



بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران  
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران  
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز



## ساخت سلول خورشیدی فیلم نازک نانوساختار مس ایندیوم سولفید با روشهای بسیار ارزان و قابل پرینت

مهدی دهقانی<sup>۱</sup>، عباس بهجت<sup>۱</sup>، فریبا تاج آبادی<sup>۲</sup>، نیما تقوی‌نیا<sup>۳،۴</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده‌ی فیزیک، دانشگاه یزد، یزد

<sup>۲</sup>پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج

<sup>۳</sup>دانشکده‌ی فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

<sup>۴</sup>پژوهشکده‌ی نانو، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

چکیده - سلولهای خورشیدی فیلم نازک CIGS بعلت پایداری بالا و گاف انرژی متغیر یکی از گزینه‌های مهم برای جانشینی سلولهای سیلیکونی است. در این مقاله نحوه‌ی ساخت یک سلول خورشیدی بر اساس ساختار رولایه گزارش می‌شود. با استفاده از روش اسپری لایه دی اکسید تیتانیوم بعنوان لایه‌ی سد کننده اتصال کوتاه، لایه‌ی ایندیوم سولفید به عنوان لایه‌ی بافر و لایه‌ی جاذب مس ایندیوم سولفید همه به روش اسپری ساخته می‌شوند. از چسب کربنی نیز برای اتصال پشتی استفاده شده است. با استفاده از طیف عبور و جذب گاف انرژی لایه‌ها بدست آمده است. در آخر با رسم نمودار چگالی جریان بر حسب ولتاژ، بازده ۰/۴۷ درصد با این روش بدست آمده است.

کلید واژه- لایه ی جاذب، سلول خورشیدی، فیلم نازک .

## Very low cost and printable Fabrication methods for CuInS<sub>2</sub> thin film solar cell

Mehdi dehghani<sup>1</sup>, Abbas Behjat<sup>1</sup>, Fariba Tajabadi<sup>2</sup>, Nima Taghavinia<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Physics department, Yazd University

<sup>2</sup>Materials & Energy Research Center, Karaj

<sup>3</sup>Faculty of physics Sharif University of technology, Tehran

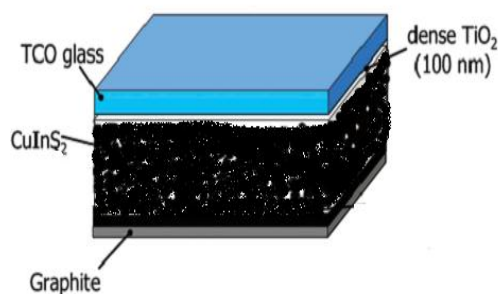
<sup>4</sup> Nano Research Center Sharif University of technology, Tehran

Abstract- CIGS thin film solar cells owing to their long stability and variable band gap are a promising replacement for silicon solar cell. In this work, we report the fabrication of super-strate CIGS solar cell. TiO<sub>2</sub> blocking layer, In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> buffer layer and CuInS<sub>2</sub> absorber layer are deposited by spray pyrolysis. In addition, carbon paste is used to make back contact. We indicate the layers band gap according to transmission and absorption UV-visible spectrum. Finally, 0.47% efficiency is obtained from J-V characterization plot.

