

طراحی و ساخت الکتروود نانوساختار $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ به منظور استفاده در وسایل اپتوالکترونیک

محسن قاسمی ورنامخواستی، اسماعیل شهریاری، ویشتاب سلیمانیان

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

مرکز پژوهشی فوتونیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

(دریافت مقاله ۹۴/۱۱/۳۰ - پذیرش مقاله : ۹۵/۰۲/۱۲)

چکیده

در این مقاله، سیستم چند لایه‌ای نانوساختار رسانای شفاف ($\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ (SAM) طراحی و شبیه‌سازی شده و ضخامت بهینه هر یک از لایه‌ها به گونه‌ای محاسبه شد که بطور همزمان تراگسیل اپتیکی بالا و مقاومت الکتریکی پایین داشته باشیم. پوشش‌های نانوساختار SAM با استفاده از روش لایه‌نشانی تبخیر حرارتی بر روی بسترهای شیشه‌ای انباشت شدند و سپس در هوا در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۱ ساعت بازیخت شدند. برخی خواص الکتریکی، اپتیکی و ساختاری این سیستم چند لایه‌ای از قبیل مقاومت الکتریکی سطحی، تراگسیل اپتیکی، بازتاب و ناهم‌واری‌های سطحی اندازه‌گیری شدند. سیستم چند لایه‌ای SAM دارای مقاومت الکتریکی سطحی پایین ($12.5 \Omega/\square$) و تراگسیل در ناحیه مرئی ۹۰٪ هستند. با استفاده از تحلیل خطوط پراش پرتوهای X، اندازه نانوبلورک‌های SnO_2 و Ag به ترتیب (۱) ۲۷ و (۵) ۱۹ نانومتر تخمین زده شد. مقاومت الکتریکی پایین و تراگسیل بالا استفاده از این لایه‌ها را به عنوان الکتروود رسانای شفاف در کاربردهای اپتوالکترونیک مقدر می‌سازد. نتایج نشان می‌دهد که سلول‌های فتوولتائیک ساخته شده بر روی سیستم چند لایه‌ای SAM بازده تبدیل توان بالاتری نسبت به سلول‌های ساخته شده بر روی لایه‌های تجاری مرسوم ITO از خود نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: سیستم نانوساختار $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ ، تراگسیل اپتیکی، بازتاب اپتیکی، مقاومت سطحی، سلول‌های فتوولتائیک آلی.

Design and Fabrication of Nanostructured $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ Films for Use in Optoelectronic Devices

Mohsen Ghasemi Varnamkhasti, Esmaeil Shahriari, Vishtasb Soleimanian

Department of Physics, Faculty of Sciences, Shahrekord University, P.O. Box 115, Shahrekord, Iran

Photonics Research Center, Shahrekord University, 8818634141 Shahrekord, Iran

(Received 19 Feb 2016, accepted 1 May 2016)

Abstract

In this paper, transparent conductive $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ (SAM) multilayer system is designed and optimum thicknesses of each layer are calculated to achieve high optical transmittance and low sheet resistance simultaneously. SAM nanostructured films were deposited on glass substrate by thermal evaporation technique and then were annealed in air atmosphere at 150 °C for 1 hour. We investigated some electrical, optical and structural properties of this multilayer system such as sheet resistance, optical transmittance, reflectance, figure of merit and surface roughness. High quality SAM layers with a low sheet resistance of 12.5 (Ω/\square) and the maximum optical transmittance of 90% in visible wavelength region were obtained for the optimized SAM system. The crystallite size of SnO_2 and Ag were estimated about 27 (1) and 19 (5) nm, respectively, using diffraction analysis. Low electrical resistivity and high optical transmittance make it possible to use these layers as transparent electrode in optoelectronics applications. The results show that the fabricated photovoltaic cells on SAM multilayer system have higher power conversion efficiency compared to that fabricated on the conventional ITO films.

Keywords: $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ nanostructured system, Optical transmittance, Optical reflectance, sheet resistance, Organic photovoltaic cells.

E-mail of corresponding author: ghasemi.mohsen@sci.sku.ac.ir

مقدمه

فتولتاییک آلی استفاده شود [۱۳]. بعد از طراحی و بهینه‌سازی سیستم چند لایه‌ای SAM، این سیستم را بر روی شیشه با روش تبخیر حرارتی ساخته می‌شود. خواص الکتریکی، اپتیکی و ساختاری سیستم بهینه شده بررسی شد و به عنوان یک الکتروود رسانای شفاف موثر در سلول‌های فتولتاییک آلی استفاده و مشخصه‌یابی شد. لازم به ذکر است که این ساختار برای اولین بار به‌عنوان الکتروود رسانای شفاف طراحی و ساخته می‌شود.

