IRANIAN SOCIETY of CRYSTALLOGRAPHY and MINERALOGY

Vol. 16, No. 1, Spring 1387/2008

IRANIAN JOURNAL of CRYSTALLOGRAPHY and MINERALOGY

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

N. Manavizadeh[1,2], M. H. Maleki[3], A. Khodayari[1,4], E. Asl-Soleimani[1]

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_2O_3 and 10% wt. SnO_2) 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 $2.34\times10^{-4}\Omega$cm resistivity. In contrast, 620nm thickness film with 79.07% transparency has the lowest electrical resistivity about $1\times10^{-4}\Omega$cm at 400˚C. This layer can be used as an optimal film with 1.6 Ω/□ sheet resistance for many applications.

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

[Downloaded from ijcm.ir on 2024-03-29]

مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

سال شانزدهم، شمارهٔ ۱، بهار ۸۷، از صفحهٔ ۹۱ تا ۹۸

انجمن بلورشناسی و کانی شناسی ایران

بررسی خواص فیزیکی لایه‌های نازک رسانا و شفاف اکسید ایندیم آلاییده به قلع برحسب ضخامت و دمای بازپخت در خلأ

نگین معنوی زاده[۱و۲]، محمد هادی ملکی[۳]، علیرضا خدایاری[۱و۴]، ابراهیم اصل سلیمانی[۱]

۱- آزمایشگاه تحقیقاتی لایه‌های نازک، گروه مهندسی برق وکامپیوتر، 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

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

چکیده: لایه‌های نازک اکسید ایندیم آلاییده به قلع (ITO) با ضخامتهای مختلف ۱۳۰-۶۲۰nm بر زیرلایه‌های شیشه نازک به شیوه کندوپاش RF و با استفاده از هدف سرامیکی ITO (۹۰٪ wt. In_2O_3 و ۱۰٪ wt. SnO_2) 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 بهینهٔ ۴۰۰°C با آنالیز پراش پرتو ایکس XRD مورد مطالعه قرار گرفت. از آنالیز SEM نیز برای بررسی ساختار سطحی لایهٔ 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 طوریکه لایهٔ ۱۳۰ nm با ضخامت کمتر در دمای ۴۰۰°C، دارای شفافیت ۸۳٫۷۱٪، و مقاومت ویژهٔ $۱۰ \times ۲٫۳۴^{-۴}$ Ωmc است. لایهٔ ۶۲۰nm با شفافیت ۷۹٫۰۷٪، در ۴۰۰°C کمترین مقاومت ویژهٔ $۱ \times ۱۰^{-۴} \approx$ Ωmc را نشان می‌دهد که می‌توان آن را به عنوان لایه بهینهٔ ضخیم با مقاومت سطحی ۱٫۶ Ω/□ برای کاربردهای مختلف معرفی کرد.

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

مقدمه

لایه‌های نازک اکسید ایندیم آلاییده به قلع (ITO) دارای ساختار بلوری مکعبی بیکس‌بایت (Bixbyite) با ثابت شبکهٔ Å ۱۰٫۱۱۸ هستند. چنین ساختاری از نوع ساختار C-type، خانوادهٔ اکسیدهای نادر خاکی و از گروه فضایی $T_h^7\,(Ia3)$ است [۱]. یاختهٔ یکهٔ قراردادی در این ساختار، ۱۶ واحد فرمولی In_2O_3 است به طوریکه هر یاخته دارای ۸۰ اتم است. در این ساختار چنانکه که در شکل۱ دیده می‌شود، کاتیونهای ایندیم در دو سطح ناهم‌تراز، به صورت هشت یون In^{3+} در مرکز یک سه وجهی واپیچیده با اکسیژن هشت وجهی(b site) و بقیهٔ ۲۴ یون In^{3+} در مرکز یک هشت وجهی واپیچیده‌تر (d site) جای گرفته‌اند. اکسید ایندیم آلاییده به قلع بر پایهٔ آلایش اکسید ایندیم با اتمهای ناخالصی قلع که جایگزین اتمهای In^{3+} 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].