Keywords: Absorber layer, Thin film, Solar cell

## ۱- مقدمه

علاوه بر سلولهای خورشیدی سیلیکونی که به تولید انبوه رسیده‌اند، محققان تحقیقات خود را بر روی چندین جانشین مطمئن که مزیت‌های بیشتری نسبت به سلولهای خورشیدی سیلیکونی دارند، متمرکز کرده‌اند. بعنوان یک جانشین مطمئن می‌توان سلولهای خورشیدی  $CuIn_{1-x}Ga_x(Se_{1-x}S_x)$  یا مس ایندیم گالیوم سلنید یا سولفید را نام برد. نیم‌رسانای CIGS از خانواده‌ی I-III-VI<sub>2</sub> بوده و ساختار کریستالی کالکوپریت تتراگونال دارد [۱]. این ترکیب دارای گاف انرژی مستقیم است و بسته به درصد حضور گالیوم و سولفور گاف انرژی آنها از ۱/۰۲ تا ۲/۴ تغییر می‌کند [۲]. ضخامت لایه‌ی جاذب در این سلولها حداکثر به ۲ میکرومتر می‌رسد که در مقایسه با ضخامت لایه‌ی جاذب سلول سیلیکونی (۱۲۰ میکرومتر) بسیار ناچیز است. دوساختار سلولی رو لایه و زیر لایه برای این سلول وجود دارد. در ساختار زیرلایه، لایه‌ی جاذب CIGS که نیم‌رسانای نوع P است بر روی مولیبدنی به ضخامت ۵۰۰-۱۰۰۰ نانومتر که روی شیشه قرار دارد لایه‌نشانی می‌شود. سپس لایه بافر CdS روی آن قرار می‌گیرد. لایه‌ی n این سلول، روی اکسید با ضخامت ۳۰۰ نانومتر و لایه‌ی بعدی یک لایه‌ی پانصد نانومتری از AZO (روی اکسید با ۲ درصد آلاییدگی آلومینیوم) است. اتصال جلویی نیز یک نیم‌رسانای شفاف مثل ITO یا آلومینیوم است که به روش تبخیر مولکولی لایه‌نشانی می‌شود. در عوض یک ساختار رو لایه را به اختصار می‌توان به صورت TCO/TiO<sub>2</sub>/Buffer layer/CIGS/Carbon or Au نشان داد (شکل ۱).



شکل ۱: ساختار سلول ساخته شده در آزمایشگاه

تاکنون با استفاده از لایه‌نشانی به روشهای خلا (مثل کندوپاش و روش تبخیر همزمان) بازده ۲۰٪ از ساختار

زیرلایه و بازده ۱۸/۷٪ از زیرلایه‌ی انعطاف پذیر پلیمری بدست آمده است [۳]. در ساختار رو لایه می‌توان کمتر از روشهای خلا استفاده کرد اما در عوض محدودیت دمادهی داریم. زیرا لایه‌ی بافر قبل از لایه‌ی جاذب لایه‌نشانی می‌شود.

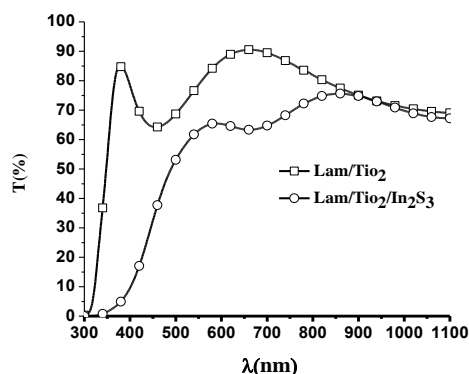
متاسفانه روشهای خلا بسیار کند بوده و برای اهداف تجاری سازی مناسب نیستند. بنابراین یافتن روشهای لایه‌نشانی سریع و غیر خلا یکی از جدیدترین موضوعات تحقیقاتی است [۴ و ۵]. روش ساخت جوهر برای پرینت کردن لایه‌های نیم‌رسانا به دو دسته تقسیم می‌شود: روش اول روش ساخت نانو جوهرذرات است که احتیاج به چیدمان خاص آزمایشگاهی دارد و همه‌ی مراحل ساخت آن در محیط خنثی انجام می‌شود. روش دوم جوهر مولکولی پیش‌ماده‌هاست. در هر دو مورد عامل‌های آلی که بخاطر مقاصد پایدارسازی به ذرات چسبیده‌اند در ساخت سلول باقی مانده‌هایی (مثل کربن، کلر و...) برجای می‌گذارند که موجب کاهش جریان اتصال کوتاه می‌شود. از طرف دیگر بسیاری از حلالهای که مورد استفاده قرار می‌گیرند سمی بوده و مشکلات زیست محیطی به بار می‌آورند. یکی از بهترین حلالها آب است که حلال خوبی برای حل کردن پیش‌ماده‌هاست. در این مقاله برای ساخت سلول خورشیدی  $CuInS_2$  از روش محلول پیش‌ماده‌ها و ساختار رو لایه استفاده می‌کنیم. نیم‌رسانای  $CuInS_2$  دارای گاف انرژی مستقیم ۱/۵ الکترون ولت است. ساختار مورد استفاده در این مقاله به اختصار به صورت FTO/TiO<sub>2</sub>/In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>/CIS<sub>2</sub>/Carbon past است که در شکل (۱) نمایش داده شده است. مزیت این ساختار در این است که تمام لایه‌ها به روش غیرخلا لایه‌نشانی می‌شوند و می‌توانند روشی برای تجاری سازی سلولهای CIGS باشند.