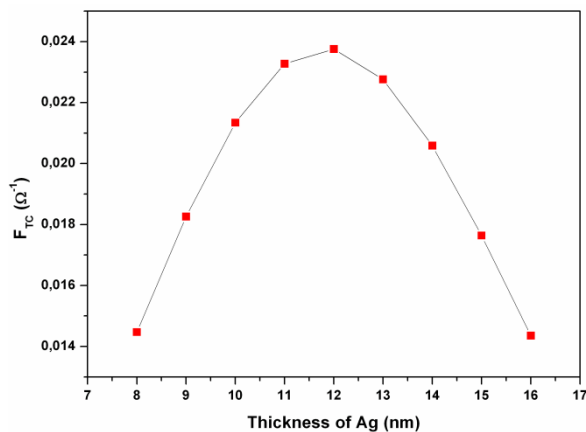
روش ساخت

بسترهای شیشه‌ای در استون، اتانول، متانول و دی‌کلرمتان به‌صورت پی‌درپی و در هر کدام از این مواد به مدت ده دقیقه در دستگاه آلتراسونیک تمیز شدند. قبل از آنکه در محفظه خلأ قرار بگیرند، با آب مقطر شستشو و با گاز نیتروژن بطور کامل خشک شدند. سیستم چندلایه‌ای به صورت پی‌درپی بدون شکست خلأ با استفاده از پودر نیم‌رسانای اکسید قلع با خلوص بالای ۹۹/۹٪ لایه Ag نیز از پودر این ماده با خلوص بالا (۹۹/۹٪) و MoO_3 نیز با خلوص ۹۹/۹٪ به عنوان ماده هدف استفاده شد و با روش تبخیر حرارتی لایه‌نشانی شدند. ساختار چند لایه‌ای بهینه شده $\text{SnO}_2(30 \text{ nm})/\text{Ag}(12 \text{ nm})/\text{MoO}_3(35 \text{ nm})$ حاصل از شبیه‌سازی، با روش تبخیر حرارتی در دمای بستره ۸۰ درجه سانتی‌گراد به صورت پی‌درپی روی زیرلایه‌های شیشه‌ای انباشت شدند. قبل از انباشت لایه‌ها، محفظه تا فشار 1×10^{-5} میلی‌بار تخلیه شد. فشار محفظه در حین لایه‌نشانی 6×10^{-5} میلی‌بار قرار داشت. آهنگ انباشت و ضخامت هریک از لایه‌ها با استفاده از یک نمایشگر ضخامت کریستال کوآرتز کنترل شدند. آهنگ انباشت برای لایه‌های SnO_2 و MoO_3 ، 0.1 nm/s و برای Ag، 0.05 nm/s انتخاب شد. مقاومت سطحی سیستم چند لایه با گمانه چهار نقطه-ای و ترکیب فازی لایه‌ها با استفاده از طیف‌های XRD مشخص شد. طیف‌های تراگسیل و بازتاب اپتیکی لایه‌ها

امروزه پوشش رسانای شفاف کاربردهای فراوانی در سیستم‌های اپتیکی و الکترواپتیکی دارند. از ویژگی‌های الکتریکی و اپتیکی این پوشش‌ها به طور وسیعی در الکتروودهای شفاف قطعات اپتوالکترونیک [۱]، صفحات نمایش تخت [۲]، آینه‌های بازتاب دهنده گرما [۳]، فوتوکاتالیست‌ها [۴]، حسگرها [۵]، دیودهای نورگسیل [۶] و سلول‌های فتولتاییک [۷] استفاده می‌شود. در میان پوشش‌های رسانای شفاف مختلف، اکسید ایندیوم آلیاژ با قلع (ITO) یکی از مرسوم‌ترین الکتروودهای شفاف است که در قطعات اپتوالکترونیک استفاده می‌شود. اما برخی عوامل نظیر کمیابی ایندیوم، قیمت بالا و انعطاف‌پذیری مکانیکی ضعیف این لایه، کاربردهای آن را محدودتر می‌کند [۸]. امروزه به واسطه نیازهای جدید و توسعه تکنولوژی، یافتن مواد و یا ساختارهای جدید ضروری به نظر می‌آید. تحقیقات جدید نشان می‌دهد که ساختارهای چندلایه‌ای دی‌الکتریک/فلز/دی‌الکتریک (D/M/D) خواص الکترواپتیکی بهتری نسبت به پوشش‌های تک لایه از خود نشان می‌دهند [۹-۱۲]. مواد مورد استفاده برای ساخت این پوشش‌ها، فلزات همراه با نیم‌رساناهای اکسیدی و یا دی‌الکتریک‌ها هستند. در این ساختار، لایه فلزی رسانندگی الکتریکی و لایه دی‌الکتریک یا نیم‌رسانا از بازتاب نور در ناحیه مرئی جلوگیری می‌کند. در این مقاله، از اکسید قلع (SnO_2) به عنوان لایه نیم‌رسانا به دلیل ضریب شکست بالا، شفافیت خوب در ناحیه مرئی، پایداری شیمیایی و چسبندگی خوب بر سطح بستره استفاده می‌شود. در بین فلزات مختلف، نقره به دلیل بالا بودن رسانندگی الکتریکی و جذب پایین در ناحیه مرئی به عنوان لایه فلزی انتخاب می‌شود. در نهایت لایه MoO_3 انتخاب شد، که به دلیل شفافیت بالا در ناحیه مرئی، پایداری حرارتی و شیمیایی و تابع کار بالا (5.3 eV) می‌تواند به عنوان لایه میانگیر اکسیدی مناسب بین آند و ماده آلی در سلول‌های

$$F_{TC} = \frac{T^{10}}{R_{sh}} \quad (2)$$

که در آن T ماکزیمم تراگسیل پوشش‌های رسانای شفاف و R_{sh} مقاومت سطحی لایه را نشان می‌دهد. با داشتن مقدار بازتاب لایه‌ها در طول موج 1700 nm می‌توان مقاومت سطحی لایه را از رابطه (۱) محاسبه کرد. دورانی^۲ نشان داد که در ساختارهای متقارن $D/M/D$ هنگامی که ضخامت لایه‌های اول و سوم باهم برابر باشند، تراگسیل لایه‌ها ماکزیمم است [۱۷]. برای طراحی این پوشش، ما ضخامت لایه‌های SnO_2 و MoO_3 را در یک مقدار دلخواه (30 nm) ثابت گرفته‌ایم و ضخامت لایه Ag را آنقدر تغییر می‌دهیم که ضریب شایستگی این پوشش‌ها به ماکزیمم مقدار خود برسد. شکل ۱ نمودار F_{TC} محاسبه شده را برحسب ضخامت لایه Ag نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، بهترین F_{TC} زمانی به دست می‌آید که ضخامت لایه Ag ، 12 nm باشد.



شکل ۱. نمودار ضریب شایستگی (F_{TC}) برحسب ضخامت لایه نقره

نتایج محاسباتی تراگسیل و بازتاب اپتیکی، ساختار $\text{SnO}_2(30 \text{ nm})/\text{Ag}(x \text{ nm})/\text{MoO}_3(30 \text{ nm})$ برای ضخامت‌های مختلف لایه Ag در شکل ۲ نشان داده شده است.

