

## Investigation of physical properties of conductive, transparent RF sputtered ITO thin films as a function of thickness and post annealing Temperature

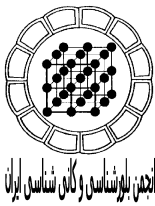
N. Manavizadeh<sup>1,2</sup>, M. H. Maleki<sup>3</sup>, A. Khodayari<sup>1,4</sup>, E. Asl-Soleimani<sup>1</sup>

- 1- Electrical and Computer Engineering Department, Thin films lab. Tehran University  
2- Electrical Engineering Department, K. N. Toosi University of Technology  
3- Nuclear Science and Technology Research Institute, Laser and Optics research school  
4- Mechanical engineering Department, K. N. Toosi University of Technology  
E-mail: manavizadeh@ee.kntu.ac.ir

(Received: 11/6/2007, in revised form: 10/9/2007)

**Abstract:** Thin films Indium tin oxide (ITO) with various thicknesses, from 130-620nm, have been deposited on the thin glass substrates by RF sputtering using ITO ceramic (90% wt. In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 10% wt. SnO<sub>2</sub>) target, and subsequently annealed in vacuum at various temperatures. Electrical and optical characteristics of ITO samples, before and after annealing at different temperatures, were investigated by four point probe and UV/VIS/IR spectrophotometer. Structural properties of layers deposited at optimum temperature of 400°C were analyzed by XRD. SEM analysis was used to investigate the morphology of the optimal surface layer. Results show that by increasing the thickness, crystalline structure varies, so that sheet resistance, resistivity and transparency of films vary. Layer deposited with 130nm (lower thickness) has 83.71% transmittance and  $2.34 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$  resistivity. In contrast, 620nm thickness film with 79.07% transparency has the lowest electrical resistivity about  $1 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$  at 400°C. This layer can be used as an optimal film with 1.6  $\Omega/\square$  sheet resistance for many applications.

**Keywords:** thin films, tin doped indium oxide, crystalline structure, annealing in vacuum, thickness variation, sputtering



## بررسی خواص فیزیکی لایه‌های نازک رسانا و شفاف اکسید ایندیم آلاینده به قلع بر حسب ضخامت و دمای بازپخت در خلأ

نگین معنوی زاده<sup>۱</sup>، محمد هادی ملکی<sup>۳</sup>، علیرضا خدایاری<sup>۴</sup>، ابراهیم اصل سلیمانی<sup>۱</sup>

۱- آزمایشگاه تحقیقاتی لایه‌های نازک، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

۲- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده لیزر و اپتیک

۴- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

پست الکترونیکی: [manavizadeh@ee.kntu.ac.ir](mailto:manavizadeh@ee.kntu.ac.ir)

(دریافت مقاله ۱۳۸۶/۳/۲۱، نسخه نهایی ۱۳۸۶/۶/۱۹)

**چکیده:** لایه‌های نازک اکسید ایندیم آلاینده به قلع (ITO) با ضخامت‌های مختلف ۶۲۰-۱۳۰ nm بر زیرلایه‌های شیشه نازک به شیوه کندوپاش RF و با استفاده از هدف سرامیکی ITO (۹۰ wt. % In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و ۱۰ wt. % SnO<sub>2</sub>) لایه نشانی و سپس در محیط خلأ گرمادهی شدند. سرشتیهای الکتریکی و اپتیکی نمونه‌های ITO، پیش و پس از گرمادهی در دماهای مختلف به وسیله یک سیستم اندازه‌گیری مقاومت چارسوزنی و طیف سنج UV/VIS/IR بررسی و مقایسه شدند. ساختار بلوری لایه‌های گرمادهی شده در دمای بهینه ۴۰۰°C با آنالیز پراش پرتو ایکس XRD مورد مطالعه قرار گرفت. از آنالیز SEM نیز برای بررسی ساختار سطحی لایه بهینه بهره گرفته شد. بررسی نتایج حاصل از آنالیزها نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه‌ها و تغییر ساختار بلوری، سرشتیهای الکتریکی و اپتیکی ماده، نظیر مقاومت سطحی، مقاومت ویژه، و شفافیت لایه‌ها تغییر می‌کند، به طوری که لایه ۱۳۰ nm با ضخامت کمتر در دمای ۴۰۰°C دارای شفافیت ۸۳/۷۱٪، و مقاومت ویژه  $2.34 \times 10^{-4} \Omega \text{mc}$  است. لایه ۶۲۰ nm با شفافیت ۷۹/۰۷٪، در ۴۰۰°C کمترین مقاومت ویژه  $1 \times 10^{-4} \Omega \text{mc} \approx$  را نشان می‌دهد که می‌توان آن را به عنوان لایه بهینه ضخیم با مقاومت سطحی  $1/6 \Omega/\square$  برای کاربردهای مختلف معرفی کرد.