## ۲- روش ساخت سلول

برای ساخت سلول ابتدا زیرلایه‌ی FTO با استفاده از حمام مافوق صوت بوسیله‌ی استون و اتانول هر کدام به مدت ۲۰ دقیقه شستشو داده می‌شود. سپس محلول ۵ میلی مولار از اتانول و TTIP و استیل استون [۶] را در دمای ۴۵۰ درجه با آهنگ ۱ میلی لیتر بر دقیقه بر روی FTO اسپری می‌کنیم. گاف انرژی برای تیتانیوم

دی اکسید برابری با  $\frac{3}{2}$  الکترون ولت است. شکل ۲ طیف عبور تیتانیوم دی اکسید بر روی لام را نشان می دهد.

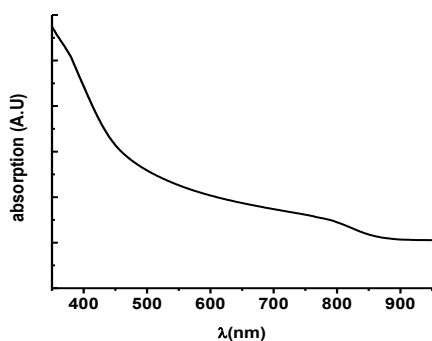
با استفاده از فرمول  $\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} = 2nd$  ضخامت لایه ی دی اکسید تیتانیوم پکیده ۱۴۰ نانومتر است. از این لایه برای جلوگیری از اتصال کوتاه شدن سلول استفاده می شود.



شکل ۲: طیف عبور لایه ی دی اکسید تیتانیوم اسپری شده و طیف عبور ایندیوم سولفید لایه نشانی شده بر روی دی اکسید تیتانیوم. منحنی خط مربع طیف تیتانیوم دی اکسید و منحنی خز دایره طیف ایندیوم سولفید

لایه ی جذب این سلول نیز با استفاده از محلول ۷ میلی مولار آبی ایندیوم کلراید ۴ آبه، مس کلراید ۲ آبه و تیواوره ساخته می شود. نسبت مس به ایندیوم یک به یک و نسبت سولفور به ایندیوم ۳ تا ۶ می تواند باشد. هنگام لایه نشانی دمای زیر لایه در ۳۲۰ درجه ی سانتی گراد ثابت می شود و آهنگ لایه نشانی در ۳ میلی لیتر بر دقیقه ثابت است. شکل ۴ طیف جذب لایه ی CIS<sub>2</sub> را نشان می دهد. همانطور که از شکل مشخص می شود گاف انرژی این لایه تقریباً ۱/۴۷ الکترون ولت است که خیلی نزدیک به گاف اصلی است. ضخامت این لایه بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر می تواند تغییر کند.

با استفاده از فرمول  $\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} = 2nd$  ضخامت لایه ی دی اکسید تیتانیوم پکیده ۱۴۰ نانومتر است. از این لایه برای جلوگیری از اتصال کوتاه شدن سلول استفاده می شود. برای لایه نشانی ایندیوم سولفید ابتدا محلول آبی ۲۵ میلی مولار از ایندیوم کلراید ۴ آبه و تیواوره (منبع سولفور) تهیه شده و بر زیر لایه ی FTO/TiO<sub>2</sub> لایه نشانی می شود. دمای زیر لایه در ۳۵۰ درجه ثابت می شود [۷]. در شکل ۲ ایندیوم سولفید لایه نشانی شده بروی دی اکسید تیتانیوم که بر لام لایه نشانی شده را نیز نشان می دهد. ایندیوم سولفید دارای دو گاف انرژی مستقیم و غیر مستقیم است. شکل ۳ پراش پرتو ایکس از ایندیوم سولفید که بر لام لایه نشانی شده را نشان می دهد. برای تطابق ساختار با استفاده از کارت 00-005-0731 شکل (۳) تطابق کامل پیک های ایندیوم سولفید اسپری شده

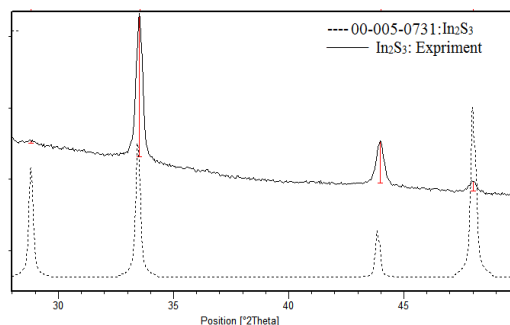


شکل ۴: طیف جذب لایه ی جذب مس ایندیوم سولفید

با لایه نشانی چسب کربنی و گذاشتن در دمای ۱۲۰ به مدت ۲۰ دقیقه سلول کامل می شود. در تمام مراحل ساخت از روشهای قابل پرینت کردن استفاده شده این عمل قابلیت تجاری سازی را با روشهای ارزان امکان پذیر می کند.

