بررسی اثر دما و آهنگ لایه‌نشانی بر خواص فیزیکی فیلم نازک نانومتری ITO

آرزو مشبکی اصفهانی[۱]، عرفان کدیور[۱]، علیرضا فیروزی فر[۱]

۱. دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شیراز

چکیده – از مباحث با اهمیت در طراحی و ساخت قطعات نیمرسانای آلی، ساخت زیرلایه با ویژگی های اپتیکی و فیزیکی مناسب است. در این مطالعه تأثیر دماهای مختلف حین لایه‌نشانی و همچنین تغییر در آهنگ لایه‌نشانی بر زبری سطح و مقاومت الکتریکی لایه‌های نازک رسانای شفاف که بر زیرلایه ای از جنس *BK7* لایه‌نشانی شده است، مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور لایه‌نازک نانومتری رسانای شفاف اکسید اینیدیوم آلاییده شده با قلع (*ITO*) روی زیرلایه به روش کندوپاش *DC* در دما و آهنگ‌های لایه‌نشانی مختلف، پوشش داده شده است. تأثیر گرمادهی در دو محیط خلأ و هوا پس از لایه‌نشانی بررسی شد. طیف عبوری در ناحیه مرئی بوسیله دستگاه طیف سنج دو پرتویی و مقاومت الکتریکی سطحی پوشش توسط دستگاه پروپ چهارسر اندازه‌گیری شده است. کیفیت و زبری سطح قطعه توسط میکروسکوپ *AFM* بررسی شد. نتایج حاصل از آنالیزها نشان داد که کاهش آهنگ لایه‌نشانی، تأثیر بسزایی در کاهش زبری سطح خطی فیلم و مقاومت الکتریکی نمونه‌ها دارد.

کلید واژه– اکسید قلع و اینیدیوم(*ITO*)، زبری سطح، طیف عبوری، لایه‌نشانی، مقاومت الکتریکی

Experimental investigation of substrate temperature and deposition rate on physical properties of ITO thin film

Arezoo Moshabaki 1, Erfan Kadivar 1, and Alireza Firoozi Far1

1. Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

Abstract- *In this work, the effect of substrate temperature and rate deposition on the electrical, optical, and morphology of ITO thin film coated by DC magnetron sputtering system on BK7 substrate have been experimentally investigated. After the deposition process, some of the sample were annealed in vacuum and air. The transmission spectra were measured before and after the annealing by spectrophotometer. The sheet resistance was measured with four-point tester. The surface topology was analyzed by an atomic force microscopie (AFM). Our experimental results indicate that the resistance and line roughness decreases by decreasing deposition rate.*

.

Keywords: ITO thin film, Substrate temperature, Deposition rate, DC magnetron sputtering

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر فعالیت‌های فراوانی در راستای بهبود خواص اپتیکی و الکتریکی لایه‌های نازک رسانای شفاف صورت گرفته است. اکسید اینیدیوم آلاییده شده با قلع (ITO)، به دلیل دارا بودن خواص الکتریکی و اپتیکی مناسب، یکی از پرکاربردترین مواد مورد استفاده جهت لایه‌نشانی لایه‌های رسانای شفاف به شمار می‌رود[۱]. بسترهای لایه‌نشانی شده با ماده ITO، به دلیل داشتن تراگسیل بالا (حدود ۸۰٪) در ناحیه طول‌موجی مرئی و مقاومت الکتریکی پایین ($\sim 10^{-4}\ \Omega$ cm) کاربردهای متفاوتی در صنایع دارند[۲-۶].

زبری سطح لایه نازک ITO تاثیر زیادی بر خواص الکتریکی و نیز طول عمر انواع سلول‌های فتوولتایی و دیودهای نورگسیل آلی (OLED) دارد. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که اگر زبری سطح پوشش‌های رسانای شفاف از یک مقدار حدی بیشتر باشد، سلول ساخته شده، پس از چند مرتبه کارکرد دچار جرقه شده و خواهد سوخت. لذا کیفیت سطح الکترود رسانای شفاف، پارامتری بسیار مهم درساخت یک سلول فتوولتایی یا دیود نورگسیل آلی به شمار می‌رود. هدف از این مطالعه، ساخت پوشش رسانای شفاف با زبری سطح پایین، مقاومت الکتریکی کم و طیف عبوری بالا می‌باشد.