**واژه‌های کلیدی:** لایه‌های نازک، اکسید ایندیم آلاینده به قلع، ساختار بلوری، گرمادهی در خلأ، تغییر ضخامت، کندوپاش.

### مقدمه

مرکز یک سه وجهی واپیچیده با اکسیژن هشت وجهی (b site) و بقیه ۲۴ یون In<sup>3+</sup> در مرکز یک هشت وجهی واپیچیده تر (d site) جای گرفته‌اند. اکسید ایندیم آلاینده به قلع بر پایه آرایش اکسید ایندیم با اتمهای ناخالصی قلع که جایگزین اتمهای In<sup>3+</sup> در ساختار مکعبی بی‌کس‌بایت اکسید ایندیم می‌شوند، شکل می‌گیرد. در این ساختار، اتمهای قلع ترجیح می‌دهند که مکانهای b site شبکه را که کمتر واپیچیده شده است، اشغال کنند [۲، ۳].

لایه‌های نازک اکسید ایندیم آلاینده به قلع (ITO) دارای ساختار بلوری مکعبی بی‌کس‌بایت (Bixbyite) با ثابت شبکه ۱۰۱۱۸ Å هستند. چنین ساختاری از نوع ساختار C-type، خانواده اکسیدهای نادر خاکی و از گروه فضایی  $T_h^7 (Ia3)$  است [۱]. یاخته یک قرار دادی در این ساختار، ۱۶ واحد فرمولی In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> است به طوری که هر یاخته دارای ۸۰ اتم است. در این ساختار چنانکه که در شکل ۱ دیده می‌شود، کاتیونهای ایندیم در دو سطح ناهم‌تراز، به صورت هشت یون In<sup>3+</sup>

شیوه کاندوپاش از نوع RF، DC، و مگنترونی را نام برد، و از روشهای شیمیایی می‌توان به لایه نشانی با بخار شیمیایی با پلاسمای افزایش یافته (PECVD) و واکنش گرمایی همراه با افشاندن (Spray Pyrolysis) اشاره کرد. لایه نشانی‌های مربوط به آزمایشهای این مقاله با سیستم کاندوپاش RF انجام گرفته است. این روش در مقایسه با روشهای دیگر لایه نشانی نسبتاً کم هزینه بوده و کاردردهای گسترده‌تری دارد. همچنین در این روش آهنگ لایه نشانی بالا بوده و کنترل نسبی عنصر سنجی عناصر موجود در لایه امکان پذیر است. از دیگر مزایای این شیوه دستیابی به لایه‌های یکنواختی است که چسبندگی مناسبی با سطح زیرلایه دارند.

در این مقاله به بررسی تأثیر ضخامت و بازپخت در محیط خلأ بر خواص اپتیکی، الکتریکی، و بلوری این لایه‌ها پرداخته شده است. در این آزمایشها، لایه‌های ITO به روش کاندوپاش RF روی زیرلایه‌های شیشه نازک لایه نشانی شده و سپس در دمای ۳۰۰ و ۴۰۰°C در محیط خلأ پخت شده‌اند.

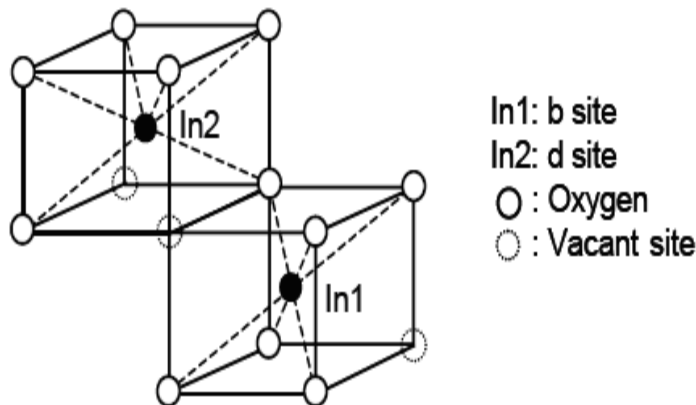
#### روشهای تجربی

در این مقاله، از زیرلایه‌های شیشه‌های نازک (Corning) به ضخامت تقریبی ۱۵۰ میکرومتر برای لایه نشانی استفاده شده است. پیش از لایه نشانی، زیرلایه‌ها به شیوه RCA (آب DI، آمونیاک، و پراکسید هیدروژن به نسبت ۵:۱:۱) تمیز شدند. از سیستم کاندوپاش RF و هدف سرامیکی ( $\text{In}_2\text{O}_3$  ۹۰wt.% و  $\text{SnO}_2$  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 می‌شود. لایه نشانی لایه‌های ITO در حضور

