بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

طراحی و لایه‌نشانی نانوساختار رسانای شفاف ITO بر بستره اکریلیک به روش کندوپاش DC و بررسی ویژگی‌های ساختاری و اپتیکی آن

علیرضا فیروزی‌فر، حسین زابلیان، محمود ورپایی، مهدی مردیها، محمد جان‌نثاری، جواد شاه‌محمدی

گروه پژوهشی لایه‌های نازک، صنایع اپتیک اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده –در این پژوهش بهینه‌سازی فرایند سونش سطح بستره با پلاسمای فرکانس رادیویی و سپس لایه‌نشانی ماده *ITO* به روش کندوپاش جریان مستقیم بر روی بستره اکریلیک به گونه‌ای انجام شد که علاوه بر دستیابی به چسبندگی مناسب لایه به بستره، مقاومت الکتریکی و عبور اپتیکی نمونه به ترتیب کمینه و بیشینه باشند. همچنین خواص اپتیکی و ریخت‌شناسی سطح بستره‌ها مورد بررسی قرار گرفت و شرایط بهینه جهت انجام هر دو فرایند سونش با پلاسما و نیز لایه‌نشانی *ITO* بر بستره اکریلیک بدست آمد.

کلید واژه- لایه نازک، ITO، بستره پلیمری، خواص الکترواپتیکی.

Design And Fabrication of ITO Nanostructure Thin Film on Acrylic Substrate by DC Magnetron Sputtering and Evaluation of Its Optical and structural Properties

A.R. Firoozifar, H. Zabolian, M. Varpaei, M. Mardiha, M. Jannesari and J.Shahmohammadi

Thin film research group, Isfahan Optic Industry, Isfahan, Iran

Abstract- In this research, we have optimized the condition of RF plasma etching and ITO thin film by DC magnetron sputtering system on acrylic substrates. We want to reach the best adhesion of thin film to the substrate, the maximum optical transmittance of samples in the visible range and the minimum electrical resistant of ITO thin film. The morphology of substrate and thin film were investigated and optimum condition for plasma etching and ITO coating were reached.

Keywords: Thin film, ITO, Polymer substrate, Electro-Optical properties.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

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

۱- مقدمه

ITO نیمه‌رسانای نوع n است که اتم‌های قلع به عنوان آلاینده کاتیونی در شبکه In_2O_3 وارد می‌شوند. یون‌های Sn^{4+} در مکان‌های In^{3+} جایگزین می‌شوند و یک الکترون اضافی برای رسانش فراهم می‌کنند. بستره‌های لایه‌نشانی شده با این ماده جهت کاربردهای گوناگون همچون ساخت سلول‌های خورشیدی، شیشه‌های هوشمند، شیشه‌های ضد یخ و نیز شیشه‌های سپر الکترومغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. لایه‌نشانی این ماده بر روی شیشه آلی نیازمند دمای بالا و نیز فرایند بازپخت می‌باشد که موجب استحکام بالای لایه و نیز چسبندگی بسیار خوب لایه به بستره می‌گردد[۱]. بستره‌های پلیمری به دلیل حساسیت بسیار زیاد به دما، توانایی تحمل فرایند لایه‌نشانی در دما و فرایند بازپخت را ندارند و از این رو لایه نازک لایه‌نشانی شده بر روی این بستره‌ها دارای خواص مکانیکی بسیار ضعیف می‌باشد. از این رو تعریف فرایند آماده‌سازی سطح با پلاسما در کنار انتخاب روش مناسب جهت لایه‌نشانی می‌تواند خواص مکانیکی و الکترواپتیکی لایه نازک را ارتقا دهد[۲و۳]. در این پژوهش بستره‌هایی از جنس اکریلیک که پیش از انجام فرایند لایه‌نشانی تحت فرایند سونش پلاسمایی قرار گرفته بودند بوسیله لایه نازک ITO به روش کندوپاش جریان مستقیم لایه‌نشانی شدند و خواص مورد انتظار اپتیکی و مکانیکی مورد نظر حاصل گردید.