[Downloaded from ijcm.ir on 2024-03-29]

این لایه‌های نازک، به دلیل داشتن شفافیت نوری مناسب در ناحیهٔ مرئی (٪۸۰<) و مقاومت الکتریکی بسیار پایین ($\sim 10^{-4}\Omega cm$)، 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 کنندهٔ 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، بازتابندهٔ امواج فروسرخ است و نیز از سختی مناسبی برخوردار است و چسبندگی خوبی به انواع زیرلایه‌ها دارد [۱۰].

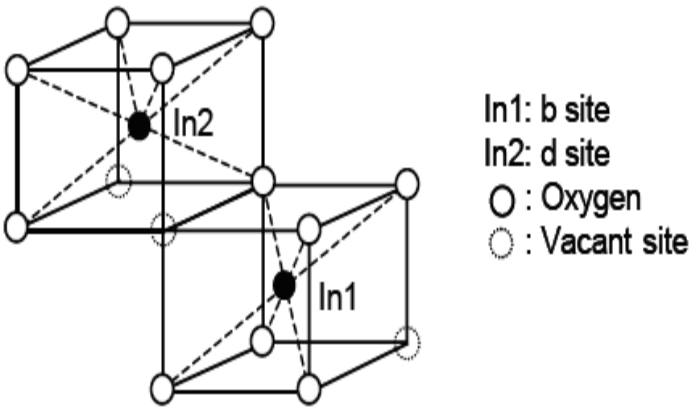
خواص لایه‌های نازک ITO به شدت متأثر از شرایط لایه نشانی؛ نظیر دمای زیرلایه، فشار جزئی اکسیژن، فشار کل محفظه، فاصلهٔ بین هدف، و زیرلایه و نوع زیرلایه است. در بسیاری از مقالات، رابطهٔ بین این پارامترها گزارش شده‌اند. همچنین بسیاری از پژوهشگران تأثیر ضخامت را بر خواص ITO مطالعه کرده‌اند؛ برای مثال خواص 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 شیوهٔ کندوپاش DC در دمای پایین زیرلایه ($80^{\circ}C$)، 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 باریکهٔ الکترونی، تبخیر با لیزر تپی، و شیوهٔ کندوپاش 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 کندوپاش RF انجام گرفته است. این روش در مقایسه با روشهای دیگر لایه نشانی نسبتاً کم هزینه بوده و کاربردهای 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 کندوپاش RF روی زیرلایه‌های شیشهٔ نازک لایه نشانی شده و سپس در دمای ۳۰۰ و $400^{\circ}C$ 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 شیوهٔ RCA (آب DI، آمونیاک، و پراکسید هیدروژن به نسبت ۱:۱:۵) تمیز شدند. از سیستم کندوپاش RF و هدف سرامیکی ITO (٪۹۰wt. In_2O_3 و ٪۱۰wt. SnO_2) برای لایه نشانی استفاده شده است. پس از رسیدن فشار محفظه به میزان 6×10^{-6}Torr و با کنترل آهنگ ورود گاز، فشار در حدود $2{,}6\times10^{-2}$Torr ثابت نگه داشته می‌شود. لایه نشانی لایه‌هایITO در حضور



شکل ۱ دو مکان ناهم‌تراز اتمهای ایندیم در کریستال In_2O_3 [۱۶].

