بهبود خواص الکتریکی و اپتیکی لایه نازک ITO با اصلاح فاصله الکترودها در سامانه اسپاترینگ DC مگنترونی

عبدالنبی کوثریان'، دانشیار؛ علیرضا کرامت زاده^۲، دانشجوی دکتری؛ مریم شکیبا^۳، دانشجوی دکتری؛ هومان کعبی^۴، استادیار؛ ابراهیم فرشیدی^۵، استاد

> a.kosarian@scu.ac.ir – دانشکده مهندسی – دانشگاه شهید چمران اهواز – اهواز – ایران – a-keramatzadeh@phdstu.scu.ac.ir ۲- دانشکده مهندسی – دانشگاه شهید چمران اهواز – اهواز – ایران – m-shakiba@phdstu.scu.ac.ir ۳- دانشکده مهندسی – دانشگاه شهید چمران اهواز – اهواز – ایران – h.kaabi@scu.ac.ir ۵- دانشکده مهندسی – دانشگاه شهید چمران اهواز – اهواز – ایران – farshidi@scu.ac.ir

واژههای کلیدی: لایههای نازک ITO، سیستم کندوپاش مگنترونی DC، فاصله الکترودها، مقاومت ورقهای، شفافیت لایه نازک، ویژگیهای ساختاری.

Improvement of electrical and optical properties of thin ITO films by modifying electrode spacing in DC magnetron sputtering

Abdolnabi Kosarian¹, Associate professor; Alireza Keramatzadeh², PhD Student; Maryam Shakiba³, PhD Student; Hooman Kaabi⁴, Assistant professor; Ebrahim Farshidi⁵, Professor

Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: a.kosarian@scu.ac.ir
 Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: a-keramatzadeh@phdstu.scu.ac.ir
 Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: m-shakiba@phdstu.scu.ac.ir
 Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: h.kaabi@scu.ac.ir
 Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: h.kaabi@scu.ac.ir

Abstract: An important parameter in the deposition of thin-film Indium-Tin-Oxide layers by magnetron sputtering is the spacing between the anode and cathode electrodes, by which the conditions of plasma deposition and the properties of the resulting films are controlled. In this paper, thin ITO films are deposited on glass substrates using the DC-magnetron sputtering technique at RT for different electrode spacing. The thickness of the layers has been measured in the range 110-370 nm. The XRD studies confirm that crystalline structure of ITO is cubic bixbyite. The sheet resistance of the samples prepared at the electrode spacing of 5, 7, 9, and 11 cm, are 17.7, 16, 1723, and 5207 Ω/\Box , respectively. The transmittance of the films in the spectral range of 400-800 nm is 75-85%. The lowest sheet resistance of 16 Ω/\Box is obtained at the spacing of 7 cm, having a transparency of 85% and a thickness of 230nm, which confirms that it is appropriate for use as the transparent contact in amorphous silicon solar cells. For such samples the average grain size of the crystallites and the root-mean-square of the roughness of the surface are 50±5 nm and ≈1.97 nm, respectively. The process simulations are also achieved using xpdp1, X'Pert and MATLAB software.

Keywords: ITO thin films, DC magnetron sputtering, electrode spacing, sheet resistance, transmittance, electrical and optical properties.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۴ و تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۲۷ و ۱۳۹۷/۰۸/۲۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۰۷ نام نویسنده مسئول: عبدالنبی کوثریان نشانی نویسنده مسئول: ایران – اهواز — ابتدای بلوار گلستان – دانشگاه شهید چمران اهواز – دانشکده مهندسی.

۱– مقدمه

لایههای نازک ITO بهعنوان یک اکسید هادی شفاف، در بسیاری از ادوات اپتیکی بهویژه صفحه نمایش کریستال مایع، آشکارسازهای نوری و الکترودهای ضدبازتاب در سلولهای خورشیدی مورد استفاده قرار می گیرند. در کاربردهای مذکور بهبود خواص اپتوالکتریکی فیلمهای نازک ITO، از اهمیت به سزایی بر خوردار است. در این میان تولید لایه-های ITO با کیفیت بالا از دو منظر نوع فناوری ساخت و کنترل فرآیند ساخت، قابل بررسی است. امروزه لایههای نازک ITO، با استفاده از تكنيكهاى مختلفي ازجمله تجزيه حرارتي توسط افشانه، لايه نشاني ليزر پالسی، روش سل ژل و کندوپاش مگنترونی توليد میشوند [۵-۱]. روش کندوپاش مگنترونی با داشتن نرخ رسوب بالا در فشار کاری کم و نیز امکان کنترل پارامترهای لایهنشانی ازجمله دمای زیرلایه [۷،۶]، فشار محفظه[۸،۶]، نوع ترکیب گازی [۱۲-۹]، توان کندوپاش [۱۴،۱۳،۶]، آمایش حرارتی [۱۵] و فاصله الکترودها[۲۱-۱۶]، امکان رسوب لایههای نازک با کیفیت مطلوب را داراست و بهطور گستردهای در صنعت ITO مورد استفاده است. در پژوهشهایی که اخیراً انجام-گرفته تأثیر برخی پارامترها بر عمل کرد و ویژگیهای ایتوالکترونیکی فیلم ITO بررسی شدهاند [۲۳،۲۲]. در پژوهش حاضر تأثیر فاصله الکترودها، بهعنوان یکی از مهمترین پارامترها، در سیستم اسپاترینگ DC بر خصوصیات اپتوالکتریکی فیلم ITO مورد بررسی قرار گرفتهاست. بررسی اثر توان و فشار کندوپاش بهمنظور دستیابی به مقادیر مطلوب این دو پارامتر در رسوب لایههای نازک ITO با کیفیت بالا در مرجع [۲۲] انجام شدهاست.