خواص الکتریکی و اپتیکی لایه نازک ITO، به شدت متأثر از شرایط لایه‌نشانی نظیر دمای زیرلایه، آهنگ لایه‌نشانی، تغییر شار گاز اکسیژن و آرگون، فشار کل محفظه قبل و حین لایه‌نشانی، توان پلاسما، ضخامت لایه‌ها و نیز کیفیت سطح و جنس زیرلایه است[۷-۸]. در بسیاری از مقالات، رابطه‌ی بین این پارامترها مورد بررسی قرار گرفته است. چان و همکارش، تأثیر توان پلاسما بر روی خواص اپتیکی و الکتریکی فیلم ITO را بررسی کردند. در مطالعات آنها، لایه نازک در توان‌های مختلف ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰و۲۰۰ وات لایه‌نشانی شدند. نتایج آنها نشان داد که افزایش توان دستگاه منجر به کاهش زبری سطح فیلم نازک ITO شده است[۹]. جوآن و همکارانش، تأثیر دمای زیرلایه بر خواص فیزیکی و اپتیکی فیلم نازک ITO که به شیوه کندوپاش جریان مستقیم (DC) در دماهای بین ۲۰۰ تا ۴۵۰°c لایه‌نشانی شده بودند را مورد مطالعه قرار دادند[۱۰]. مشبکی و همکارانش، تأثیر شار گاز آرگون بر زبری سطح لایه نازک نانومتری ITO به روش کندوپاش DC را بررسی کردند. نتایج حاصل از آنالیزها نشان داد که با کاهش شار گاز آرگون، زبری سطح نمونه‌ها کاهش یافته است[۱۱]. در این مطالعه تأثیر تغییر دما و آهنگ لایه-نشانی روی پارامترهای مقاومت سطحی، طیف تراگسیل در گستره ۳۵۰ تا ۸۰۰ نانومتر و زبری سطح نمونه‌ها بررسی شد.

۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

در این مطالعه، زیرلایه‌هایی از جنس BK7 به ضخامت ۳ میلیمتر به کمک پنبه و استون تمیز شده، سپس به مدت ۵ دقیقه درون حمام اولتراسونیک الکل در آب ۵۰ °c شسته می‌شوند. سپس به مدت ۵ دقیقه درون آب مقطر شناور می‌شوند. پس از خروج از دستگاه اولتراسونیک با آب فوق خالص شستشو داده و با گاز نیتروژن خشک می‌شوند. جهت لایه‌نشانی فیلم نازک ITO از روش کندوپاش DC استفاده شده است. خلأ اولیه دستگاه لایه-نشانی 2×10^{-6} Torr می‌باشد. نمونه‌ها در ابتدا به مدت ۱۰ دقیقه تحت عملیات تخلیه تابان قرار گرفته و سپس فرآیند لایه‌نشانی انجام می‌گیرد. ضخامت لایه‌ها توسط ضخامت سنج کریستال کوارتز اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت پس از اتمام لایه‌نشانی نمونه‌ها در دو محیط خلأ و هوا به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۳۵۰°c بازپخت شدند. طیف عبوری در ناحیه مرئی بوسیله دستگاه طیف سنج دو پرتویی و مقاومت الکتریکی سطحی پوشش توسط دستگاه پروپ چهارسر اندازه‌گیری می‌شود. کیفیت و زبری سطح خطی قطعه توسط میکروسکوپ AFM بررسی می‌شود.

۳- نتایج تجربی

۳-۱) لایه نشانی در دمای اتاق در آهنگ لایه-نشانی متفاوت

به منظور بررسی تأثیر آهنگ لایه‌نشانی، دمای زیرلایه را حین لایه‌نشانی، در دمای اتاق ثابت نگه داشته و با پارامترهای مشخص و ثابت: ضخامت لایه ۲۵۰nm، شار گاز اکسیژن و آرگون به ترتیب صفر و ۲۰ SCCM، فیلم-های مختلف در آهنگ لایه‌نشانی متفاوت، بر بسترها لایه‌نشانی شدند. نتایج بدست آمده در جدول شماره (۱) مشاهده می‌گردد.