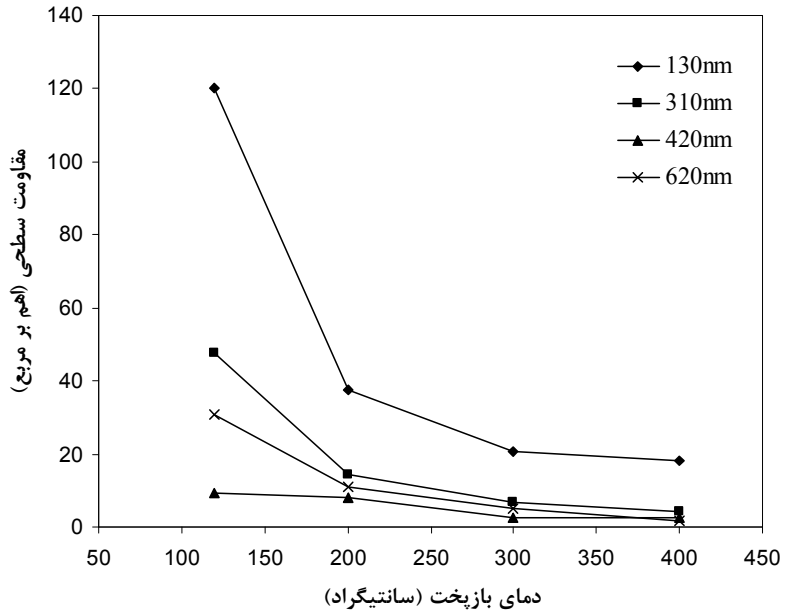
[Downloaded from ijcm.ir on 2024-03-29]

پلاسمای آرگن با (خلوص ۹۹٫۹۹۹٪)، توان ۲۸۰ وات ضخامتهای مختلف۱۳۰، ۳۱۰، ۴۲۰، ۶۲۰nm، تغییر زمان لایه نشانی از ۲۰ دقیقه تا ۱۰۰ دقیقه، با آهنگ ثابت لایه نشانی ۶۴Å/min، به دست آمد. ضخامت این لایه‌ها با دستگاه alpha-step(Dektak500) اندازه‌گیری شد. پخت لایه نیز در دمای ۳۰۰ و C° ۴۰۰ در محیط خلأ پس از انجام لایه نشانی به مدت ۲h 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 بهینهٔ C° ۴۰۰ 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 وسیلهٔ سیستم چهار گمانه‌ای اندازه گیری شده است. در شکل۲ 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، مقاومت سطحی آنها کاهش می‌یابد و این کاهش مقاومت سطحی در لایه‌هایی که در دمای C° ۴۰۰ گرمادهی شده‌اند، بیشتر است. همچنین این روند کاهش برای لایهٔ با ضخامت ۶۲۰nm بیشتر است. مقادیر مقاومت سطحی این لایه‌ها بر حسب ضخامتهای مختلف و گرمادهی در دماهای ۳۰۰ و C° ۴۰۰ در محیط عاری از اکسیژن، در جدول۱ خلاصه شده‌اند. مقاومت ویژهٔ هر یک از این لایه‌ها نیز محاسبه شده و در جدول۱ آمده است.

با توجه به مقادیر به دست آمده در جدول۱، با افزایش دمای بازپخت در خلأ، مقاومت ویژهٔ 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 شبکهٔ In_2O_3، و (۲) وجود تهی جاهای 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 ویژهٔ لایه‌های نازک ITO کاهش می‌یابند [۱۳].



شکل۲ نمودار تغییر مقاومت سطحی بر حسب دمای بازپخت در خلأ برای ضخامتهای مختلف.

[Downloaded from ijcm.ir on 2024-03-29]