با یک اسپکتروفوتومتر دوپرتویی مدل (shimadzu uv-) با 3100 اندازه‌گیری شد. مورفولوژی سطحی لایه‌ها با استفاده از دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) تعیین شد. اندازه‌گیری منحنی‌های جریان-ولتاژ سلول‌های فتوولتاییک آلی ساخته شده بر روی سیستم چند لایه‌ای بهینه شده تحت تابش نور و در تاریکی با استفاده از شبیه‌ساز خورشیدی با شدت 100 mw/cm^2 و دستگاه مشخصه یاب I-V (Keithley 2400) انجام شد.

نتایج و بحث

جهت طراحی پوشش‌های رسانای شفاف با استفاده از آرایش چندلایه‌ای، از کد Film Wizard استفاده شد. در فرآیند طراحی، ضخامت هرلایه به‌عنوان پارامتر طراحی، برای حصول بازتاب و تراگسیل مطلوب به‌کار می‌رود. همچنین بطور همزمان مقاومت سطحی سیستم چندلایه‌ای برای ارزیابی عملکرد الکتروودهای رسانای شفاف و جهت کاربرد در قطعات اپتوالکترونیک، فاکتور مهمی است. مقاومت سطحی این پوشش‌ها، از معادله زیر قابل محاسبه است:

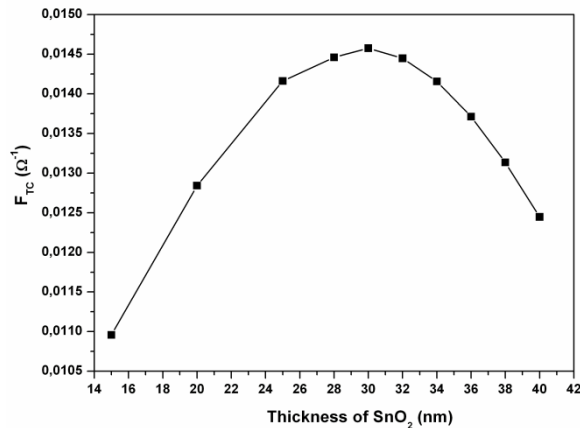
$$R_{sh} = \frac{Z_0}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{R}} - 1 \right) \quad (1)$$

که در آن R بازتاب در ناحیه فرسرخ، R_{sh} مقاومت سطحی و $Z_0 = 377 \Omega$ امپدانس فضای آزاد است [۱۴]. این رابطه نشان می‌دهد که بازتاب در ناحیه فرسرخ به تراکم الکترون در این لایه‌ها بستگی دارد. بازتاب در طول موج 1700 nm می‌تواند به‌عنوان معیاری برای بازتاب در ناحیه فرسرخ به‌کار رود [۱۵]. ضریب شایستگی (F_{TC}) شاخص مهمی است که رابطه بین خواص الکتریکی و اپتیکی پوشش‌های رسانای شفاف را نشان می‌دهد. این کمیت توسط هاک^۱ به‌صورت معادله زیر تعریف شده است [۱۶]:

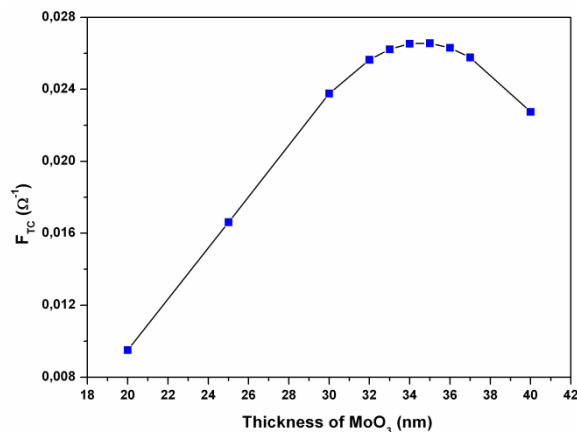
²Durrani

¹ Haacke

۳۵ است. بنابراین ساختار نهایی سیستم چند لایه‌ای بهینه شده SAM به صورت $\text{SnO}_2(30 \text{ nm})/\text{Ag}(12 \text{ nm})/\text{MoO}_3(35 \text{ nm})$ بدست می‌آید.

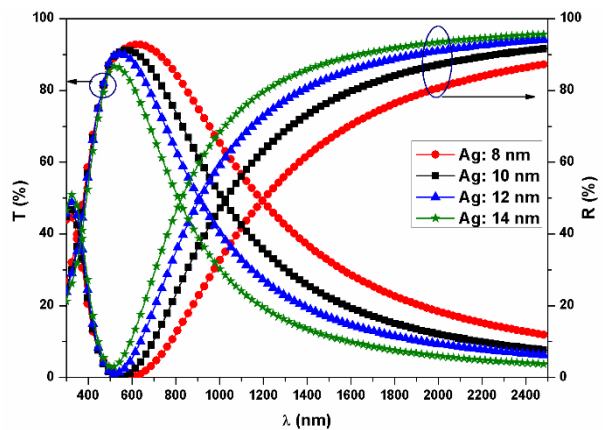


شکل ۳. ضریب شایستگی (F_{TC}) برحسب ضخامت لایه SnO_2



شکل ۴. ضریب شایستگی (F_{TC}) برحسب ضخامت لایه MoO_3

بیشترین مقدار F_{TC} به دست آمده از این پژوهش از مرتبه مقادیر گزارش شده برای ساختارهای چند لایه‌ای مشابه توسط دیگر محققین است [۱۰ و ۲۰]. اکنون پس از بهینه‌سازی و تعیین ضخامت نمونه نهایی، با روش توصیف شده در بخش قبل نمونه بهینه شده را ساختیم. شکل ۵ مقایسه میزان تراگسیل و بازتاب نمونه شبیه سازی شده و ساخته شده با ساختار $\text{SnO}_2(30 \text{ nm})/\text{Ag}(12 \text{ nm})/\text{MoO}_3(35 \text{ nm})$ را نشان می‌دهد.