### ۳- نتایج

مساحت سطح برای ایجاد اتصال را ۰/۱ سانتی متر مربع در نظر می گیریم شکل ۵ نمودار مشخصه ی جریان ولتاژ را نشان می دهد. نمودار چگالی جریان بر حسب ولتاژ در  $Am=1.5$  با استفاده از طیف دستگاه شبیه ساز نور خورشید بدست آمده است. از این سلول چگالی جریان ۲/۷ میلی آمپر بر سانتی متر مربع و فاکتور پرکنندگی ۴۶



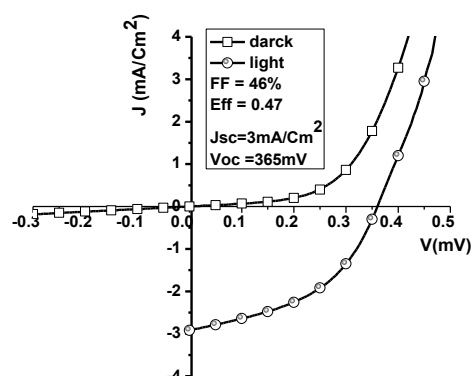
شکل ۳: طیف انعکاس پرتو ایکس ایندیوم سولفید. خط چین طیف کارت و خط ممتد طیف پرتو ایکس ایندیوم سولفید اسپری شده را نشان می دهد

size affect performance, **Nanotechnology**, 18 (2007) 055702 (7pp)

[6] Kavan, L.; Graetzel, M. *Highly efficient semiconducting TiO<sub>2</sub> photoelectrodes prepared by aerosol pyrolysis*. **Electrochim. Acta** (1995), 40, 5, 643-652,

[7] K. Otto, A. Katerski, A. Mere, O. Volobujeva, M. Krunks. *Spray pyrolysis deposition of indium sulphide thin films*. **Thin Solid Films** 519 (2011) 3055–3060

درصد و ولتاژ مدار باز ۳۶۵ میلی ولت بدست آمد. تمام مراحل لایه نشانی در هوای آزاد صورت گرفته و از محلول



شکل ۵: نمودار چگالی جریان بر حسب ولتاژ. منحنی خط مربع جریان تاریک و منحنی دایره مربع جریان روشن را نشان می‌دهد که در  $AM=1.5$  با استفاده از دستگاه شبیه ساز نور خورشید بدست آمده است

آبی استفاده شده و همچنین در هیچ لایه‌ای از تکنیک خلا استفاده نشده است. بنابراین این روش گزینه‌ای مطمئن برای تجاری شدن محسوب می‌شود. پیدا کردن یک راه حل برای افزایش جریان یکی از راه کارهای بهبود بازده است. تحقیقات ما برای بالا بردن جریان ادامه دارد

## مراجع

[1] Yoshihiro.S, Saburo. E and Taizo. L, *Preparation and Characterization of Electrodeposited CuInSe<sub>2</sub> Thin Films*, **Jpn. J. Appl. phys.** 32 (1993) 1562-1567

[2] S.J. Fonash, *solarcell Device Physics*, Academic press, New York, 1981

[3] Adrian Chirilă Stephan Buecheler et all. *Highly efficient Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells grown on flexible polymer films* **Nature materials** 10,(2011) 857-861

[4] Qijie Guo, Grayson M. Ford, Hugh W. Hillhouse, and Rakesh Agrawal *Sulfide Nanocrystal Inks for Dense Cu(In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>)(S<sub>1-y</sub>Se<sub>y</sub>)<sub>2</sub> Absorber Films and Their Photovoltaic Performance* **NANO LETTERS** Vol. 9, No. 8 (2009) 3060-3065

[5] Ryan O'Hayre, Marian Nanu, Joop Schoonman and Albert Goossens: *parametric study of TiO<sub>2</sub>/CuInS<sub>2</sub> nanocomposite solar cells: how cell thickness, buffer layer thickness, and TiO<sub>2</sub> particle*