این لایه‌های نازک، به دلیل داشتن شفافیت نوری مناسب در ناحیه مرئی ( $>80\%$ ) و مقاومت الکتریکی بسیار پایین ( $\sim 10^{-4} \Omega\text{cm}$ )، همزمان، در ساخت انواع صفحه‌های نمایشگرهای تخت [۴، ۵] و افزاره‌های فتوولتایی [۶] مورد استفاده گسترده‌ای دارند. از دیگر کاربردهای این ماده می‌توان به محافظت کننده‌های امواج الکترومغناطیسی، گرم کننده شیشه اتومبیل و هواپیما [۷]، احساسگر گازی [۸]، افزاره‌های الکتروکرومیک [۹] و ... اشاره کرد. این ماده علاوه بر دارا بودن خواص منحصر به فرد یاد شده، بازتابنده امواج فرسرخ است و نیز از سختی مناسبی برخوردار است و چسبندگی خوبی به انواع زیرلایه‌ها دارد [۱۰].

خواص لایه‌های نازک ITO به شدت متأثر از شرایط لایه نشانی؛ نظیر دمای زیرلایه، فشار جزئی اکسیژن، فشار کل محفظه، فاصله بین هدف، و زیرلایه و نوع زیرلایه است. در بسیاری از مقالات، رابطه بین این پارامترها گزارش شده‌اند. همچنین بسیاری از پژوهشگران تأثیر ضخامت را بر خواص ITO مطالعه کرده‌اند؛ برای مثال خواص لایه‌های ITO که با ضخامت ۴۰-۸۷۰nm با لیزر تپی (PLD) لایه نشانی شده بود، در [۱۱] گزارش شده است. همچنین تأثیر ضخامت لایه بر خواص فیزیکی لایه‌های ITO که به شیوه کاندوپاش DC در دمای پایین زیرلایه (۸۰°C)، لایه نشانی شده بودند نیز در [۱۲] گزارش شده است.

روشهای بسیاری برای لایه نشانی لایه‌های نازک ITO متداول است، به طور کلی می‌توان شیوه‌های لایه نشانی این ماده را به دو دسته؛ شیوه‌های فیزیکی (PVD) و شیوه‌های شیمیایی (CVD) رده‌بندی کرد. از روشهای فیزیکی می‌توان تبخیر گرمایی، تبخیر با باریکه الکترونی، تبخیر با لیزر تپی، و



شکل ۱ دو مکان ناهم‌تراز ایندیم در کریستال  $\text{In}_2\text{O}_3$  [۱۶].

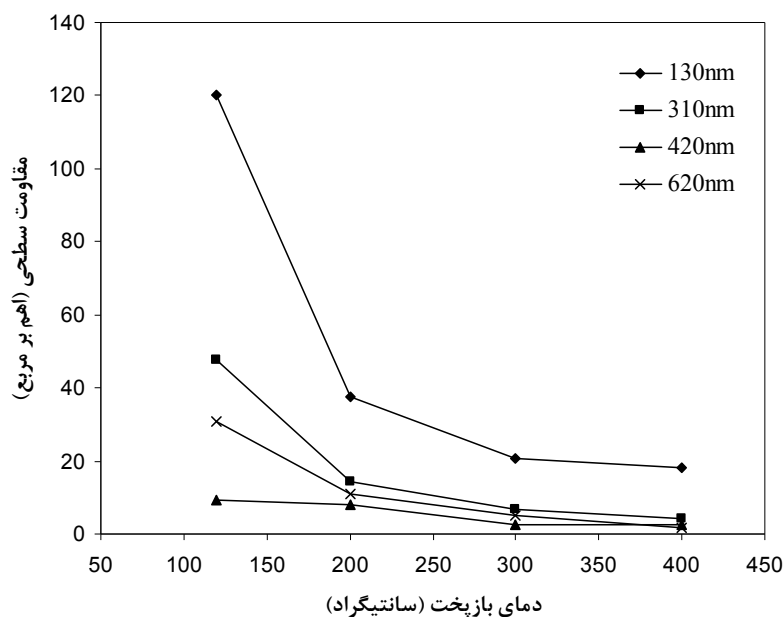
مقاومت سطحی آنها کاهش می‌یابد و این کاهش مقاومت سطحی در لایه‌هایی که در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  گرمادهی شده‌اند، بیشتر است. همچنین این روند کاهش برای لایه با ضخامت  $620\text{nm}$  بیشتر است. مقادیر مقاومت سطحی این لایه‌ها بر حسب ضخامت‌های مختلف و گرمادهی در دماهای  $300^{\circ}\text{C}$  و  $400^{\circ}\text{C}$  در محیط عاری از اکسیژن، در جدول ۱ خلاصه شده‌اند. مقاومت ویژه هر یک از این لایه‌ها نیز محاسبه شده و در جدول ۱ آمده است.