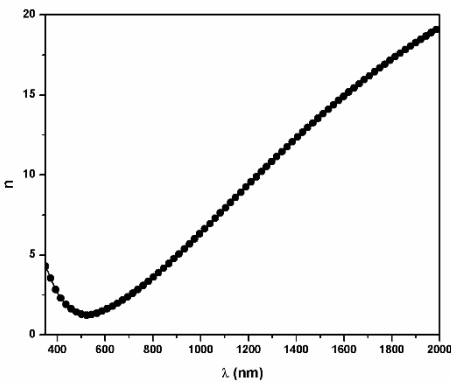


شکل ۲. تراگسیل و بازتاب اپتیکی ساختار چند لایه‌ای $\text{SnO}_2(30 \text{ nm})/\text{Ag}(x \text{ nm})/\text{MoO}_3(30 \text{ nm})$ برای ضخامت‌های مختلف لایه Ag برحسب طول موج

رسانایی سیستم چند لایه‌ای اساساً به واسطه لایه فلزی است. یک لایه همگن و پیوسته از Ag دارای جذب پایین و رسانایی الکتریکی بالایی است. رفتار الکتریکی لایه Ag به گذار از جزایر مجزای اتم‌های Ag به تشکیل یک لایه پیوسته نسبت داده می‌شود [۱۸]. همچنین گزارش شده است که ضخامت بحرانی لایه Ag برای گذار از جزایر مجزا به لایه‌های پیوسته معمولاً بین ۱۰ تا ۲۰ nm است [۱۹]. در این پژوهش، با توجه به مقادیر F_{TC} مقدار ضخامت بهینه لایه Ag در طراحی سیستم SAM، ۱۲ nm است که به خوبی در محدوده گزارش شده قرار گرفته است.

اکنون ضخامت لایه‌های Ag و MoO_3 را در ۱۲ و ۳۰ nm ثابت می‌گیریم و ضخامت لایه SnO_2 را از ۱۵ تا ۴۰ nm تغییر می‌دهیم تا ماکزیمم F_{TC} به دست آید. شکل ۳ نمودار F_{TC} محاسبه شده را بر حسب ضخامت‌های مختلف لایه SnO_2 نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌بینیم که ضخامت بهینه لایه SnO_2 برابر ۳۰ nm است. بعد از آن ضخامت Ag و SnO_2 را در مقادیر بهینه آن‌ها ثابت نگه داشته و ضخامت MoO_3 را تغییر می‌دهیم تا به ضخامت بهینه برای MoO_3 نیز برسیم. نمودار F_{TC} محاسبه شده برای لایه MoO_3 در شکل ۴ نشان داده شده است. مقدار بهینه ضخامت برای لایه MoO_3 برابر ۳۵ nm

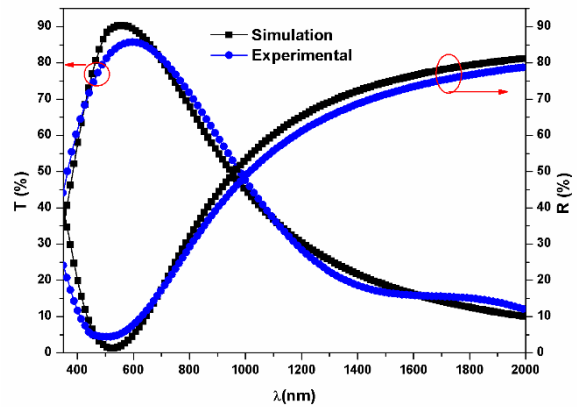
گزارش شده با ساختارهای مشابه توسط دیگر محققین است [۱۰ و ۲۱]. بنابراین، با توجه به خواص الکترواپتیکی به دست آمده، این پوشش قابلیت استفاده به عنوان آند در سلول‌های فتوولتائیک را دارد.



شکل ۷. تغییرات ضریب شکست بر حسب طول موج برای ساختار بهینه شبیه‌سازی شده

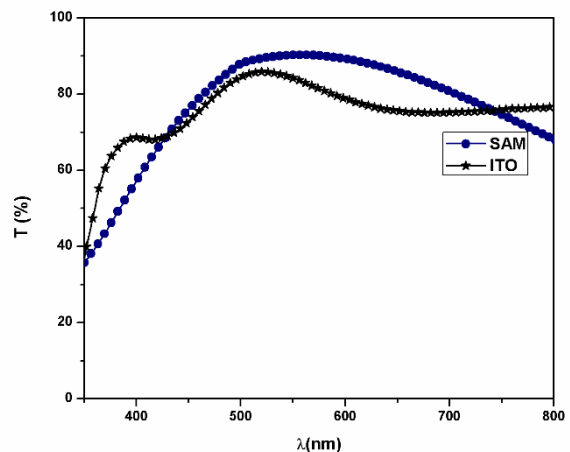
با توجه به مقادیر ضرایب بازتاب و تراگسیل برای ساختار بهینه شبیه‌سازی شده، تغییرات ضریب شکست لایه بر حسب طول موج به کمک روابط موجود در مرجع [۲۲] تعیین شد که نتایج آن در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست تغییرات ضریب شکست در نواحی مختلف طول موجی چشمگیر است. در ناحیه مرئی ضریب شکست بین $1/3$ تا $3/5$ متغیر است.