۲- مواد و روش‌ها

جهت انجام این تحقیق،بستره‌هایی از جنس اکریلیک با ابعاد ۱ در ۱ سانتیمتر تهیه و توسط روش استاندارد تمیز شدند. تنها با این تفاوت که بجای استفاده از استون، از محلول OP۱۲۰ جهت تمیزسازی نهایی بستره‌ها استفاده شد [۴]. جهت آماده‌سازی سطح بستره برای افزایش چسبندگی لایه نازک به بستره از سونش پلاسمایی در دمای اتاق استفاده شد. سامانه سونش پلاسمایی مورد استفاده در این تحقیق مجهز به منبع تغذیه RF با حداکثر توان ۶۰۰ وات می‌باشد که درون محفظه لایه‌نشانی در کنار سامانه کندوپاش DC با حداکثر توان ۱۰۰۰ وات قرار گرفته است که در آن شار دو گاز آرگون و اکسیژن توسط دو Mass Flow Controller با دقت ۰/۱ SCCM کنترل گردید. همچنین از تارگت ITO با خلوص ۹۹/۹۹٪ جهت لایه‌نشانی استفاده شد. از پروب ۴ سر و دستگاه طیف‌سنجی شرکت شیمادزو مدل UV-۳۶۰۰ به ترتیب برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و طیف عبوری نمونه‌ها در گستره طول‌موجی مرئی استفاده شده است. همچنین جهت بررسی سطح بستره‌ها از دو آزمون AFM و SEM و برای سنجیدن چسبندگی لایه به بستره از آزمون چسب برطبق استانداردMIL-F-۴۸۶۱۶ استفاده شد. برای انجام این آزمون چسب استاندارد بطور کامل بر روی قطعه چسبانده شده و با نیروی عمود بر سطح بطور ناگهانی از روی نمونه کنده می‌شود. در صورتی که هیچ قسمتی از لایه نازک توسط چسب جدا نشود، قطعه آزمون را با موفقیت پشت سر گذاشته است و در صورتی که قسمت‌هایی از لایه نازک توسط چسب از سطح بستره جدا شود، این آزمون برای آن قطعه ناموفق گزارش می‌شود. تغییرات در پارامترهای سونش سطح با پلاسما در جدول شماره ۱ قابل مشاهده می‌باشند. در هر مرتبه از انجام آزمایش، ۱۲ قطعه مشابه جهت انجام تمامی آزمون‌ها در دستگاه قرار داده شد.

جدول شماره۱: شرایط سونش پلاسمایی مورد استفاده در آزمایش.

شماره آزمون	توان پلاسما(وات)	شار گاز آرگون(SCCM)	شار گاز اکسیژن(SCCM)	زمان (min)
۱	۳۰۰	۲۰	۱۰	۱۰
۲	۳۰۰	۳۰	۵	۱۵
۳	۳۰۰	۴۰	۰	۲۰
۴	۴۰۰	۲۰	۱۰	۱۰
۵	۴۰۰	۳۰	۵	۱۵
۶	۴۰۰	۴۰	۰	۲۰
۷	۵۰۰	۲۰	۱۰	۱۰
۸	۵۰۰	۳۰	۵	۱۵
۹	۵۰۰	۴۰	۰	۲۰

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمون AFM

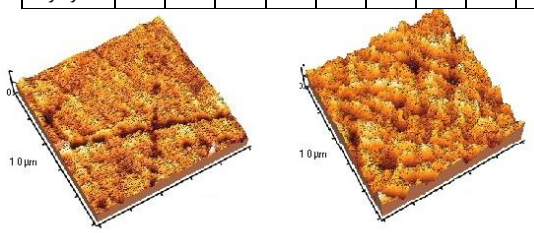
بررسی تصاویر AFM گرفته شده از سطح نمونه‌های سونش شده گویای این حقیقت است که با افزایش توان پلاسما از ۳۰۰ تا ۴۰۰ وات، زبری سطح بطور محسوسی افزایش یافته است اما با افزایش توان تا ۵۰۰ وات، تغییرات به سمت کاهش زبری سوق داده شده‌اند. همچنین مشاهده می‌گردد که در آزمون‌ها بطور میانگین