با توجه به مقادیر به دست آمده در جدول ۱، با افزایش دمای بازپخت در خلأ، مقاومت ویژه لایه‌ها نیز کاهش یافته است. به طور کلی ساز و کار هدایت در لایه‌های نازک ITO با دو عامل صورت می‌گیرد: (۱) جایگیری اتم‌های چهار ظرفیتی ناخالصی قلع به جای اتم‌های ایندیم در ساختار شبکه  $\text{In}_2\text{O}_3$ ، و (۲) وجود تهی‌جا‌های اکسیژن. هنگامیکه لایه‌ها در محیط خلأ - محیطی که دارای کمبود اکسیژن است - پخت می‌شوند، به دلیل واکنش بین اکسیژن آزاد موجود در هوا و لایه‌های نازک ITO، غلظت الکترون‌های آزاد بیشتر می‌شود. تعدادی از اتم‌های اکسیژن نیز که روی سطح جذب شده بودند، آزاد شده و غلظت حاملها افزایش می‌یابد. در نتیجه مقاومت ویژه لایه‌های نازک ITO کاهش می‌یابد [۱۳].

پلاسمای آرگن با (خلوص  $99.999\%$ )، توان  $280\text{W}$  و ضخامت‌های مختلف  $130$ ،  $310$ ،  $420$ ،  $620\text{nm}$ ، تغییر زمان لایه نشانی از  $20$  دقیقه تا  $100$  دقیقه، با آهنگ ثابت لایه نشانی  $64\text{\AA}/\text{min}$ ، به دست آمد. ضخامت این لایه‌ها با دستگاه  $\alpha\text{-step}$  (Dektak500) اندازه‌گیری شد. پخت لایه نیز در دمای  $300^{\circ}\text{C}$  و  $400^{\circ}\text{C}$  در محیط خلأ پس از انجام لایه نشانی به مدت  $2\text{h}$  صورت گرفت. به منظور اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی لایه‌ها از سیستم چهار گمانه‌ای، و نیز برای بررسی خواص اپتیکی آنها از آنالیز طیف سنجی UV/VIS/IR (Varian Cary 500) پیش و پس از گرمادهی در خلأ استفاده شد، و خواص بلوری این لایه‌ها از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD (Philips) در دمای بهینه  $400^{\circ}\text{C}$  مورد بررسی قرار گرفت. از آنالیز SEM نیز برای بررسی ساختار سطحی نمونه‌ها استفاده شده است.

#### بررسی خواص الکتریکی لایه‌های ITO

چنانکه گفته شد، مقاومت سطحی نمونه‌ها پیش و پس از گرمادهی به وسیله سیستم چهار گمانه‌ای اندازه‌گیری شده است. در شکل ۲ منحنی تغییرات مقاومت سطحی لایه‌های ITO لایه‌هایی با ضخامت‌های متفاوت بر حسب دمای بازپخت در خلأ مشاهده می‌شود. با توجه به این نمودار، بدون در نظر گرفتن ضخامت لایه‌ها، با افزایش دمای باز پخت در خلأ،



شکل ۲ نمودار تغییر مقاومت سطحی بر حسب دمای بازپخت در خلأ برای ضخامت‌های مختلف.

جدول ۱ سرشتیهای الکتریکی و اپتیکی لایه‌های ITO بر حسب ضخامت و دمای گرمادهی.

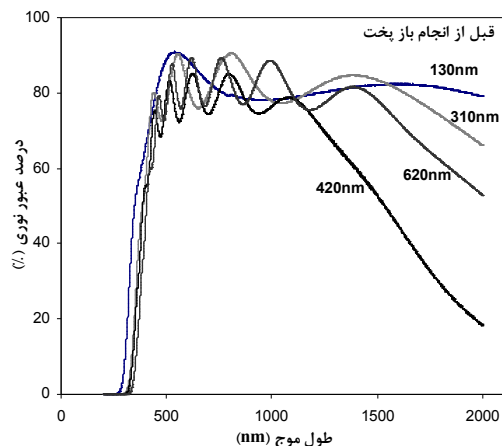
ضخامت لایه (nm)	دمای بازپخت (°C)	R(Ω/□)	$\rho \times 10^{-4}$ (Ωcm)	T <sub>vis</sub> (400-800nm) (%)	T <sub>ir</sub> (800-2000nm) (%)
۱۳۰	قبل از باز پخت	۱۲۰٫۱	۸۵٫۱۵	۸۳٫۸۱	۸۰٫۴۱
۳۱۰	قبل از باز پخت	۴۷٫۶۳	۱۴٫۷۶	۸۰٫۸۵	۷۹٫۴۵
۴۲۰	قبل از باز پخت	۹٫۴۵	۳٫۹۶	۷۶٫۵۹	۵۵٫۶۳
۶۲۰	قبل از باز پخت	۳۰٫۷۵	۱۹٫۰۶	۷۹٫۲۴	۷۳٫۹۱
۱۳۰	۳۰۰	۲۰٫۴۶	۲٫۶۵	۸۲٫۳۷	۷۷٫۳۶
۳۱۰	۳۰۰	۶٫۹	۲٫۱	۸۱٫۵۴	۵۶٫۱۵
۴۲۰	۳۰۰	۲٫۷۴	۱٫۱۵	۷۶٫۵	۴۵٫۹۳
۶۲۰	۳۰۰	۱۰٫۱۹	۶٫۳۱	۷۹٫۲۶	۵۱٫۷۲
۱۳۰	۴۰۰	۱۸	۲٫۳۴	۸۳٫۷۱	۸۰٫۲۷
۳۱۰	۴۰۰	۴٫۵۲	۱٫۴	۸۲٫۹۶	۴۴٫۳۹
۴۲۰	۴۰۰	۲٫۶	۱٫۰۹	۷۷٫۴۵	۴۷٫۹۱
۶۲۰	۴۰۰	۱٫۶	۰٫۹۹≈۱	۷۹٫۰۷	۳۷٫۳