برای تعیین اندازه بلورک‌های تشکیل شده در فازهای مختلف، از نمونه مورد بررسی نقش پراش تهیه شد. بدین منظور ابتدا با یک دستگاه پراش‌سنج معمولی (فیلیپس PW-3710 با شدت جریان 35mA و ولتاژ 40kV) در گستره بین 20° – 80° درجه به روش روبش پله‌ای با گام 0.3° و زمان شمارش 1s الگوی پراش تهیه شد. همان‌گونه که از شکل ۸-الف مشاهده می‌شود، به دلیل پایین بودن ضخامت لایه‌ها، هیچ قله‌ای در طیف دیده نمی‌شود. برای بار دوم با استفاده از یک پراش‌سنج نسل جدید (X'Pert Pro PMD) با جریان 40mA و ولتاژ 40kV که شدت پرتو و قدرت تفکیک بالاتری نسبت به



شکل ۵. تراگسیل اپتیکی نمونه بهینه شده و ساخته شده ساختار $\text{SnO}_2(30\text{ nm})/\text{Ag}(12\text{ nm})/\text{MoO}_3(35\text{ nm})$

همان‌گونه که از شکل ۵ پیداست طیف تراگسیل و بازتاب نمونه تجربی با نمونه طراحی شده مطابقت خوبی دارد. ماکزیمم مقدار عبور در ناحیه مرئی بالای 85% است که اندکی پایین‌تر از مقدار شبیه‌سازی شده است. مقایسه داده‌های تراگسیل اپتیکی در ناحیه مرئی برای نمونه بهینه ساخته شده ساختار SAM و لایه‌های تجاری ITO در دسترس، در شکل ۶ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که لایه‌های SAM در ناحیه مرئی تراگسیل بالاتری نسبت به لایه‌های ITO از خود نشان می‌دهند.



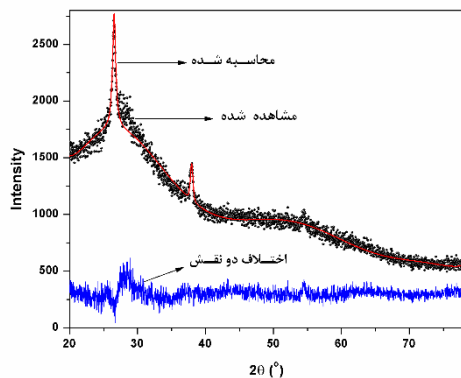
شکل ۶. مقایسه تراگسیل اپتیکی نمونه ساخته شده SAM با لایه ITO

همچنین مقاومت سطحی نمونه ساخته شده $12/5(\Omega/\square)$ به دست آمد که کمتر از مقدار مقاومت سطحی لایه‌های ITO تجاری در دسترس $(15(\Omega/\square))$ و در حدود مقادیر

ریاضی زیر طیف پراش ماده مورد بررسی، شبیه سازی می شود [۲۳].

$$Y_{ci} = \sum_p S_p \{ \sum_k |F_k|^2 f(2\theta_i - 2\theta_k) A_s L_k P_k S_a \} + Y_{bi} \quad (3)$$

در این رابطه، Y_{ci} شدت در گام i ام، S_p عامل مقیاس فاز شماره p ، F_k عامل ساختار، f تابع شکل پیک، A_s تابعی برای تصحیح عدم تقارن نمایه پراش، L_k ضریب لورنتس پلاریزاسیون، P_k تصحیح سمت گیری برتر و S_a ضریبی است برای تصحیح اثر ناهمواری سطح و ضخامت نمونه. با تقسیم عامل مقیاس وابسته به هر فاز می توان درصد هر فاز را تعیین نمود. در انتها با مقایسه نمایه مشاهده و آنچه که از رابطه بالا محاسبه شده است، کمیت های مختلف ساختار و ریزساختار آنقدر پالایش می شوند تا اختلاف بین دو نقش کمینه شود (شکل ۹). در این فرآیند تابع شکل ریاضی انتخاب شده تابع شبه ویت است که بصورت ترکیبی از دو تابع گوس و لورنتس بیان می شود. با انجام این فرآیند، ثابت شبکه هر دوفاز، میانگین اندازه بلورکها و همچنین درصد وزنی دو فاز تعیین شد. این مقادیر در جدول (۱) آورده شده است.



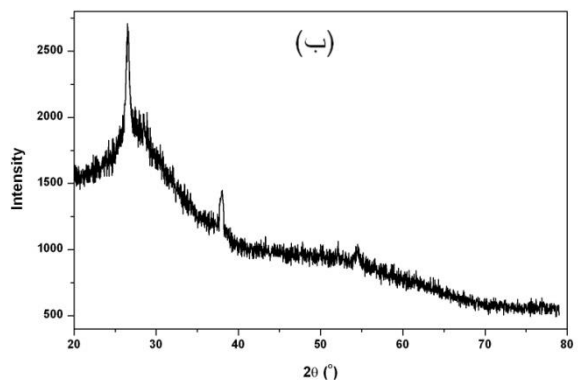
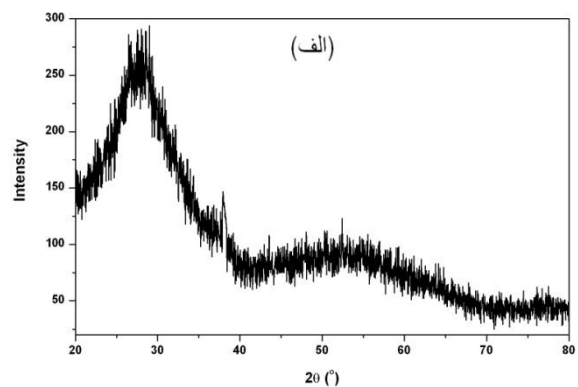
شکل ۹. نقش پراش مشاهده شده، محاسبه شده و اختلاف بین دو نقش.

جدول ۱. ثابت شبکه، درصد فاز و اندازه بلورک های دوفاز مشخص

شده در نقش پراش نمونه مورد بررسی

ماده	a=b (nm)	c (nm)	درصد فاز	D (nm)
SnO_2	۰/۴۷۵۰۳(۳)	۰/۳۲۰۰۶(۳)	۵۷(۵)	۲۷(۱)
Ag	۰/۴۰۷۶۹(۸)	-	۲۳(۵)	۱۹(۵)

نسل قدیم دارد، در همان گستره با زمان شمارش ۲۰s در هر گام نقش پراش جدیدی گرفته شد. این بار در شکل ۸-ب دیده می شود که در زوایای ۲۶/۵۰ و ۳۸/۰۲، دو خط پراش ظاهر شده است. با مطالعه کارت های JCPDS می توان دید که این خطوط به ترتیب مربوط به اکسید قلع و نقره هستند. توضیح اینکه هیچ گونه خط پراشی از فاز مولیبدن اکساید مشاهده نشد که نشان دهنده بی شکل بودن این فاز است.



