

## خواص فیزیکی لایه‌های ITO بر بستر انعطاف پذیر Poly Ethylene Terephthalate

معنوی زاده، نگین<sup>۱</sup>؛ خدایاری، علیرضا؛ ملکی، هادی؛ اصل سلیمانی، ابراهیم؛ باقرزاده، شیدا<sup>۱</sup>؛ اسدی پور، بهاره<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>آزمایشگاه تحقیقاتی لایه های نازک، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، کارگر شمالی، تلفن/نمابر: ۰۱۱۲۳۵-۲۱۸۸-۹۸+

<sup>۲</sup>دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

<sup>۳</sup>پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده لیزر و اپتیک

<sup>۴</sup>دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال

### چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی خواص فیزیکی لایه‌های ITO بر روی دو نوع مختلف زیرلایه، بر حسب تغییر توان کندوپاش و در نهایت بدست آوردن لایه‌ای بهینه با مقاومت ویژه حداقل و شفافیت مناسب در محدوده مرئی می‌باشد. در ابتدا لایه‌های نازک رسانا و شفاف اکسید ایندیم آلیاژ به قلع (ITO) با استفاده از هدف سرامیکی ITO (۹۰-۱۰ wt. %) ( $In_2O_3-SnO_2$ ) بر روی زیرلایه‌های شیشه و بستر انعطاف پذیر PET به شیوه کندوپاش RF لایه نشانی شده‌اند. پس از انجام لایه نشانی، خواص الکتریکی، اپتیکی، ساختار کریستالی و ساختار سطحی نمونه‌ها با کمک آنالیزهای اندازه گیری مقاومت چهار پروبی، طیف سنجی UV/VIS/IR، XRD و AFM مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که لایه‌های نازک ITO که بر روی بستر انعطاف پذیر PET لایه نشانی شده‌اند، دارای ۷۷٪ میانگین درصد عبور نوری و مقاومت ویژه  $9.4 \times 10^{-3} \Omega cm$  هستند در حالی که بر روی زیرلایه شیشه میانگین در صد عبور نوری ۸۳٪ و مقاومت ویژه  $0.93 \times 10^{-4} \Omega cm$  است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهند که با توجه به مقادیر بدست آمده، این لایه برای ساخت سلولهای خورشیدی مناسب است.

## Physical properties of ITO on inflexible Poly Ethylene Terephthalate substrates

N. Manavizadeh<sup>1,2</sup>, A. Khodayari<sup>1</sup>, H. Maleki<sup>3</sup>, E. Asl Soleimani<sup>1</sup>, S. Bagherzadeh<sup>1</sup>, B. Asadipour<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Electrical and Compute Engineering Department, Thin film lab. Tehran University, Tehran

<sup>2</sup>Electrical Engineering Department K. N. Toosi University of Technology, Tehran

<sup>3</sup>Nuclear Science and Technology Research Institute, Laser and Optics research school

### Abstract

Highly conductive and transparent tin-doped indium oxide (ITO) films have been prepared by RF sputtering processes and using a ceramic target ( $In_2O_3-SnO_2$ , 90-10wt %) on polyethylene terephthalate (PET) polymer substrates and on thin glass substrates in various RF sputtering powers. The electrical and optical, structural properties and morphology of the surface of the samples have been analyzed by four point electrical measurements, UV/VIS/IR spectrophotometer, XRD and AFM. Results show that ITO thin films deposited on PET exhibit an average visible transmittance of 77% and an electrical resistivity of  $9.4 \times 10^{-3} \Omega cm$ , while on glass, the values of the average visible transmittance to 83% and resistivity decreases to  $0.93 \times 10^{-4} \Omega cm$ . These are adequate values for the utilization for photovoltaic solar cells.

PACS No. 81.15.Ef

[۱]. لایه‌های نازک ITO بطور گسترده به عنوان مواد رسانای شفاف در بسیاری از زمینه‌های الکترونیک نوری نظیر صفحه نمایشگرهای تخت کریستال مایع [۲]، سلولهای خورشیدی [۳]، دیودهای نور گسیل مواد آلی [۴] و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند.