در سیستم کندوپاش، اتمها یا مولکولهای کندهشده از ماده هدف، تحت مکانیزمهای برخوردی با اتمهای گازی، بخشی از انرژی خود را در مسیر رسیدن به زیرلایه از دست خواهندداد. انرژی اتمها یا مولکولهای اسپاترشده، پس از انجام برخوردهای متوالی، در فاصله h از ماده هدف تا مقدار انرژی حرارتی^۱ گاز (kT) کاهش خواهدیافت. تعداد برخوردهای لازم n برای رسیدن اتمها یا مولکولهای اسپاترشده به این سطح از h، ^r انرژی حرارتی، باتوجهبه انرژی اولیه این ذرات، با فاصله حرارتی <math>h</sup> آنها مرتبط خواهدبود:

(1)

 $h = n\lambda$ که در آن لم مسیر آزاد میانگین است و براساس رابطه تجربی بەدست مىآيد (در اين رابطه p فشار $\lambda_{\rm p}=6/3 imes10^3~{
m mbar.cm}$ محفظه است) [18]. بنابراین فاصله حرارتی h وابسته به فشار و توان كندوپاش است. در ديگر تحقيق انجامشده، ايده فرض وجود يک منبع مجازی از اتمهای اسیاترشده در فاصله *h* از ماده هدف، ارائه شدهاست. در این ایده، منبع مجازی، مطابق شکل۱، فضای میان ماده هدف و زيرلايه را به دو ناحيه تقسيم مي كند: ناحيه حرارتي^۳ (در حدفاصل ماده هدف و منبع مجازی) و ناحیه دیفیوژن (از منبع مجازی تا زیرلایه). در تحقیق مذکور، موقعیت این منبع مجازی، در توان A · W RF و در فشار ۱۰ mTorr آرگون، در فاصله تقریبی ۵۰mm از ماده هدف محاسبه

شدهاست. این مدل، اثر فاصله ماده هدف-زیرلایه را بر نرخ رسوب نشان میدهد. انرژی جنبشی ذرات اسپاترشده در ناحیه حرارتی، بزرگ است و نرخ رسوب زمانی که زیرلایه در این ناحیه قرار دارد، نسبتاً زیاد است (بهعنوان مثال موقعیت زیرلایه B). این درحالی است که با افزایش فاصله ماده هدف-زیرلایه، درصورتی که زیرلایه در ناحیه دیفیوژن باشد، نرخ رسوب كاهش خواهديافت زيرا انتقال ذرات اسپاترشده از منبع مجازی به زیرلایه ازطریق دیفیوژن انجام شده و مربوط به گرادیان غلظت ذرات است [١٧]. علاوهبراین کاهش نرخ رسوب با افزایش فاصله ماده هدف و زیرلایه تابعی از زاویه خروج ذرات از ماده هدف است. درواقع، درصورتی که توزیع زاویه گسیل از ماده هدف رفتاری کسینوسی داشتهباشد، با حركت زيرلايه به فواصل دورتر، احتمال برخورد برخى از ذرات به دیواره محفظه، قبل از رسیدن به زیرلایه، افزایش یافته که این اثر منجربه كاهش نرخ رسوب خواهدشد [۲۹].

در این میان فشار کلی محفظه، Ptot، و توان کندوپاش با جابهجایی موقعیت منبع مجازی، نرخ رسوب و خصوصیات لایه نازک ITO را به-شدت تحت تأثير قرار خواهندداد. درواقع، با افزايش توان RF و كاهش فشار کندوپاش، منبع مجازی به موقعیت هایی دور تر از ماده هدف منتقل می شود. بنابراین افزایش توان RF منجربه افزایش چگالی و متوسط انرژی اولیه^۴ خواهدشد، که این امر افزایش احتمال مکانیزمهای برخوردی و درنتیجه h بزرگتر را به دنبال خواهد داشت [۱۸]. همچنین جابهجایی موقعیت منبع مجازی، بهدلیل تغییر فشار کلی محفظه نیز مرتبط با تغییر مسیر آزاد میانگین ذرات است[۱۹].