شکل ۸. مقایسه الگوی پراش تهیه شده با استفاده از (الف) پراش سنج معمولی (ب) پراش سنج نسل جدید با شدت پرتو و قدرت تفکیک بالاتر

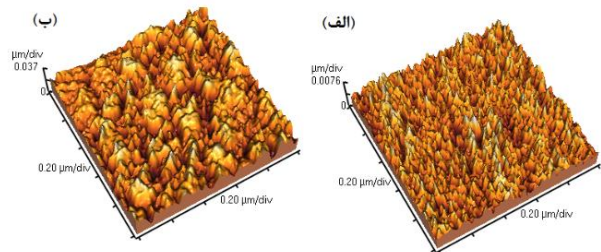
در مرحله بعد به روش ریتولد و با استفاده از نرم افزار فول پروف درصد فاز، ثابت شبکه و اندازه بلورک های نانوذرات اکسید قلع و نقره تعیین شد. اصول کار این نرم افزار بدین صورت است که ابتدا با استفاده از عامل ساختار مربوط به هر خط پراش وابسته به هر فاز، شدت نسبی خطوط پراش محاسبه و با استفاده از رابطه ی

به منظور بررسی مورفولوژی سطحی الکتروودها، از سطح سیستم چند لایه‌ای بهینه شده و لایه ITO تجاری تصاویر AFM تهیه شد که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. جذر میانگین مربعی ناهمواری سطحی (RMS) برای سیستم SAM مقدار $2/2 \text{ nm}$ و برای لایه ITO مقدار $5/08$ به دست آمد و ما می دانیم که سطح هموار برای کاهش نشت جریان و کاهش مقاومت تماسی در سلول-های فتوولتائیک نقش مهمی را ایفا می کند [۲۴].

به منظور بررسی مورفولوژی سطحی الکتروودها، از سطح سیستم چند لایه‌ای بهینه شده و لایه ITO تجاری تصاویر AFM تهیه شد که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. جذر میانگین مربعی ناهمواری سطحی (RMS) برای سیستم SAM مقدار $2/2 \text{ nm}$ و برای لایه ITO مقدار $5/08$ به دست آمد و ما می دانیم که سطح هموار برای کاهش نشت جریان و کاهش مقاومت تماسی در سلول-های فتوولتائیک نقش مهمی را ایفا می کند [۲۴].

تمامی لایه‌ها بجز PEDOT:PSS به روش تبخیر حرارتی در فشار نهایی $5 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ لایه‌نشانی شدند. پلیمر شفاف PEDOT:PSS که به صورت محلول است، با استفاده از روش لایه‌نشانی چرخشی به مدت 30 ثانیه و با سرعت 3200 دور بر دقیقه لایه‌نشانی شد و بعد از آن به مدت 30 دقیقه در دمای 120°C پخت داده شد. مساحت ناحیه فعال نیز 0.2 cm^2 در نظر گرفته شد. برای مقایسه و تعیین اثر آند ساخته شده SAM همین ساختار سلول فتوولتائیک بر روی لایه‌های ITO تجاری در دسترس که از رایج‌ترین آندهای مورد استفاده در قطعات فتوولتائیک است با مقاومت سطحی $15 (\Omega/\square)$ تحت شرایط یکسان ساخته شد. منحنی مشخصه $J-V$ تحت روشنایی با شدت $\frac{mW}{cm^2}$ برای این سلول‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همچنین پارامترهای فتوولتائیک مربوط به این سلول‌ها در جدول ۲ آمده است. با توجه به این که ساختار لایه‌های فعال $\text{CuPc}/\text{C}_{60}$ هر دو سلول یکسان است V_{oc} هر دو سلول تقریباً یکسان است. ضریب پرشدگی (FF) و جریان مدار کوتاه (J_{sc}) تحت تأثیر مقاومت سطحی الکتروودها است. افزایش مقاومت سری آند بر روی V_{oc} تأثیری ندارد اما مقدار J_{sc} را کاهش می‌دهد [۲۵]. نتایج نشان داد بازده از مقدار $2/29(8)\%$ به $2/98(9)\%$ افزایش می‌یابد یعنی بازده تبدیل توان سلول فتوولتائیک ساخته شده بر آند بهینه شده SAM $30/1\%$ بالاتر از سلول ساخته شده بر آند ITO است. نمودار شکل ۱۱ مشخصه چگالی جریان-ولتاژ در حالت تاریکی برای هر دو سلول را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود در حضور آند SAM تزریق حامل‌های بار به شکل مؤثرتری انجام شده و منجر به افزایش چگالی جریان می‌شود. مقادیر مقاومت سری سلول RSA برای هر کدام از سلول‌ها محاسبه شدند (جدول ۲ را ببینید). استفاده از آند SAM به جای ITO باعث می‌شود مقاومت سری سلول از مقدار

به منظور بررسی مورفولوژی سطحی الکتروودها، از سطح سیستم چند لایه‌ای بهینه شده و لایه ITO تجاری تصاویر AFM تهیه شد که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. جذر میانگین مربعی ناهمواری سطحی (RMS) برای سیستم SAM مقدار $2/2 \text{ nm}$ و برای لایه ITO مقدار $5/08$ به دست آمد و ما می دانیم که سطح هموار برای کاهش نشت جریان و کاهش مقاومت تماسی در سلول-های فتوولتائیک نقش مهمی را ایفا می کند [۲۴].