### مقدمه

اکسید ایندیم آلیاژ شده با قلع (ITO)، نیمه هادی تبهگن با شکاف باند نوری eV ۳/۷۵ می‌باشد. این ماده به طور همزمان دارای مقاومت ویژه پایین و شفافیت بالا در محدوده مرئی است

( $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ , ۹۰-۱۰wt.%) برای لایه نشانی استفاده شده است. پس از رسیدن فشار محفظه به میزان  $6 \times 10^{-6}$  Torr و با کنترل آهنگ ورود گاز، فشار در حدود  $2/6 \times 10^{-2}$  Torr ثابت نگه داشته شده است. لایه نشانی لایه‌های ITO در حضور پلاسمای آرگن (خلوص ۹۹/۹۹۹٪) با توانهای ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ وات با ضخامت ۱۵۰ nm با آهنگ لایه نشانی ۲/۷، ۳/۷ و ۴/۸ nm/min انجام شده است. ضخامت این لایه‌ها توسط سیستم alpha-step (Dektak500) بعد از مرحله لایه نشانی اندازه‌گیری شده است. به منظور بررسی خواص این لایه‌ها، مقاومت الکتریکی آنها توسط سیستم اندازه‌گیری چهار پروبی اندازه‌گیری و ساختار کریستالی، خواص اپتیکی و ساختار سطحی آنها توسط آنالیزهای XRD، UV/VIS/IR (Varian Cary 500) و AFM مورد بررسی قرار گرفته است.

### بحث و تحلیل نتایج

درصد عبور نوری لایه‌های ITO که بر روی شیشه و PET لایه نشانی شده‌اند، بر حسب طول موج اندازه‌گیری شده است. شکل ۱ نشان دهنده درصد عبور نوری این لایه‌ها در توانهای ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ وات است که در شرایط مشابه بر روی هر دو نوع زیرلایه، لایه نشانی شده‌اند.

شکل ۱a طیف درصد عبور نوری لایه‌های ITO را که بر روی بستر انعطاف پذیر PET در توانهای ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ وات لایه نشانی شده است را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود لایه‌ای که با توان ۲۰۰ وات بر روی PET لایه نشانی شده است، در ناحیه طول موجهای مرئی درصد بیشتری از نور را از خود عبور می‌دهد. شکل ۱b طیف مربوط به لایه‌های ITO بر روی شیشه با توانهای ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ وات است که بیشترین میانگین در صد عبور نوری در طیف مرئی مربوط به لایه ۱۰۰ وات است. شکل ۱c نیز تصویر بزرگ شده شکل ۱b است که طیف عبوری شیشه را در محدوده ۷۰ تا ۹۵٪ به وضوح نشان می‌دهد. میانگین درصد عبور نوری هر کدام از لایه‌ها در محدوده طول موجهای ۸۰۰-۴۰۰ nm در جدول ۱ آمده است. در شکل ۱ مشاهده می‌شود که میزان شفافیت لایه‌های موجود بر روی شیشه

در تکنولوژی ساخت سلولهای خورشیدی حداکثر مقادیر قابل دستیابی شفافیت و هدایت مد نظر قرار می‌گیرد [۵].

برای دستیابی به لایه‌های شفاف و رسانای ITO، می‌بایست که نمونه‌ها در حین عملیات لایه نشانی و یا پس از اتمام لایه نشانی در محیطهای مناسب گرمادهی شوند. از مواردی که امروزه نظر محققین را به خود جلب کرده است، لایه نشانی این لایه بر روی زیرلایه‌هایی از جنس پلیمر می‌باشد. این امر منجر به تولید نمایشگرها و یا سلولهای خورشیدی بسیار نازک، سبک و قابل انعطاف بوده و منجر به استفاده آنها به عنوان افزارهای انعطاف پذیر می‌شود [۶]. با این وجود گرمادهی نمونه‌ها برای رسیدن به لایه‌های ITO با کیفیت بالا بر روی بستر انعطاف پذیر PET به دلیل نقطه ذوب پایین ممکن نمی‌باشد.

زیرلایه‌های شیشه‌ای، ترد و شکننده و نسبت به زیرلایه‌های پلیمری سنگین‌تر هستند. این موارد موجب شده است تا در صنایع مختلف به زیرلایه‌هایی از جنس پلیمرهای مختلف که بستریهای محکم، سبک و از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه می‌باشند، روی آورده شود. اما لایه‌های نازکی که بر روی این بستریهای پلیمری لایه نشانی می‌شوند به دلیل مقاومت حرارتی پایین این مواد، مقاومت الکتریکی بالایی را از خود نشان می‌دهند.