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

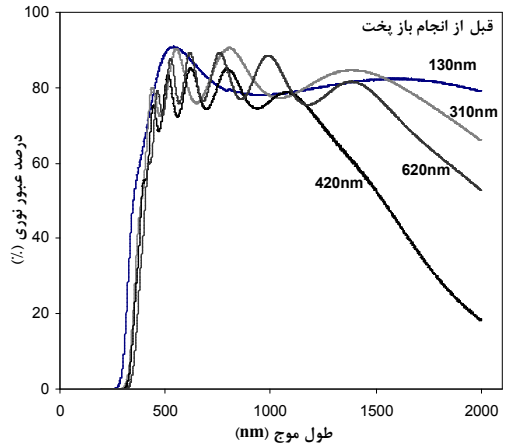
ضخامت لایه (nm)	دمای بازپخت (°C)	R(Ω/□)	ρ×10^{-4} (Ωcm)	T_{vis} (400-800nm) (%)	T_{ir} (800-2000nm) (%)
۱۳۰	قبل از باز پخت	۱۲۰/۱	۸۵/۱۵	۸۳/۸۱	۸۰/۴۱
۳۱۰	قبل از باز پخت	۴۷/۶۳	۱۴/۷۶	۸۰/۸۵	۷۹/۴۵
۴۲۰	قبل از باز پخت	۹/۴۵	۳/۹۶	۷۶/۵۹	۵۵/۶۳
۶۲۰	قبل از باز پخت	۳۰/۷۵	۱۹/۰۶	۷۹/۲۴	۷۳/۹۱
۱۳۰	۳۰۰	۲۰/۴۶	۲/۶۵	۸۲/۳۷	۷۷/۳۶
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

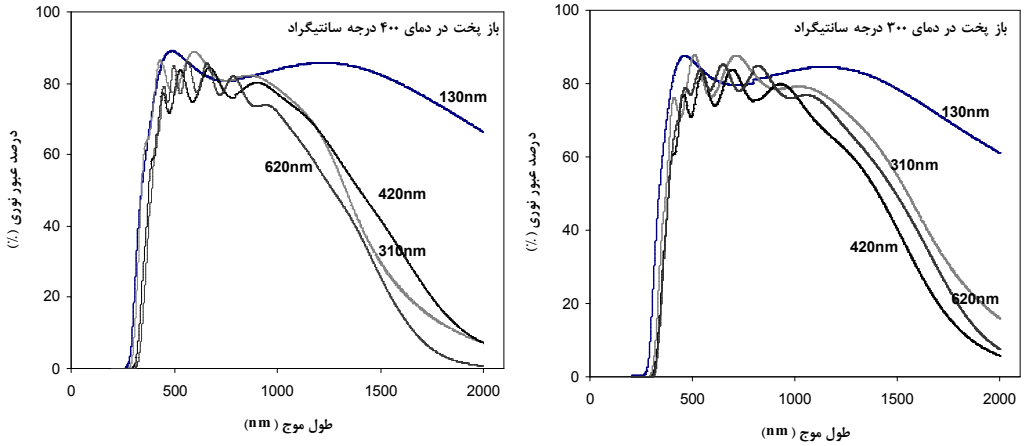
شکل۳ طیف نور عبوری از لایه‌های ITO را که با ضخامتهای متفاوت روی شیشه لایه نشانی شده، پیش از بازپخت در خلأ، بر حسب طول موج نشان می‌دهد. آنچه مسلم است با افزایش ضخامت لایه‌ها از میزان شفافیت و نور عبوری از لایه‌ها کاسته می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از طیف نور عبوری از لایه-های‌ITO برای ضخامتهای متفاوت و اطلاعات موجود در جدول۱، 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 بازهٔ طول موجهای ۴۰۰-۸۰۰nm و ۸۰۰-۲۰۰۰nm در جدول۱ مشاهده می‌شود. شکل۴ نمودار درصد نور عبوری از لایه‌های با ضخامت مختلف را در دماهای ۳۰۰ و ۴۰۰ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد. در این مورد نیز لایهٔ 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 نتیجهٔ تغییر ساختار بلوری این لایه‌ها، میزان پراکندگی نور از مرزدانه‌ها متفاوت خواهد بود [۱۳].

با توجه به نمودارهای ۳ و ۴، در طول موجهای بلند نزدیک به طیف فروسرخ 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.