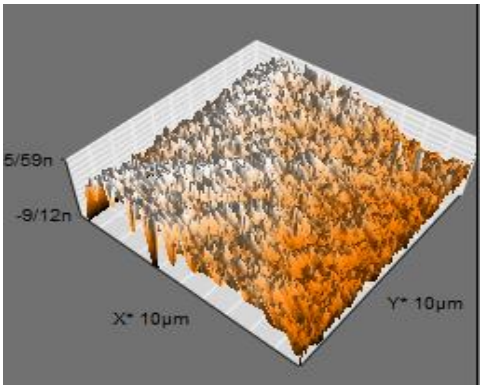
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

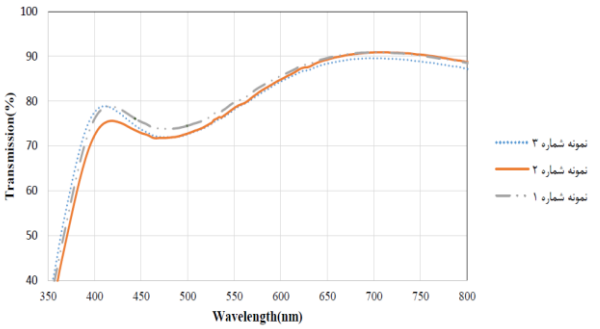
جدول ۱: اطلاعات مربوط به تغییر در آهنگ لایه‌نشانی

شماره نمونه	۱	۲	۳
آهنگ لایه‌نشانی(A°/S)	۰/۵	۱	۱/۵
زبری سطح (nm)	۱/۰۷	۱/۳۹	۱/۷
توان لایه‌نشانی (W)	۱۸	۳۵	۶۰

نتایج نشان می‌دهد که در شار گاز آرگون ۲۰ SCCM با افزایش توان و آهنگ لایه‌نشانی، زبری سطح نمونه‌ها افزایش یافته است. در آهنگ لایه‌نشانی کمتر، اتم‌ها فرصت کافی جهت تشکیل لایه‌نازک با نظم بیشتر در کنار یکدیگر را دارند و در نتیجه شاهد کاهش زبری سطح همراه با کاهش در آهنگ لایه‌نشانی می‌باشیم. تصویر AFM نمونه شماره ۱ در شکل ۱ مشاهده می‌گردد.



شکل ۱: تصویر AFM نمونه شماره ۱



شکل ۲: طیف تراگسیل نمونه‌ها در آهنگ‌های لایه‌نشانی متفاوت

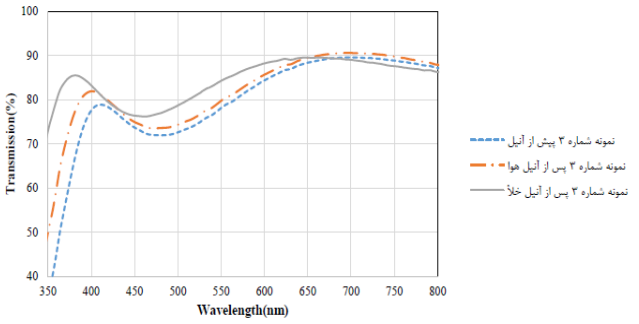
طیف تراگسیل نمونه‌های شماره ۱ و ۲ و ۳ در شکل۲ مشاهده می‌گردد. دیده می‌شود که با افزایش آهنگ لایه-نشانی، طیف عبوری در ناحیه طول موج مرئی دچار تغییرات محسوسی نشده است.