در این مقاله، خواص اپتیکی، الکتریکی، کریستالی و ساختار سطحی لایه‌های ITO که به شیوه کندوپاش RF و بر حسب توانهای لایه نشانی ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ وات بر روی زیرلایه‌ای شیشه و PET در شرایط مشابه لایه نشانی شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

### نحوه انجام آزمایش

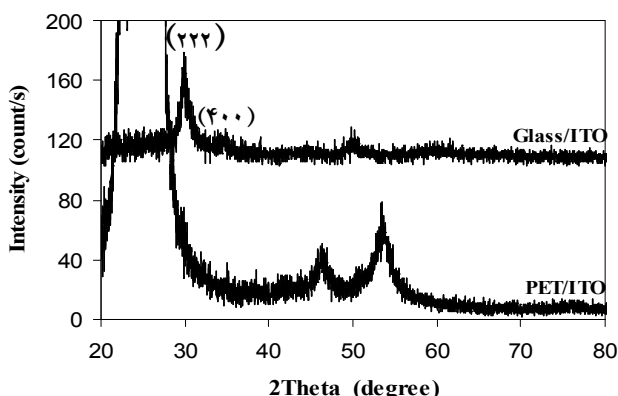
در این مقاله، از زیرلایه‌های شیشه‌ای نازک و بستر انعطاف پذیر PET (polyethylene terephthalate) به ضخامت تقریبی ۱۵۰ میکرومتر جهت لایه نشانی استفاده شده است. قبل از لایه نشانی، زیرلایه‌های شیشه‌ای توسط محلول شیمیایی به روش RCA (آب DI، آمونیاک و پراکسید هیدروژن به نسبت ۵:۱:۱) و زیرلایه‌های پلیمری توسط محلول دی کلرو متان (DCM) تمیز شده‌اند. از سیستم کندوپاش RF و هدف سرامیکی ITO

شکاف انرژی و مقاومت ویژه برای لایه‌های ITO که با توانهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ وات بر روی شیشه و PET لایه نشانی شده‌اند در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۱: خلاصه مشخصه‌های الکتریکی و اپتیکی لایه‌های ITO

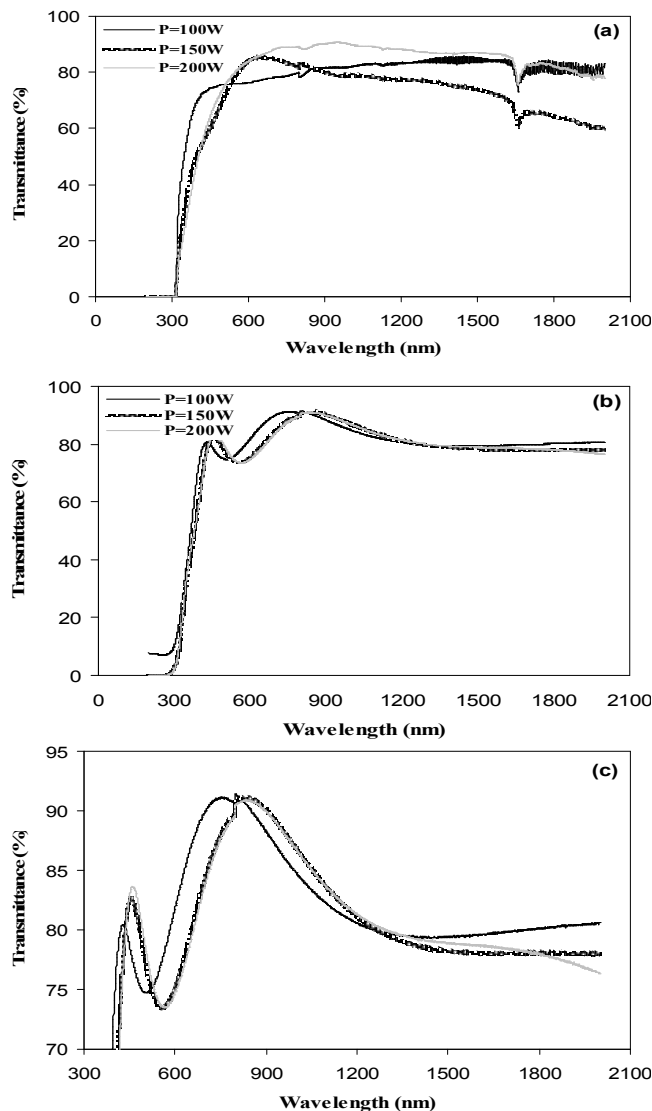
زیرلایه	توان لایه نشانی (W)	$\rho \times 10^{-4}$ ( $\Omega\text{cm}$ )	$T_{\text{avg}}$ (%)	$E_g$ (eV)
شیشه	۱۰۰	۱/۸	۸۳/۰۵	۴/۱۷
شیشه	۱۵۰	۱	۷۹/۹	۴/۰۸
شیشه	۲۰۰	۰/۹۳	۷۹/۷۶	۳/۷۸
PET	۱۰۰	۹۵۰	۷۶/۶۱	۳/۹۲
PET	۱۵۰	۳۵۲	۷۶/۴۲	۳/۸۸
PET	۲۰۰	۹۴	۷۹/۵۲	۳/۹۲