[Downloaded from ijcm.ir on 2024-03-29]



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



شکل۴ نمودار درصد نور عبوری بر حسب ضخامتهای مختلف ITO در دمای ۳۰۰°C و ۴۰۰°C.

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 شیشهٔ نازک، لایه نشانی شده و سپس در خلأ، و در دمای ۴۰۰°C گرمادهی شده‌اند، در شکل۵ مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل، تمامی لایه‌های نازک ITO حتی لایهٔ ۱۳۰ nm چند بلوری بوده و دارای راستای غالب [۲۲۲] هستند. چنانکه در شکل ۵ مشاهده می‌شود، لایه‌ای با ضخامت ۱۳۰nm تنها دارای قلهٔ متناظر با صفحهٔ (۲۲۲) است، با افزایش ضخامت به تدریج قلهٔ 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 (In_2O_3) هستند. در این طیف قله‌ای که نشان دهندهٔ Sn، SnO، و SnO_2 در ساختار بلوری باشد، وجود ندارد که نشان می‌دهد، اتمهای ناخالصی قلع جایگزین اتمهای ایندیم در شبکهٔ In_2O_3 شده است.

با توجه به جدول ۲، نسبت شدت قلهٔ متناظر با صفحه (۲۲۲) به قلهٔ 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 <۱۱۱> سمتگیری کرده‌اند.

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

$$\frac{1}{d^2}=\frac{h^2+k^2+l^2}{a^2} \qquad (۱)$$

[Downloaded from ijcm.ir on 2024-03-29]

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

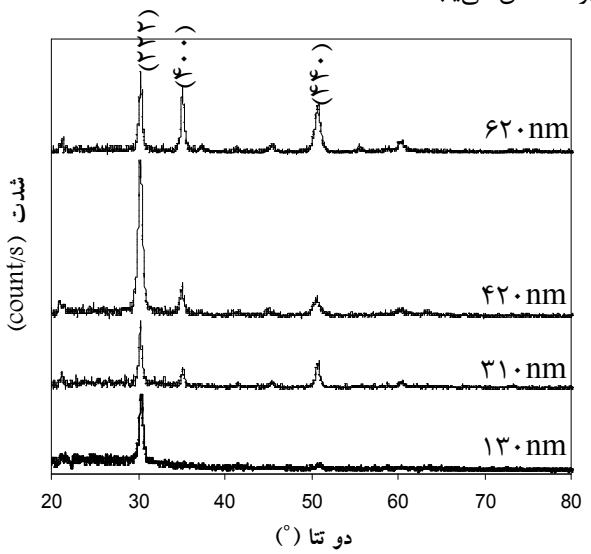
مقادیر ثابت شبکهٔ به دست آمده در جدول۲، به ۱۰٫۱۱۸ Å (ثابت شبکه اکسید ایندیم توده‌ای)، نزدیک است. با افزایش ضخامت لایه تا ۳۱۰nm، ثابت شبکه افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. دلیل افزایش ثابت شبکه، جاگزینی اتمهای جایگزیده Sn^{4+} با شعاع یونی ۰٫۶۹ Å به جای اتمهای In^{3+} با شعاع یونی ۰٫۷۹ Å در شبکه است. نتایج حاصل از محاسبهٔ ثابت شبکه در جدول۲ بر حسب ضخامت لایه‌ها مشاهده می‌شود. همچنین با استفاده از FWHM قله‌های (۲۲۲) و رابطهٔ دبی- شرر اندازه دانه‌ها نیز با رابطهٔ زیر محاسبه شده است:

$$D = \frac{0.9\lambda}{B\cos\theta_B} \qquad (۲)$$

که λ=۱٫۵۴Å و B پهنای قلهٔ پراش یافته در زاویه 2θ در نصف شدت بیشینه و بر حسب رادیان است. اندازهٔ دانه‌ها برای لایه-های به ضخامت ۱۳۰، ۳۱۰، ۴۲۰ و ۶۲۰nm به ترتیب ۱۳٫۸، ۱۶٫۳۵، ۱۸٫۹۶ و ۱۸٫۷۷ nm است. بزرگتر شدن دانه‌ها منجر به کاهش چگالی مرزدانه‌ها شده، و در نتیجه خواص اپتیکی و الکتریکی آنها بهبود می‌یابد. با کاهش چگالی مرزدانه‌ها، تعداد الکترونهای کمتری در مرزدانه‌ها به دام افتاده، و در نتیجه مقاومت ویژهٔ لایه کمتر شده و عبور نور نیز بهبود می‌یابد.

با استفاده از اطلاعات به دست آمده از آنالیز XRD که در جدول۲ 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.

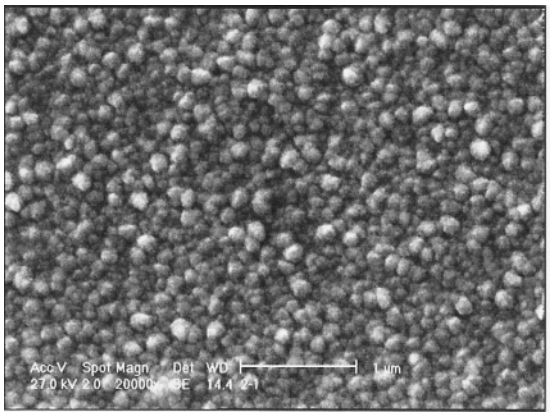
در شکل ۶ تصویر SEM مربوط به لایهٔ ۶۲۰ nm که در دمای ۴۰۰°C گرمادهی شده و بنابر اطلاعات به دست آمده دارای کمترین مقاومت، شفافیت نسبی، و دانه‌های بزرگتری است، مشاهده می‌شود. چنانکه که در این تصویر مشاهده می-شود، ساختار لایه به شکل دانه‌ای بوده و اندازهٔ دانه‌ها نیز تقریباً بزرگ است. به طوریکه می‌توان کم بودن مقاومت ویژه این لایه را به بزرگتر بودن دانه‌های آن نسبت داد. به این ترتیب، افزایش اندازهٔ دانه، منجر به کاهش چگالی مرزدانه‌ها 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.

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



شکل۶ تصویر SEM مربوط به لایه با ضخامت۶۲۰ nm و گرمادهی شده در دمای ۴۰۰°C.

[Downloaded from ijcm.ir on 2024-03-29]

برداشت

در این مقاله لایه‌های ITO با ضخامتهای مختلف به شیوهٔ کندوپاش RF و با استفاده از هدف سرامیکی ITO بر روی زیرلایه‌های شیشهٔ 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 ۴۰۰ °C به مدت ۲ ساعت در کاهش مقاومت لایه‌ها تأثیر به سزایی 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 لایهٔ ۱۳۰ nm به دلیل داشتن ضخامت کمتر در دمای ۴۰۰°C دارای شفافیت ۸۳٫۷۱٪ و مقاومت ویژهٔ $2{,}34\times10^{-4}$ Ωmc است. لایهٔ ۶۲۰nm (با داشتن ضخامت بیشتر) با شفافیت ۷۹٫۰۷٪، کمترین مقاومت ویژه 1×10^{-4} Ωcm ≈ را در دمای بهینه ۴۰۰°C از خود نشان می‌دهد که می‌توان آن را به عنوان لایهٔ بهینه ضخیم با مقاومت سطحی ۱٫۶ Ω/□ برای کاربردهای مختلف معرفی کرد.

مراجع

[1] Galasso F. S., *"Structure and properties of inorganic solids"*, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Branschweing, 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}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 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., Perrore 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 14th Symposium of Crystallography and mineralogy of Iran, University of Birjand, Iran (2007).

[Downloaded from ijcm.ir on 2024-03-29]