### بررسی خواص اپتیکی لایه‌های ITO

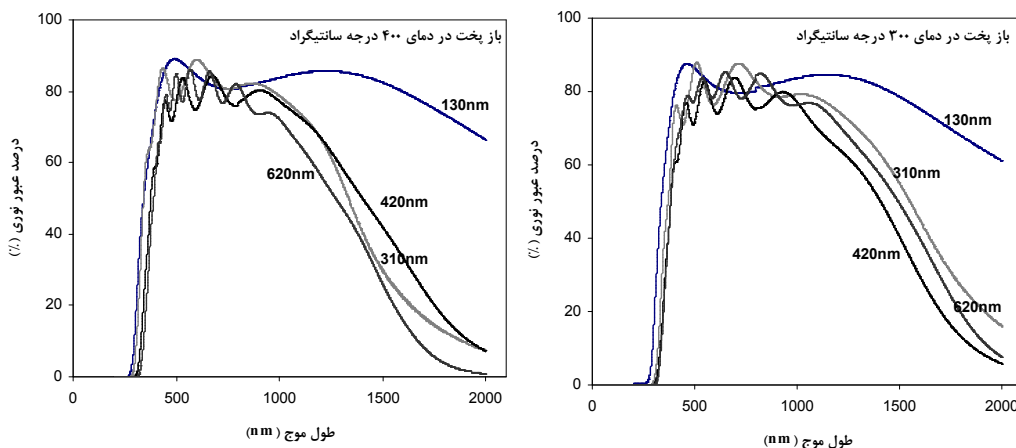
شکل ۳ طیف نور عبوری از لایه‌های ITO را که با ضخامتهای متفاوت روی شیشه لایه نشانی شده، پیش از بازپخت در خلأ، بر حسب طول موج نشان می‌دهد. آنچه مسلم است با افزایش ضخامت لایه‌ها از میزان شفافیت و نور عبوری از لایه‌ها کاسته می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از طیف نور عبوری از لایه‌های ITO برای ضخامتهای متفاوت و اطلاعات موجود در جدول ۱، مشاهده می‌شود که میانگین درصد نور عبوری با افزایش ضخامت لایه‌ها تا ۴۲۰nm کاهش و سپس تا ۶۲۰nm افزایش می‌یابد. درصد میانگین لایه‌ها بر حسب ضخامت و دماهای مختلف در بازه طول موجهای ۴۰۰-۸۰۰nm و ۸۰۰-۲۰۰۰nm در جدول ۱ مشاهده می‌شود. شکل ۴ نمودار درصد نور عبوری از لایه‌های با ضخامت مختلف را در دماهای

۳۰۰ و ۴۰۰ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد. در این مورد نیز لایه ۴۲۰nm رفتار متفاوتی را از خود نشان می‌دهد، به طوریکه میانگین درصد نور عبوری از لایه در دمای ۴۰۰°C اندکی بهبود می‌یابد. تغییر میزان شفافیت این لایه‌ها را می‌توان ناشی از تغییر ساختار بلوری لایه‌ها دانست که در اثر گرمادهی و پخت نمونه‌ها در محیط خلأ ایجاد می‌شود. در نتیجه تغییر ساختار بلوری این لایه‌ها، میزان پراکندگی نور از مرزخانه‌ها متفاوت خواهد بود [۱۳].

با توجه به نمودارهای ۳ و ۴، در طول موجهای بلند نزدیک به طیف فرورسرخ از شفافیت لایه‌ها کاسته شده و در مقابل لایه‌ها در این محدوده بازتابش دارند و این میزان افت عبور نور از لایه‌هایی که در دمای ۴۰۰°C در خلأ پخت شده‌اند، بیشتر است.



شکل ۳ نمودار درصد نور عبوری بر حسب ضخامتهای مختلف ITO پیش از گرمادهی.



شکل ۴ نمودار درصد نور عبوری بر حسب ضخامتهای مختلف ITO در دمای ۴۰۰°C و ۳۰۰°C.