جهت بررسی تأثیر دمای بازپخت بر خواص الکتریکی و فیزیکی فیلم‌های تولید شده در دمای اتاق، نمونه‌های شماره ۱، ۲ و ۳ بطور جداگانه دو محیط خلأ و هوا در دمای ۳۵۰°c به مدت ۲۰ دقیقه بازپخت شدند. تأثیر فرآیند بازپخت در دو محیط خلأ و هوا بر مقاومت الکتریکی و زبری سطح نمونه‌ها پس از فرایند لایه‌نشانی در جدول ۲ مشاهده می‌گردد.

جدول ۲: تأثیر تغییر آهنگ لایه‌نشانی بر مقاومت و زبری سطح

شماره نمونه	۱	۲	۳
مقاومت الکتریکی (Ω/□)	۵۱	۶۴	۴۶
مقاومت پس از آنیل در خلأ (Ω/□)	۵۶	۱۳۸	۱۹
مقاومت پس از آنیل در هوا (Ω/□)	۴۸۳	۷۲۳	۲۳۳
زبری سطح پس از آنیل در خلأ (nm)	۱/۰۹	۱/۳۵	۱/۶

مشاهده می‌گردد که با کاهش آهنگ لایه‌نشانی، مقاومت الکتریکی پس از فرآیند بازپخت در دو محیط خلأ و هوا افزایش یافته است. دلیل این امر این است که در آهنگ لایه‌نشانی کمتر، اتم‌های ماده فرصت بیشتری جهت واکنش با اتم‌های گازی مزاحم موجود در چمبره لایه-نشانی از جمله اکسیژن را دارند و در نتیجه فرآیند اکسیداسیون باعث افزایش مقاومت الکتریکی همراه با کاهش آهنگ لایه‌نشانی می‌گردد. همچنین مشاهده می-گردد که فرآیند بازپخت تأثیر محسوسی بر پارامتر زبری سطح نداشته است.



شکل ۳: طیف تراگسیل نمونه شمار ۳ پیش و پس از بازپخت درهوا و خلأ

۲-۳) لایه‌نشانی در دماهای مختلف در آهنگ لایه نشانی ثابت

در این مرحله لایه نازک ITO در دماهای مختلف بر روی زیرلایه شیشه‌ای BK7 لایه‌نشانی گردید. دیگر پارامترهای آزمایشگاهی، از قبیل شار گاز آرگون و اکسیژن، ضخامت

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

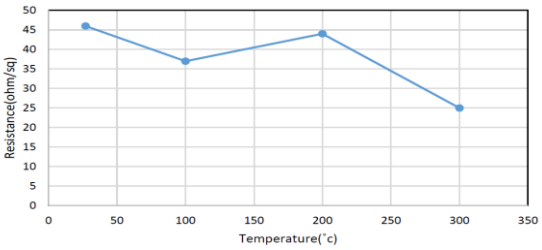
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

لایه و آهنگ لایه‌نشانی ثابت نگه داشته شدند. جدول (۳) نتایج اندازه‌گیری زبری سطح و مقاومت الکتریکی ۳ نمونه لایه‌نشانی شده در دماهای اتاق (نمونه شماره ۳)، ۱۰۰°c (نمونه شماره ۴) و ۳۰۰ °c (نمونه شماره ۵) را نشان می‌دهد.

جدول ۳: تغییرات مقاومت الکتریکی و زبری سطح در اثر تغییر دمای لایه‌نشانی

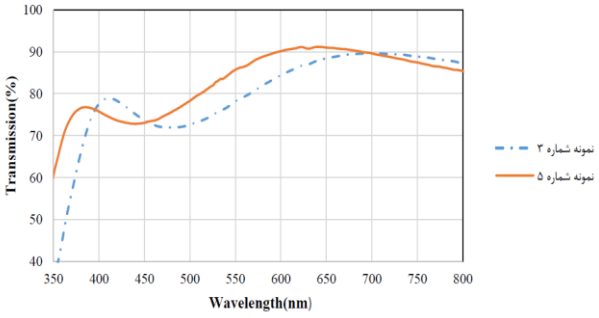
شماره نمونه	۳	۴	۵
دمای لایه‌نشانی(°C)	محیط	۱۰۰	۳۰۰
مقاومت الکتریکی (Ω/□)	۴۶	۳۷	۲۵
زبری سطح (nm)	۱/۷	۱/۵	۱/۰۲

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دما حین لایه‌نشانی، مقاومت الکتریکی و زبری سطح نمونه‌ها کاهش می‌یابد.