شکل ۱۰. تصاویر AFM از سطح (الف) چند لایه‌ای نانوساختار SAM و (ب) ITO تجاری

ساخت سلول فتوولتائیک آلی

در این پژوهش، پس از ساخت لایه‌های بهینه شده، از آن‌ها به عنوان آند در سلول فتوولتائیک آلی با ساختار زیر استفاده شد:

SAM/ PEDOT:PSS (40 nm)/ CuPc (40 nm)/ C60 (40 nm)/ BCP (8 nm)/ LiF (1.2 nm)/ Al (100 nm)

به منظور جلوگیری از اتصال کوتاه شدن سلول به هنگام اتصال دو الکتروود قسمتی از بستره SAM با استفاده از اسید کلریدریک سونش شد. سپس بستره‌های SAM شستشو شده و در محیط نیتروژن خشک شدند. مواد آلی استفاده شده برای سلول‌ها عبارتند از: CuPc (99.5%), PEDOT:PSS (99.9%), BCP (99.5%), C60 (99.9%) از شرکت Sigma Aldrich خریداری شدند. آهنگ انباشت برای CuPc (دهنده الکترون) و C60 (پذیرنده الکترون) به عنوان لایه فعال، 0.8 Å/s و برای BCP به عنوان لایه سد کننده اکسیتونی، 0.5 Å/s و برای LiF

جدول ۲. مشخصات سلول‌های فتوولتائیک آلی با آندهای متفاوت

ITO و SAM

آند	Jsc (mA/cm ²)	V _{oc} (V)	FF	η_p (%)	R _s A (Ωcm^2)
ITO	۸/۸ (۲)	۰/۶۰ (۱)	۰/۴۳ (۱)	۲/۲۹ (۸)	۱۵/۹ (۹)
SAM	۱۰/۷ (۳)	۰/۶۰ (۱)	۰/۴۷ (۱)	۲/۹۸ (۹)	۸/۶ (۹)

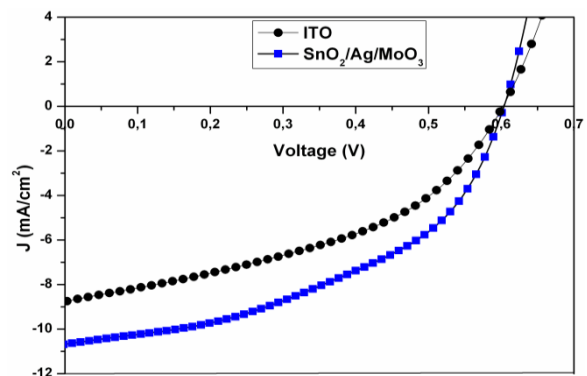
نتیجه‌گیری

در این پژوهش ما سیستم سه لایه‌ای (SAM) $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ را به عنوان پوشش رسانای شفاف طراحی کردیم و آن را با روش تبخیر حرارتی بر روی بستره‌های شیشه‌ای ساختیم. ضخامت بهینه برای لایه میانی Ag، ۱۲ nm، برای لایه SnO_2 ۳۰ nm، و برای لایه MoO_3 ۳۵ nm به دست آمد. با تحلیل خطوط پراش پرتوهای X لایه تهیه شده، اندازه نانوذرات و درصد فاز لایه‌های تشکیل شده به ترتیب برای SnO_2 ۲۷(۱) نانومتر و ۵۷(۵)٪ و برای Ag ۱۹(۵) نانومتر و ۲۳(۵)٪ است. نتایج نشان می‌دهد که در نمونه ساخته شده تراگسیل در ناحیه مرئی ۹۰٪ و مقاومت سطحی این‌گونه پوشش‌ها نیز $۱۲/۵(\Omega/\square)$ است که دلالت بر تراکم بالای حامل‌های بار در این سیستم چندلایه‌ای دارد. ما نشان دادیم که ساختار طراحی شده به

عنوان یک الکتروود رسانای شفاف می‌تواند در وسایل اپتوالکترونیک استفاده شود. نتایج نشان می‌دهد بازده تبدیل توان سلول فتوولتائیک ساخته شده بر آند بهینه شده SAM ۳۰/۱٪ بالاتر از سلول ساخته شده بر آند مرسوم ITO است که می‌تواند به دلیل مقاومت سری پایین‌تر و سطح هموارتر لایه SAM باشد. بنابراین این سیستم سه لایه‌ای می‌تواند جایگزین مناسبی برای الکترودهای مرسوم ITO باشد.

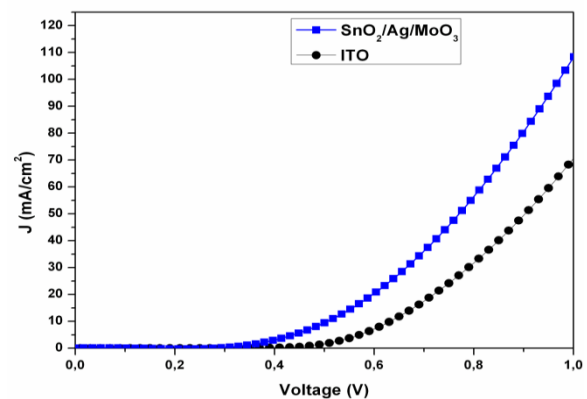
(۹) ۱۵/۹ به

Ωcm^2 (۹) ۸/۶ پایین بیاید که منجر به جریان مدار کوتاه (Jsc) و ضریب پرتشدگی (FF) بالاتر می‌شود. کاهش مقاومت سری سلول و هموارتر بودن سطح آند باعث افزایش بازده تبدیل توان سلول می‌شود. همچنین مقادیر خطای پارامترهای فتوولتائیک اندازه‌گیری شده در جدول ۲ می‌تواند تکرارپذیر بودن سلول را نشان دهد. به‌طور کلی نتیجه می‌گیریم که ساختار چند لایه‌ای $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ به عنوان یک آند مؤثر در سلول‌های فتوولتائیک آلی می‌تواند بکار برده شود و کارایی سلول‌های با آند SAM بهتر از آند تک لایه ITO است. بنابراین SAM می‌تواند جایگزین مناسبی برای آندهای مرسوم ITO باشد.