$\text{In}_2\text{O}_3$  هستند. در این طیف قله‌ای که نشان دهنده Sn، SnO و  $\text{SnO}_2$  در ساختار بلوری باشد، وجود ندارد که نشان می‌دهد، اتمهای ناخالصی قلع جایگزین اتمهای ایندیم در شبکه  $\text{In}_2\text{O}_3$  شده است.

با توجه به جدول ۲، نسبت شدت قله متناظر با صفحه (۲۲۲) به قله متناظر با صفحه (۴۰۰) ( $I(222)/I(400)$ ) برای لایه‌های ۳۱۰، ۴۲۰ و ۶۲۰ nm بسیار نزدیک به مقدار استاندارد آن برای ITO در حالت پودری است [۱۴]، و نشان می‌دهد که در این لایه‌ها صفحات بلوری در راستای  $\langle 111 \rangle$  سمتگیری کرده‌اند.

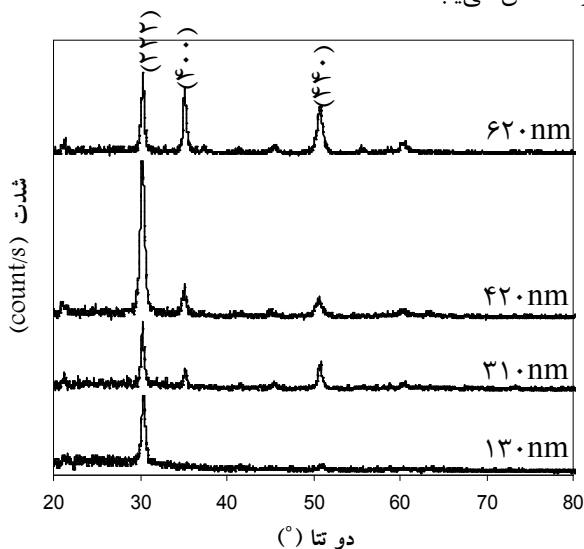
به منظور بررسی تأثیر ضخامت بر سرشتیهای ساختاری لایه‌های نازک ITO، ثابت شبکه (a) و اندازه دانه‌ها (D) با استفاده از طیف XRD محاسبه شد. ثابت شبکه با استفاده از رابطه (۱) قابل محاسبه است.

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (1)$$

### بررسی خواص بلوری لایه‌های ITO

از آنجا که لایه‌ها در دمای ۴۰۰°C مقاومت سطحی پایین و درصد عبوری مناسبی برخوردارند، به بررسی ساختار بلوری آنها در این دما پرداخته شد. طیف XRD مربوط به لایه‌های ITO که با ضخامتهای متفاوت روی زیرلایه‌های شیشه نازک، لایه نشانی شده و سپس در خلأ، و در دمای ۴۰۰°C گرمادهی شده‌اند، در شکل ۵ مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل، تمامی لایه‌های نازک ITO حتی لایه ۱۳۰ nm چند بلوری بوده و دارای راستای غالب [۲۲۲] هستند. چنانکه در شکل ۵ مشاهده می‌شود، لایه‌ای با ضخامت ۱۳۰ nm تنها دارای قله متناظر با صفحه (۲۲۲) است، با افزایش ضخامت به تدریج قله متناظر با صفحه (۴۰۰) ظاهر شده و در ضخامت ۶۲۰ nm شدت این قله به بیشینه می‌رسد. قله‌های مشاهده شده در این طیف، حاکی از آن است که لایه‌های پخت شده در دمای ۴۰۰°C دارای ساختار مکعبی بیکس بایت اکسید ایندیم

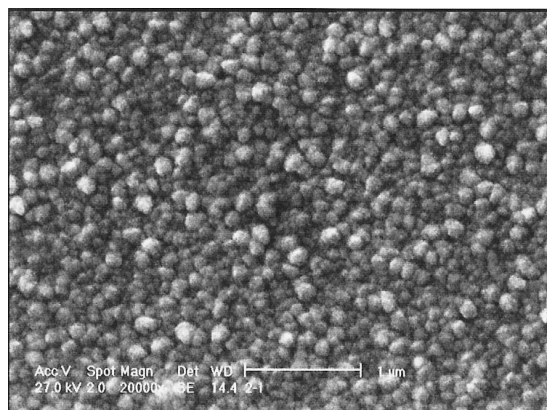
این لایه را به بزرگتر بودن دانه‌های آن نسبت داد. به این ترتیب، افزایش اندازه دانه، منجر به کاهش چگالی مرزانه‌ها شده و به دنبال آن تعداد حاملهای کمتری در این نواحی به دام می‌افتند. از اینرو تعداد حاملهای آزاد بیشتر شده و مقاومت ویژه کاهش می‌یابد.



شکل ۵ طیف XRD مربوط به لایه‌های ITO با ضخامت‌های مختلف و گرمادهی شده در دمای ۴۰۰°C.