با توجه به مقادیر مقاومت ویژه و میانگین درصد عبور نوری در ناحیه مرئی برای لایه‌های ITO که با توانهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ وات بر روی شیشه و PET لایه نشانی شده‌اند، می‌توان دریافت که با افزایش توان کندوپاش مقاومت الکتریکی لایه‌ها کاهش یافته و برای لایه‌های بر روی شیشه میانگین درصد عبوری به مقدار ناچیزی (حدوداً تا ۰/۴٪) کاهش پیدا می‌کند. با توجه به اینکه مقدار کاهش درصد عبور نوری برای زیرلایه‌های شیشه‌ای با افزایش توان قابل چشم‌پوشی است، می‌توان لایه‌های لایه نشانی شده با توانهای بالاتر که دارای خواص الکتریکی و اپتیکی مناسبی هستند را به عنوان لایه‌های بهینه در ساخت افزاره‌های الکترواپتیکی مورد استفاده قرار داد.



شکل ۲: طیف XRD مربوط به لایه‌های ITO بر روی شیشه و PET در توان ۲۰۰ وات

در بازه ۱۲۰۰-۳۰۰ nm کمی بیشتر از شفافیت همین لایه‌ها بر روی زیرلایه PET با توانهای ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ وات می‌باشد. برای لایه‌های ITO بر روی زیرلایه‌های شیشه‌ای میانگین درصد عبور نوری ۸۳٪ در توان ۲۰۰ وات و در همین توان برای زیرلایه‌های PET ۷۹٪ است.



شکل ۱: طیف درصد عبور نوری لایه‌های ITO با توانهای ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ وات بر روی (a) PET (b) شیشه و (c) تصویر بزرگ شده (b)

برای گذار مستقیم در لایه‌های ITO باند ممنوعه نوری بر حسب انرژی فوتونها از رابطه زیر بدست می‌آید [۷]:

$$(ahv)^2 = A(hv - E_g) \quad (2)$$

الکترونیهای کمتری در مرزدهانه‌ها به دام افتاده است. در نتیجه مقاومت لایه کمتر شده و عبور نوری نیز بهبود می‌یابد.

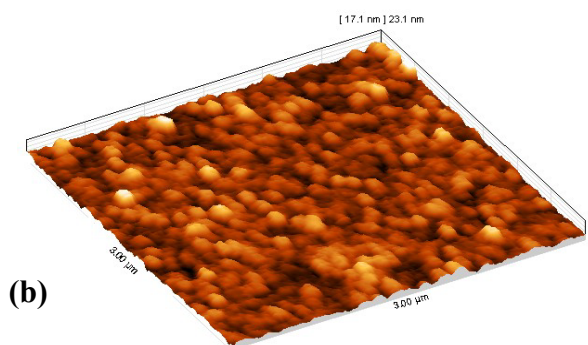
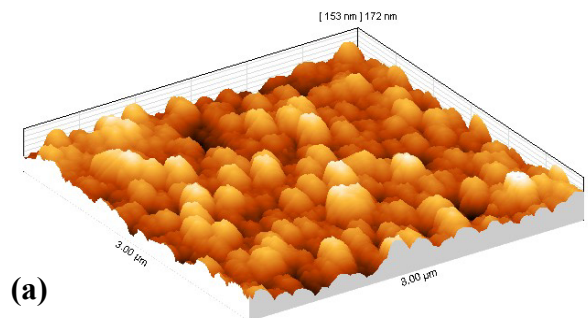
### نتیجه گیری

