌دهد. به این ترتیب، با بهینه‌سازی سرعت تبخیر حلال جوهر نانوذرات حین حرارت‌دهی، سطح لایه جاذب به نحوی که با چشم غیرمسلح قابل مشاهده بود، نسبت به حالت معمول، صاف‌تر شد. شکل ۶ (الف) و (ج)، تصاویر دوربین از لایه جاذب را نشان می‌دهد. بررسی ریخت‌شناسی لایه با تصاویر میکروسکوپی نیز، کاهش حفرات در لایه و افزایش پکیدگی آن را تأیید کرد. تصاویر میکروسکوپ نوری لایه جاذب، در شکل ۶ (ب) و (د) آمده است.

<sup>1</sup> Chalcogenide

<sup>2</sup> Grain

<sup>3</sup> Sinter

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سلول‌های خورشیدی لایه‌نازک با ساختار رولایه و به روش مبتنی بر محلول با استفاده از جوهر نانوذرات جاذب CIS ساخته شدند. بررسی ریخت شناسی لایه جاذب، وجود ناپوستگی و عدم پکیدگی در لایه را نشان داد. به منظور بهبود کیفیت و پکیدگی لایه جاذب، فرآیند لایه‌نشانی فیلم جاذب، بهینه‌سازی شد. با کنترل فشار بخار حین حرارت‌دهی جوهر نانوذرات، لایه جاذب پکیده و بدون گسستگی به دست آمد. در اثر این بهینه‌سازی، عملکرد سلول بهبود یافت و بازدهی سلول با ۱۳۶ درصد افزایش از ۲/۲ درصد به ۵/۲ درصد رسید. همچنین چگالی جریان مدار کوتاه ( $J_{sc}$ ) و ضریب پرکنندگی (FF) نیز به ترتیب از ۱۴/۵ و ۰/۳۰ به ۲۱/۲ و ۰/۴۹ رسیدند.

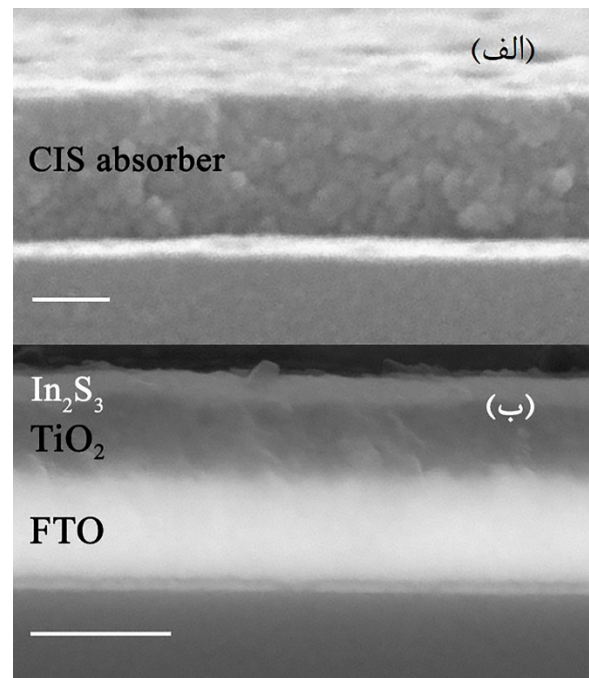
#### ۵- سپاسگزاری

بدینوسیله از اعضای آزمایشگاه نانو ذرات و پوشش های نانومتری دانشگاه صنعتی شریف که ما را در انجام این تحقیق یاری نمودند، صمیمانه تشکر می‌کنیم.