جدول ۲ سرشتیهای ساختاری لایه‌های ITO با ضخامت‌های مختلف و گرمادهی شده در دمای ۴۰۰°C.

اندازه دانه (nm)	I(222)/I(400)	ثابت شبکه (Å)	d(222) (Å)	ضخامت لایه (nm)
-	۳,۳۳	۱۰,۱۱۸	۲,۹۲۱	Ref [14]
۱۳,۸	-	۱۰,۱۷۴	۲,۹۳۷	۱۳۰
۱۶,۳۵	۳,۰۷	۱۰,۲۲۹	۲,۹۵۳	۳۱۰
۱۸,۹۶	۴,۴۳	۱۰,۲۰۸	۲,۹۴۷	۴۲۰
۱۸,۷۷	۱,۰۴	۱۰,۲۰۱	۲,۹۴۵	۶۲۰



شکل ۶ تصویر SEM مربوط به لایه با ضخامت ۶۲۰ nm و گرمادهی شده در دمای ۴۰۰°C.

در این معادله d فاصله صفحات بلوری مجاور هم در راستای (hkl) است. برای لایه‌های ITO مورد بررسی در این مقاله، رابطه (۱) برای صفحات متناظر با صفحه (۲۲۲) به دلیل اینکه دارای شدت بیشتری است، بکار گرفته شده است.

مقادیر ثابت شبکه به دست آمده در جدول ۲، به  $10.118 \text{ \AA}$  (ثابت شبکه اکسید ایندیم توده‌ای)، نزدیک است. با افزایش ضخامت لایه تا  $310 \text{ nm}$ ، ثابت شبکه افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. دلیل افزایش ثابت شبکه، جاگزینی اتمهای جایگزیده  $\text{Sn}^{4+}$  با شعاع یونی  $0.69 \text{ \AA}$  به جای اتمهای  $\text{In}^{3+}$  با شعاع یونی  $0.79 \text{ \AA}$  در شبکه است. نتایج حاصل از محاسبه ثابت شبکه در جدول ۲ بر حسب ضخامت لایه‌ها مشاهده می‌شود. همچنین با استفاده از FWHM قله‌های (۲۲۲) و رابطه دبی-شرر اندازه دانه‌ها نیز با رابطه زیر محاسبه شده است:

$$D = \frac{0.9\lambda}{B \cos \theta_B} \quad (2)$$

که  $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$  و B پهنای قله پراش یافته در زاویه  $2\theta$  در نصف شدت بیشینه و بر حسب رادیان است. اندازه دانه‌ها برای لایه‌های با ضخامت ۱۳۰، ۳۱۰، ۴۲۰ و ۶۲۰ nm به ترتیب ۱۳/۸، ۱۶/۳۵، ۱۸/۹۶ و ۱۸/۷۷ nm است. بزرگتر شدن دانه‌ها منجر به کاهش چگالی مرزانه‌ها شده، و در نتیجه خواص اپتیکی و الکتریکی آنها بهبود می‌یابد. با کاهش چگالی مرزانه‌ها، تعداد الکترونهای کمتری در مرزانه‌ها به دام افتاده، و در نتیجه مقاومت ویژه لایه کمتر شده و عبور نور نیز بهبود می‌یابد.

با استفاده از اطلاعات به دست آمده از آنالیز XRD که در جدول ۲ ملاحظه می‌شود، میزان واپیچیدگی ساختار با استفاده از رابطه  $(d-d_0)/d_0$  به دست می‌آید. میزان واپیچیدگی ساختار بلوری لایه‌های نازک ITO کمتر از مقداری است که پژوهشگران دیگر گزارش کرده‌اند [۱۵]. معمولاً میزان واپیچیدگی ساختار بلوری در راستای صفحات بلوری (۴۰۰) به مراتب کمتر از راستای بلوری صفحات (۲۲۲) است. به طوریکه با استفاده از این اطلاعات میانگین میزان واپیچیدگی در راستای صفحات (۲۲۲) و (۴۰۰) به ترتیب ۱/۱ و ۰/۶ درصد است که با نتایج پژوهشگران دیگر سازگاری دارد.

در شکل ۶ تصویر SEM مربوط به لایه  $620 \text{ nm}$  که در دمای  $400^\circ\text{C}$  گرمادهی شده و بنابر اطلاعات به دست آمده دارای کمترین مقاومت، شفافیت نسبی، و دانه‌های بزرگتری است، مشاهده می‌شود. چنانکه که در این تصویر مشاهده می‌شود، ساختار لایه به شکل دانه‌ای بوده و اندازه دانه‌ها نیز تقریباً بزرگ است. به طوریکه می‌توان کم بودن مقاومت ویژه

برداشت

light emitting diode", Thin Solid Films 411 (2002) 12-16.

[6] Herrero J., Guillén C., "Transparent films on polymers for photovoltaic applications", Vacuum 67 (2002) 611-616.