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

با افزایش نسبت گاز آرگون به اکسیژن و نیز افزایش زمان پلاسما، زبری سطح اندکی افزایش یافته است. شکل شماره ۱ زبری سطح زیادتر بر اثر انجام فرایند سونش با توان ۴۰۰ وات (نمونه شماره ۵) نسبت به توان ۳۰۰ وات (نمونه شماره ۲) را نمایش می‌دهد.

جدول ۲: زبری سطح نمونه‌ها به ترتیب شماره آزمون

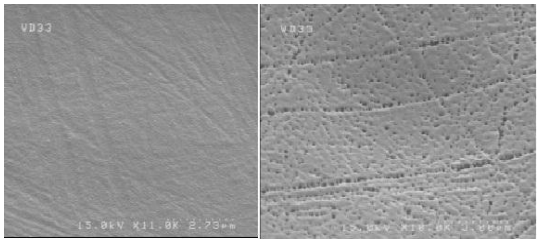
شماره آزمون	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
زبری (نانومتر)	۲/۶۳	۲/۲۳	۲/۶۹	۴/۵۸	۴/۶۱	۴/۶۹	۴/۱۶	۴/۲۴	۴/۳۷



شکل شماره ۱: تصاویر AFM مربوط به دو نمونه شماره ۵ (راست) و شماره ۲ (چپ).

۳-۲- آزمون SEM

شکل شماره ۲ تصویر SEM گرفته شده از سطح نمونه شماره ۶ در سمت راست و نمونه خام در سمت چپ را نمایش می‌دهد. در تصویر سمت راست مشاهده می‌گردد که سطح بستره در اثر برخورد یون‌های پر انرژی دچار خوردگی شده و حفره‌هایی بر روی سطح بستره ایجاد شده است. این حفره‌ها باعث جفت‌شدگی لایه نازک در سطح بستره شده و این عامل در کنار سونش شیمیایی سطح که در اثر برخورد یون‌های اکسیژن به سطح بستره اتفاق می‌افتد، باعث افزایش چسبندگی خواهد شد.



شکل شماره ۲: تصاویر SEM مربوط به دو نمونه شماره ۶ (راست) و بستره خام (چپ).

۴- لایه‌نشانی لایه نازک ITO

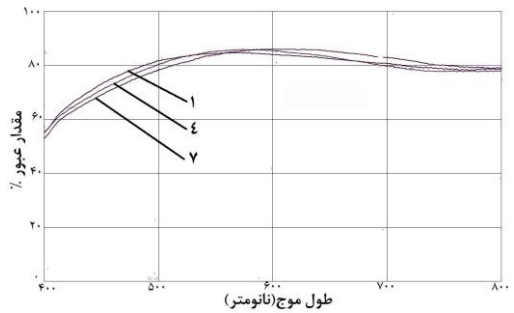
در این مرحله، از هریک از مراحل سونش پلاسمایی، یک قطعه انتخاب و در کنار یکدیگر قرار داده شدند و لایه‌نشانی برروی آنها انجام‌شد. شرایط مورد استفاده در فرایند لایه‌نشانی در جدول شماره ۳ قابل مشاهده می‌باشد. تمامی فرایندهای لایه‌نشانی در دمای محیط انجام‌شد. شار گازهای آرگون و اکسیژن در فرایندهای لایه‌نشانی به‌ترتیب SCCM ۳۰ و SCCM ۱۰ قرار داده شد.

جدول شماره۳: شرایط لایه‌نشانی مورد استفاده در آزمایش.