در این مقاله، لایه‌های شفاف و رسانای ITO به شیوه کندوپاش RF با استفاده از هدف سرامیکی (10wt% SnO<sub>2</sub>; 90wt% In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) بر روی زیرلایه‌های شیشه و بستر انعطاف پذیر PET لایه نشانی شده‌اند. تأثیر توان کندوپاش بر روی خواص الکتریکی، اپتیکی، ساختار کریستالی و ساختار سطحی این لایه‌ها توسط آنالیزهای اندازه گیری مقاومت چهار پروبی، طیف UV/VIS/IR، XRD و AFM بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که لایه‌های نازک ITO که بر روی بستر انعطاف پذیر PET لایه نشانی شده‌اند، دارای ۷۷٪ میانگین درصد عبور نوری و مقاومت ویژه  $9/4 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$  هستند. در حالیکه بر روی زیرلایه شیشه میانگین در صد عبور نوری ۸۳٪ و مقاومت ویژه  $0/93 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$  است. بررسی‌های انجام شده با توجه به این مقادیر، استفاده از این لایه را در صنعت ساخت سلولهای خورشیدی مناسب می‌داند.

### مرجع‌ها

- [1] K. L. Chopra, S. Major, D. K. Pandya, "Transparent conductors—A status review," *Thin Solid Films* **102**, (1983) 1-46.
- [2] R. Latz, K. Miheal, M. Scherer, "High Conducting Large Area Indium Tin Oxide Electrodes for Displays Prepared by DC Magnetron Sputtering," *Jpn. J. Appl. Phys.* **30** (1991) L149.
- [3] I. Hamberg, C. G. Granqvist, "Evaporated Sn-doped In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films: Basic optical properties and applications to energy-efficient windows," *J. Appl. Phys.* **60** 1986 123-160.
- [4] V. Bulovic, P. Tian, P. E. Burrows, M. R. Gokhale, S. R. Forrest, M. E. Thompson, "A Surface-Emitting Vacuum-Deposited Organic Light Emitting Device," *Appl. Phys. Lett.* **70**, (1997) 2954
- [5] R. Groenen, J. L. Linde, D. C. Schram, A. D. Kuypers, "An expanding thermal plasma for deposition of surface textured ZnO:Al with focus on thin film solar cell applications," *Appl. Surf. Sci.* **173**, (2001) 4043
- [6] M. Fahland, P. Karlsson, C. Charton, "Low resistivity transparent electrodes for displays on polymer substrates," *Thin Solid Films* **392**, (2001) 334-337.
- [7] N. Manavizadeh, E. Asl-Soleimani, H. Maleki, R. Afzalzadeh, "Investigation of optical properties of RF sputtered silicon nitride thin films in argon plasma," *Proceedings of 13th Annual Iranian Conference on Optics and Photonics*, (2007) 195.

آنالیز XRD مربوط به لایه‌های ITO که در توان ۲۰۰ وات بر روی شیشه و PET لایه نشانی شده‌اند، در شکل ۲ مشاهده می‌شود. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، تمامی لایه‌های نازک ITO پلی کریستال بوده و دارای ساختار مکعبی bcc اکسید ایندیم (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) می‌باشند. در این طیف قله‌ای که نشان دهنده SnO<sub>2</sub> و SnO در ساختار کریستالی باشد، وجود ندارد. وجود این قله‌ها نشان می‌دهد که اتمهای ناخالصی قلع جایگزین اتمهای ایندیم در شبکه In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> شده است.



شکل ۳: تصاویر AFM مربوط به لایه‌های ITO بر روی (a) PET و (b) شیشه در توان ۲۰۰ وات

تأثیر ناشی از تغییر زیرلایه بر روی ساختار سطحی لایه‌های نازک ITO توسط دستگاه میکروسکوپ AFM بررسی شده است. تصاویر AFM مربوط به لایه‌های ITO که با توان ۲۰۰ وات لایه نشانی شده در شکل ۳ مشاهده می‌شود. با توجه به این تصاویر می‌توان دریافت که با تغییر نوع زیرلایه، اندازه دانه‌ها و ناهمواری سطح تغییر کرده است. ناهمواری مربوط به لایه‌های ITO بر روی شیشه و PET به ترتیب ۱۵۳ و ۱۷ nm است. زیاد بودن ناهمواری بر روی PET حاکی از بزرگ بودن اندازه دانه‌ها می‌باشد. بزرگ شدن دانه‌ها باعث کاهش مرزدهانه شده و تعداد