شکل ۱۱. منحنی مشخصه چگالی جریان-ولتاژ تحت روشنایی با

آندهای ITO و SAM



شکل ۱۲. منحنی مشخصه چگالی جریان-ولتاژ در تاریکی با

آندهای ITO و SAM

polymeric nanocomposite anode, Nanotechnology, 19(2008)145201/1-145201/5.

9. S. M. B. Ghorashi, A. Behjat, M. Neghabi, G. Mirjalili, *Effects of air annealing on the optical, electrical, and structural properties of nanostructured ZnS/Au/ZnS films*, Applied Surface Science, 257(2010)1602–1606.

10. M. Neghabi, A. Behjat, S. M. B. Ghorashi, S. M. A. Salehi, *The effect of annealing on structural, electrical and optical properties of nanostructured ZnS/Ag/ZnS films*, Thin Solid Films, 519(2011)5662-5666.

11. M. Ghasemi Varnamkhasti, H. R. Fallah, M. Mostajaboddavati, A. Hassanzadeh, *Influence of Ag thickness on electrical, optical and structural properties of nanocrystalline $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{ITO}$ multilayer for optoelectronic applications*, Vacuum 86(2012)1318-1322.

12. M. Ghasemi Varnamkhasti, E. Shahriari, *Design and fabrication of nanometric $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ transparent conductive electrode for inverted organic photovoltaic cells application*, Superlattice and Microstructure 69(2014)231-238.

13. Y. Kanai, T. Matsushima, H. Murata, *Improvement of stability for organic solar cells by using molybdenum trioxide buffer layer*, Thin Solid Films, 518(2009) 537–540.

14. P. Zhao, W. Su, R. Wang, X. Xu, F. Zhang, *Properties of thin silver films with different thickness*, Physica E, 41(2009) 387-390.

15. X. Liu, X. Cai, J. Qiao, J. Mao, N. Jiang, *The design of ZnS/Ag/ZnS transparent conductive multilayer films*, Thin Solid Films, 441(2003) 200-206.

16. G. Haacke, *New figure of merit for transparent conductors*, Journal of Applied Physics, 47(1978) 4086-4089.

17. S. M. A. Durrani, E. E. Khawaja, A. M. Al-Shukri, M. F. Al-kuhaili, *Dielectric/Ag/dielectric coated energy-efficient glass windows for warm climates*, Energy Buildings, 36(2004) 891-898.

18. J. H. Park, K. J. Ahn, K. I. park, S. I. Na, H. K. Kim, *An Al-doped ZnO electrode grown by highly efficient cylindrical rotating magnetron sputtering for low cost organic photovoltaics*, Journal of Applied Physics D, 43(2010)115101/1-115101/6.

19. J. A. Jeong, H. K. Kim, M. S. Yi, *Effect of Ag interlayer on the optical and passivation*

تقدیر و تشکر

این کار با همکاری مرکز پژوهشی فوتونیک در دانشگاه شهرکرد انجام شده است، از این رو نویسندگان از معاونت پژوهشی و مرکز پژوهشی فوتونیک دانشگاه شهرکرد به خاطر حمایت‌هایشان صمیمانه تقدیر و تشکر می‌نمایند.

مراجع

1. A. Subrahmanyam, A. Karuppasamy, *Optical and electrochromic properties of oxygen sputtered tungsten oxide (WO_3) thin films*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 91(2007)266-274.
2. Y. S. Choi, J. U. Yun, S. E. Park, *Flat panel display glass: Current status and future*, Journal of Non-Crystalline Solids, 431(2016) 2-7.
3. H. R. Fallah, M. Ghasemi Varnamkhasti, M.J. Vahid, *Substrate temperature effect on transparent heat reflecting nanocrystalline ITO films prepared by electron beam evaporation*, Renewable Energy, 35(2010)1527-1530.
4. K. Muthu Karuppasamy, A. Subrahmanyam, *The electrochromic and photocatalytic properties of electron beam evaporated vanadium-doped tungsten oxide thin films*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 92(2008)1322-1326.
5. S. Das, V. Jayaraman, *SnO_2 : A comprehensive review on structures and gas sensors*, Progress in Materials Science, 66(2014)112-255.
6. E. Nam, Y. H. Kang, D. Jung, Y. S. Kim, *Anode material properties of Ga-doped ZnO thin films by pulsed DC magnetron sputtering method for organic light emitting diodes*, Thin Solid Films, 518(2010)6245–6248.
7. F. C. Krebs, M. Jorgensen, *Polymer and organic solar cells viewed as thin film technologies: What it will take for them to become a success outside academia*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 119(2013)73-76.
8. G. F. Wang, X. M. Tao, and R. X. Wang, *Flexible organic light-emitting diodes with a*

- properties of flexible and transparent $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$ multilayer*. Applied Physics Letters, 93(2008)03330/1-03330/3.
20. S. Yu, W. Zhang, L. Li, D. Xu, H. Dong, Y. Jin, *Optimization of $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{SnO}_2$ tri-layer films as transparent composite electrode with high figure of merit*, Thin Solid Films 552(2014)150–154.
21. S. H. Yu, C. H. Jia, H. W. Zheng, L. H. Ding, W. F. Zhang, *High quality transparent conductive $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{SnO}_2$ tri-layer films deposited at room temperature by magnetron sputtering*, Materials Letters, 85(2012)68–70.
22. S.H. Mohamed, *Effects of Ag layer and ZnO top layer thicknesses on the physical properties of ZnO/Ag/Zno multilayer system*, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 69(2008)2378– 2384.
23. R. A Young, D. B, Wiles, *Profile Shape Functions in Rietveld Refinements*, Journal of Applied Crystallography, 15(1982) 430-438.
24. M. Ghasemi Varnamkhasti, H. R. Fallah, M. Mostajaboddavati, R. Ghasemi, A. Hassanzadeh, *Comparison of metal oxides as anode buffer layer for small molecule organic photovoltaic cells*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 98(2012)379–384.
25. A. Luque, S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaics Science and Engineering*, John Wiley & Sons Ltd., New York, (2003).