شماره آزمون	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
توان (وات)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
ضخامت(نانومتر)	۱۵۰	۱۷۵	۲۰۰	۱۵۰	۱۷۵	۲۰۰	۱۵۰	۱۷۵	۲۰۰

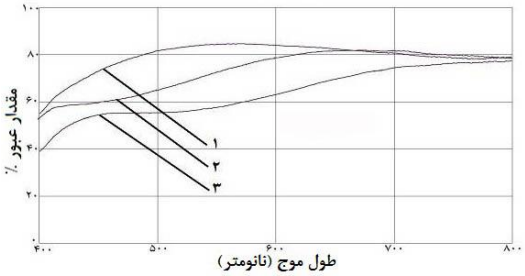
۴-۱- بررسی طیف عبوری

طیف عبوری قطعات در گستره طول‌موجی ۴۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. مشاهده شد که اختلاف چندانی بین نمونه‌هایی که در شرایط مختلف، تحت فرایند سونش قرار گرفته شده و در شرایط یکسان لایه‌نشانی شده بودند وجود ندارد. به عبارت دیگر فرایند سونش سطح با پلاسما تاثیری در شرایط اپتیکی قطعات ندارد. علت این امر را می‌توان این دانست که فرایند سونش پلاسمایی باعث ایجاد پستی و بلندی‌هایی در سطح بستره شده است که زبری آنها در محدوده نانومتر است. از این رو تاثیری در تغییر ویژگی‌های اپتیکی قطعه که متاثر از شرایط ماکروسکوپی قطعه می‌باشد ندارد. طیف عبوری سه نمونه با شماره‌های ۱ و ۴ و ۷ در شکل شماره ۳ قابل مشاهده می‌باشد. دیده می‌شود که تفاوتی بین نمونه‌هایی که با ضخامت یکسان لایه‌نشانی شده بودند وجود ندارد. اما همانطور که در شکل شماره ۴ قابل مشاهده است، با افزایش ضخامت لایه نازک از ۱۵۰ نانومتر تا ۲۵۰ نانومتر، افت در شدت طیف عبوری نمونه‌ها مشاهده می‌شود. علت این امر را می‌توان در افزایش جذب اپتیکی دانست که بر اثر افزایش ضخامت فیزیکی لایه نازک اتفاق می‌افتد.



شکل شماره ۳: طیف عبوری سه نمونه با شماره‌های ۱ و ۴ و ۷.

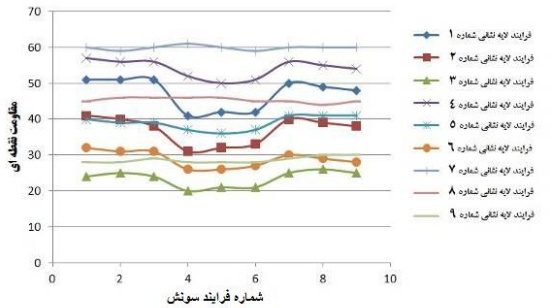
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]



شکل شماره ۴: طیف عبوری سه نمونه با شماره‌های ۱ و ۲ و ۳.

۴-۲- بررسی نتایج اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی

شکل شماره ۵ مقاومت نقطه‌ای نمونه‌ها بر حسب شماره فرایند سونش با پلاسما را نمایش می‌دهد. در این نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت لایه، مقاومت نقطه‌ای نمونه‌ها کاهش می‌یابد. مشاهده می‌گردد که در نمونه‌هایی که در فرایند لایه‌نشانی با توان بیشتر تولید شده‌اند، مقاومت نقطه‌ای متاثر از شرایط فرایند سونش با پلاسما نمی‌باشد. علت این امر را می‌توان در گرمای زیاد تولید شده توسط پلاسما حین لایه‌نشانی دانست که زبری سطح بستره که بر اثر فرایند سونش با پلاسما ایجاد شده است را از بین می‌برد. در نمونه‌های ۱ و ۲ و ۳ از فرایند لایه‌نشانی که با توان ۱۰۰ وات لایه نشانی شده‌اند، یک افت محسوس در مقدار مقاومت سطح نمونه برای فرایندهای سونش ۴ و ۵ و ۶ مشاهده می‌گردد. بنظر می‌رسد زبری زیاد سطح در کنار حضور اتم‌های اکسیژن سطحی که در اثر سونش بهینه در این شرایط بر روی بستره انجام شده است موجب کاهش محسوس مقاومت الکتریکی سطح گردیده است.