شکل ۴: تغییرات مقاومت الکتریکی با افزایش دما حین لایه‌نشانی

طیف تراگسیل نمونه‌های شماره ۳ و ۵ در شکل۵ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل۵: طیف تراگسیل نمونه‌های شماره ۳ و ۵

اگر عمل لایه‌نشانی در دماهای پایین صورت گیرد تحرک اتم‌ها کم بوده و ناهمواری‌های سطح افزایش می‌یابد. این امر باعث پراکندگی نور و کاهش تراگسیل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دما حین لایه‌نشانی، طیف عبوری در ناحیه مرئی افزایش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه نقش دما و آهنگ لایه‌نشانی حین فرآیند لایه‌نشانی بر روی خواص فیزیکی و اپتیکی لایه‌نازک رسانای شفاف ITO مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش آهنگ لایه‌نشانی، اتم‌ها فرصت بیشتری جهت قرارگیری بر بستره دارند و لایه‌نازک با ذرات منظم‌تری تشکیل می‌شود در نتیجه شاهد سطح صاف‌تر با زبری سطح کمتری می‌باشیم. فرآیند بازپخت در دو محیط خلأ و هوا نشان می‌دهد که مقاومت الکتریکی نمونه‌ها بطور محسوسی تغییر یافته است. با افزایش دما حین لایه‌نشانی، مقاومت الکتریکی و زبری سطح نمونه‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش بدلیل افزایش تحرک اتم‌ها حین لایه‌نشانی و کاهش ناهمواریهای سطح می‌باشد که در نهایت منجر به افزایش تراگسیل و کاهش در مقاومت الکتریکی و زبری سطح نمونه‌ها می‌شود.

مراجع

[1] J. H. Shin, S. H. Shin, and J. I. Park;"*Properties of DC Magnetron sputtered indium tin oxide films on polymeric substrates at temperature*" Journal Of Applied Physics, volume 89, number 9, 5199-5203.

[2] F.L. Wong, M.K. Fung, S.W. Tong, "*Flexible organic light-emitting device based on magnetron sputtered*," Thin Solid Films, vol. 466, p. 225– 230, 2004.

[3] A. L. Dawar, J. C. Joshi, "*Semiconducting transparent thin films;their properties and applications*," Materials Science, vol. 19, pp. 1-23, 1984.

[4] M. Kojima, F. Takahashi, K. Kinoshita, T. Nishibe, *"Transparent furnace made of heat mirror*," Thin Solid Films, vol. 392, pp. 349-354, 2001.

[5] K. L. Chopra, "*Thin-film solar cells*," Prog Photovolt, vol. 12, pp. 69-92, 2004.

[6] F.O. Adurodija, "*Effect of Sn doping on the electronic transport mechanism* " Applied Physics, vol. 88, p. 4175, 2000.

[7] C. Guille´n, J. Herrero, "*Influence of oxygen in the deposition and annealing atmosphere on*," Vacuum, vol. **80**, pp. 615-620, 2006.

[8] Yoon-Heung Tak, "*Criteria for ITO (indium–tin-oxide) thin film as the bottom electrode of an organic light emitting diode*," Thin Solid Films, vol. 411, pp. 12-16, 2002.

[9] Shiuh-Chuan Her and Chun-Fu Chang, "*Effect of Sputtering Power on Optical and Electrical Properties of Indium Tin Oxide Films*," Sensors and Materials, vol. 28, pp. 975-981, 2016.

[10] X.Juan, Y.YuJie , W.Fang ,and Z.Kailiang, "*Influence of substrate temperature on properties of indium tin oxide thin films prepared by DC magnetron sputtering*", ECS Transactions, vol. 44, p. 1311–1316, 2012.

[۱۱] مشبکی اصفهانی، آرزو، "تأثیر شار گاز آرگون بر زبری سطح لایه نازک نانومتری ITO"، هشتمین کنفرانس ملی خلأ ایران، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۶.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]