#### مراجع

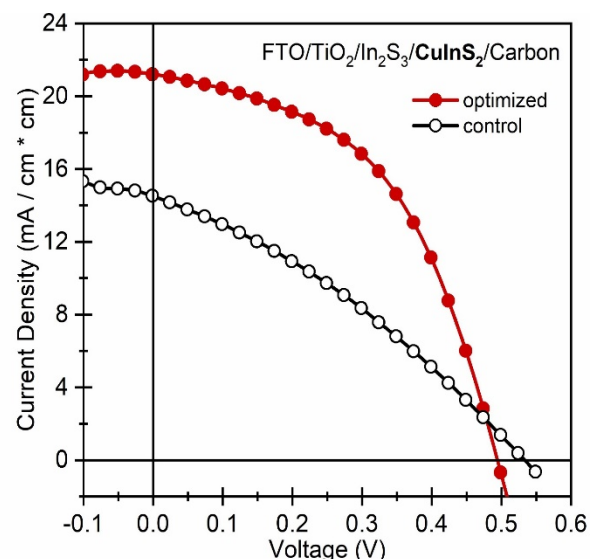
- Poortmans, J., Arkhipov, V., *Thin film solar cells: Fabrication, characterization and applications*, England, John Wiley & Sons Ltd., (2006). <https://doi.org/10.1002/0470091282>
- Green, M. A., Hishikawa, Y., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., Ho-Baillie, A. W. Y., "Solar cell efficiency tables (Version 52)", *Progress in Photovoltaics: Research & Applications*, Vol. 26, No. 7, (2018), 427-436. <https://doi.org/10.1002/pip.3040>
- Green, M. A., "Consolidation of thin-film photovoltaic technology: The coming decade of opportunity", *Progress in Photovoltaics: Research & Applications*, Vol. 14, No. 5, (2005), 383-392. <https://doi.org/10.1002/pip.702>
- Andersson, B. A., Azar, C., Holmberg, J., Karlsson, S., "Material constraints for thin-film solar cells", *Energy*, Vol. 23, No. 5, (1998), 407-411. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(97\)00102-3](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(97)00102-3)
- Shafarman, W. N., Stolt, L., "Cu(InGa)Se<sub>2</sub> solar cells", In Luque, A., Hegedus, S. (ed.), *Handbook of photovoltaic science and engineering*, England, John Wiley & Sons Ltd., (2003), 576-616. <https://doi.org/10.1002/0470014008.ch13>
- Yakushev, M. V., Mudryi, A. V., Victorov, I. V., Krustok, J., Mellikov, E., "Energy of excitons in CuInS<sub>2</sub> single crystals", *Applied Physics Letter*, Vol. 88, No. 1, (2006), 011922. <https://doi.org/10.1063/1.2152114>
- Jackson, P., Hariskos, D., Lotter, E., Paetel, S., Wuerz, R., Menner, R., Wischmann, W., Powalla, M., "New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin-film solar cells beyond 20 %", *Progress in Photovoltaics: Research & Applications*, Vol. 19, No. 7, (2011), 894-897. <https://doi.org/10.1002/pip.1078>
- Hibberd, C. J., Chassaing, E., Liu, W., Mitzi, D. B., Lincot, D., Tiwari, A. N., "Non-vacuum methods for formation of Cu(In,Ga)(Se, S)<sub>2</sub> thin film photovoltaic absorbers", *Progress in*

دو برابر شد و از ۲/۲ درصد به ۵/۲ درصد افزایش یافت (جدول ۱).



شکل ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی، (الف) لایه جاذب CIS با لایه‌نشانی بهینه شده و (ب) لایه تیتانیوم دی اکسید و ایندیوم سولفید اسپری شده روی FTO. مقیاس هر دو تصویر ۵۰۰ نانومتر است

منحنی جریان-ولتاژ بهترین سلول از هر گروه در شکل ۸ آمده است. مشخصات فتوولتائیک سلول‌های ساخته شده به روش معمول و با حرارت‌دهی بهینه در جدول ۱ آمده است.



شکل ۸. منحنی جریان-ولتاژ سلول خورشیدی CIS شاهد و بهینه شده

13. Heinemann, M. D., Ruske, F., Greiner, D., Jeong, A. R., Rusu, M., Rech, B., Schlattmann, R., Kaufmann, C. A., "Advantageous light management in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> superstrate solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 150, (2016), 76-81. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.02.005>
14. Minemoto, T., Harada, S., Takakura, H., "Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> superstrate-type solar cells with Zn<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>O buffer layers", *Current Applied Physics*, Vol. 12, No. 1, (2012), 171-173. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2011.05.030>
15. Cheshme Khavar, A. H., Mahjoub, A. R., Tajabadi, F., Dehghani, M., Taghavinia, N., "Preparation of a CuInS<sub>2</sub> nanoparticle ink and application in a selenization-free, solution-processed superstrate solar cell", *European Journal of Inorganic Chemistry*, Vol. 35, No. 35, (2018), 5793-5800. <https://doi.org/10.1002/ejic.201500749>
16. Kim, H., Tofail, M. T., John, C., "The effect of interface cracks on the electrical performance of solar cells", *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 70, No. 4, (2018), 473-478. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-2739-x>
9. Talapin, D. V., Lee, J. S., Kovalenko, M., Shevchenko, E. V., "Prospects of colloidal nanocrystals for electronic and optoelectronic applications", *Chemical Reviews*, Vol. 110, No. 1, (2010) 389-458. <https://doi.org/10.1021/cr900137k>
10. Kim, B., Min, B. K., "Strategies toward highly efficient CIGSe thin-film solar cells fabricated by sequential process", *Sustainable Energy & Fuels*, Vol. 2, No. 8, (2018) 1671-1685. <https://doi.org/10.1039/C8SE00158H>
11. Cho, J. W., Park, S. J., Kim, W., Min, B. K., "Fabrication of nanocrystal ink based superstrate-type CuInS<sub>2</sub> thin film solar cells", *Nanotechnology*, Vol. 23, No. 26, (2012), 265401. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/26/265401>
12. Romeo, A., Terheggen, M., Abou-Ras, D., Bätzner, D. L., Haug, F. -J., Kälin, M., Rudmann, D., Tiwari, A. N., "Development of thin-film Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> and CdTe solar cells ", *Progress in Photovoltaics: Research & Applications*, Vol. 12, No. 2-3, (2004), 93-111. <https://doi.org/10.1002/pip.527>