شکل شماره ۵: مقاومت نقطه‌ای نمونه‌ها بر حسب شماره فرایند سونش با پلاسما.

۴-۳- بررسی نتایج آزمون چسب

آزمون چسب که یک آزمون مخرب می‌باشد در انتها بر روی تمامی نمونه‌ها انجام شد. نمونه‌های لایه‌نشانی شده در فرایندهای ۷، ۸ و ۹ آزمون چسب را با موفقیت پشت سر نگذاشتند. علت گرمای تولید شده در توان زیاد فرایند لایه‌نشانی می‌باشد که پیش از این توضیح داده شد. همچنین نمونه‌های تولید شده در فرایندهای سونش ۲، ۳، ۵، ۶، ۸ و ۹ نیز این آزمون را با موفقیت پشت سر نگذاشتند. علت را می‌توان کمبود اکسیژن در فرایند سونش با پلاسما ذکر کرد که باعث می‌شود فرایند عملیات سطحی به خوبی انجام نشده و لایه نازک چسبندگی مناسبی به بستره نداشته باشد. تنها تست چسب نمونه‌های سونش شده در فرایند شماره ۴ و لایه‌نشانی شده در فرایندهای ۴ و ۵ و ۶ موفقیت آمیز بود.

۵- نتیجه‌گیری

نمونه‌های سونش شده با توان ۴۰۰ و ۵۰۰ وات بیشترین زبری سطح را دارا می‌باشند و این در حالی است که بهترین چسبندگی لایه به بستره مربوط به نمونه‌هایی است که در فرایند سونش از اکسیژن بیشتری استفاده شده است. همچنین در فرایند لایه‌نشانی، کمترین مقاومت نقطه‌ای مربوط به فرایندهایی است که با ضخامت بیشتری لایه‌نشانی شده‌اند. اما توان زیاد در فرایند لایه‌نشانی موجب تولید گرما و سوختن سطح بستره حین فرایند لایه‌نشانی شد. مناسب‌ترین نمونه مربوط به فرایند سونش شماره ۴ و فرایند لایه‌نشانی شماره۴، ۵ و ۶ می‌باشد که علاوه بر دارا بودن مقاومت نقطه‌ای کم، دارای چسبندگی مناسب لایه به بستره بوده و در نمونه شماره ۴ از عبور اپتیکی مناسبی نیز برخوردار می‌باشد.

۶- مراجع

[۱] فیروزی‌فر، علیرضا؛ زابلیان، حسین؛ جان‌نثاری، محمد؛ مردیها، مهدی، بررسی اثر تغییر شار و توان پلاسما بر خواص الکتریکی و اپتیکی لایه نازک ITO... ، **کنفرانس فیزیک ایران**، ۳۰۶۹-۳۰۷۲، ۱۳۹۱.

[2] Dong-Ho Kim, Mi-Rang Park, Hak-Jun Lee, Gun-Hwan Lee, Thickness dependence of electrical properties of ITO film deposited on a plastic substrate by RF magnetron sputtering**, Journal of Applied surface science** 253 (2006) 409-411.

[3] Li Jian Meng, Jinsong Gao, R.A. Silva, Shigeng Song, Effect of the oxygen flow on the properties of ITO thin films deposited by ion beam assisted deposition (IBAD), **Thin Solid Films** 516 (2008) 5454–5459 .

[4] S.A.R. Firoozifar, A. Behjat, E. Kadivar, S.M.B. Ghorashi, M. Borhani Zarandi, A study of the optical properties and adhesion of zinc sulfide anti-reflection thinfilm coated on a germanium substrate**, Journal of Applied Surface Science** 258 (2011) 818 – 821.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]