[7] Kojima M., Takahashi F., Kinoshita K., Nishibe T., Ichidate M., "Transparent furnace made of heat mirror," Thin Solid Films 392 (2001) 349-354.

[8] Luff B. J., Wilkinson J. S., Perrone G., "Indium tin oxide over-layered waveguides for sensor applications," Appl. Optics 36 (1994) 7066-7072.

[9] Teixeira V., Cui H. N., Meng L. J., Fortunato E., Martins R., "Amorphous ITO thin films prepared by DC sputtering for electrochromic applications", Thin Solid Films 420/421 (2002) 70-75.

[10] Devi P. S., Chatterjee M., Ganguli D., "Indium tin oxide nano-particles through an emulsion technique," Materials Letters 55 (2002) 205-210.

[11] Kim H., Horwitz J. S., Kushto G., Piqué A., Kafafi Z. H., Gilmore C. M., Chrisey D. B., "Effect of film thickness on the properties of indium tin oxide thin films", J. Appl. Phys. 88 (2000) 6021.

[12] Guittoum A., Kerkache L., Layadi A., "Effect of thickness on the physical properties of ITO thin films", Eur. Phys. J. 7 (1999) 201-206.

[13] Manavizadeh N., Asl soleimani E., Afzalzadeh R., Maleki H., "Effects of Sputtering Power on Optical, Electrical, Structural and Surface Morphological Properties of Transparent ITO Thin Films", Accepted to ICEE (2007).

[14] Guillen C., Herrero J., "Polycrystalline growth and recrystallization processes in sputtered ITO thin films", Thin solid films 510 (2006) 260-264.

[15] Mergel D., Stass W., Ehl G., Barthel D., "Oxygen incorporation in thin films of  $In_2O_3:Sn$  prepared by radio frequency sputtering ", Appl. Phys. 88 (2000) 2437-2442.

[16] Manavizadeh N., Maleki H., "Effects of annealing on structural properties of sputtered Indium Tin Oxide (ITO) thin films", Proceedings of the 14<sup>th</sup> Symposium of Crystallography and mineralogy of Iran, University of Birjand, Iran (2007).

در این مقاله لایه‌های ITO با ضخامت‌های مختلف به شیوه کندوپاش RF و با استفاده از هدف سرامیکی ITO بر روی زیرلایه‌های شیشه نازک (Corning) لایه نشانی شدند. خواص این لایه‌ها با استفاده از آنالیزهای XRD، طیف سنج UV/VIS/IR، سیستم چهار گمانه‌ای، و SEM مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت لایه‌ها، میانگین درصد عبور نور از لایه‌ها کاهش می‌یابد و پخت لایه‌ها در دمای  $400^{\circ}C$  به مدت ۲ ساعت در کاهش مقاومت لایه‌ها تأثیر به‌سزایی دارد. بررسی نتایج حاصل از آنالیزهای انجام شده نشان داد که با افزایش ضخامت لایه‌ها، ساختار بلوری تغییر می‌کند، در نتیجه مقاومت سطحی، مقاومت ویژه، و شفافیت لایه‌ها نیز تغییر می‌کنند. به طوریکه لایه  $130\text{ nm}$  به دلیل داشتن ضخامت کمتر در دمای  $400^{\circ}C$  دارای شفافیت  $83.71\%$  و مقاومت ویژه  $2.34 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$  است. لایه  $620\text{ nm}$  (با داشتن ضخامت بیشتر) با شفافیت  $79.07\%$ ، کمترین مقاومت ویژه  $1 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$  را در دمای بهینه  $400^{\circ}C$  از خود نشان می‌دهد که می‌توان آن را به عنوان لایه بهینه ضخیم با مقاومت سطحی  $1/6 \Omega/\square$  برای کاربردهای مختلف معرفی کرد.

مراجع

- [1] Galasso F. S., "Structure and properties of inorganic solids", Oxford, New York, Toronto, Sydney, Branschweig, Pergamon Press. (1970) 90-102.
- [2] Nadaud N., Lequeux N., Nanot M., Jove J., Roisnel T., "Structural studies of tin-doped indium oxide (ITO) and  $In_4Sn_3O_{12}$ ", J. Solid State Chem. 135 (1998) 140-148.
- [3] Yamada N., Yasui I., Shigesato Y., Li Y., Ujihira Y., Nomura K., "Dopping Mechanisms of Sn in  $In_2O_3$  Powder Studied Using  $^{119}\text{Sn}$  Mossbauer Spectroscopy and X-Ray Diffraction", Jpn. J. Appl. Phys. 38(5A) (1999) 2856-2862.
- [4] Granqvist C. G., Hultaker A., "Transparent and conducting ITO films: new developments and applications", Thin Solid Films 411 (2002) 1-5.
- [5] Tak Y. H., Kim K. B., Park H. G., Lee K. H., Lee J. R., "Criteria for ITO (indium-tin-oxide) thin film as the bottom electrode of an organic