شکل۱: موقعیت نسبی ماده هدف، زیر لایه و منبع مجازی. در این ساختار، A و B موقعیتهای مختلف زیرلایه را نشان میدهند[۱۸]

۲- مواد و روش آزمایش

در این تحقیق لایههای نازک ITO به روش کندوپاش مگنترونی DC، به کمک ماده هدف ITO (با خلوص ۹۹/۹۹٪، قطر ۵cm ، ضخامت ۳mm و با درصد وزنی %In_rO_r: SnO_r= ۹۰:۱۰ wt.)، در دمای اتاق لايەنشانى شدەاند. فشار پايە سيستم قبل از آغاز لايەنشانى تا ا سیدن آورده شده و سپس گاز آرگون خالص تا رسیدن 2×10^{-5} torr به فشار کاری موردنظر به محفظه وارد می شود. زیر لایه های شیشه، در حمام آلتراسونیک به مدت ۱۵ دقیقه در آب دییونیزه و متانول

تمیزکاری شده و پس از خشکشدن به کمک گاز نیتروژن در محفظه قرار داده میشوند. برای نمونههای مختلف، توان کندوپاش در مقدار مطلوب W ۱۰۰ ثابت نگهداشتهشده [۲۲] و فاصله الکترودها در سیستم کندوپاش برای لایهنشانی از ۵cm تا ۱۱cm متغیر در نظر گرفته شدهاست. همچنین بهمنظور کاهش اثر مخرب فشار بر خصوصیات ساختاری و ایتوالکتریکی فیلم ITO، لایه نشانی هر نمونه در حداقل فشار لازم برای خودنگهداری پلاسما انجام شدهاست. براساس نتایج تجربی بهدستآمده در آزمایشگاه محل تحقیق، برای فاصله الکترودهای ۷ cm، حداقل فشار کاری برای خودنگهداری پلاسما برابر ۱۶، ۲۴، ۳۲، ۳۴ و ۹۶ میلی تور بهترتیب بهازای توان DC یلاسمای ۲۰، ۶۰، ۲۰، ۱۴۰ و ۱۸۰ وات می باشد. تفصیل این شرایط در مقاله دیگری از نویسندگان حاضر ارائه شدهاست[۲۲]. دراینجا از نمونه ITO رسوبیافته در توان 100W استفاده شدهاست که برای استفاده در سلول خورشيدي سيليكن آمورف مناسب است. اين نمونه علاوهبر مقاومت ورقهای بسیار اندک (□/Ω ۱۶)، دارای درصد عبور نوری ۸۵٪ است و درعین حال ضخامت نسبتاً کمی دارد. این ویژگیها لایه ITO را برای اتصال بالایی سلول خورشیدی مناسب می سازند. زمان لایهنشانی برای همه نمونهها برابر ۱۰ دقیقه است.

Philips Analytical الگوهای پراش پرتو X با استفاده از پراش سنج ICDD Card ۰۶-۰۴۱۶ ثبت شدهاند (۲۰۱۹-۲۰ ICDD Card ۰۶-۰۴۱۶ ثبت شدهاند (۲۰۱۹ می موج Act and Second Philips می می انجام می شود. طول (No. (No. در این سیستم، تابش پرتو ازطریق لامپ مس انجام می شود. طول موج منبع پرتو Cu برابر ۲۵/۵۹ آنگستروم و نوع انتشار آن م است. موج منبع پرتو Cu برابر ۲۵/۵۹ آنگستروم و نوع انتشار آن م است. مخامت، نرخ رسوب، توپوگرافی سطح و میزان زبری سطح نمونهها در معیار RMS می مدل DME DS معیار Sons با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی مدل (sheet resistance) (sheet action ورقهای (می مشخص شده و لایههای نازک TTO به کمک تکنیک پروب چهارمیله مشخص شده و

میزان عبوردهی نوری و جذب به کمک طیفسنج فرابنفش-مرئی مدل Specord s600 در محدوده ۴۰۰nm نانومتر اندازه گیری شدهاست.

۳- تجزیه و تحلیل یافتهها

نتایج حاصل از آنالیز AFM، فرض افزایش خواص کریستالی لایه نازک، با کاهش فاصله الکترودها را تقویت میکند. در شکل ۲، تصویر گرفته-شده در ابعاد ۱۰۰۰۰×۱۰۰۰، از سطح نمونههای لایهنشانیشده با تغییر فاصله الکترودها در محدوده ۱۱۰۵۲ را به وضوح نشان میدهد.

به کمک این سیستم متوسط اندازه دانههای کریستالی برای نمونه لایهنشانی شده در فواصل ۵، ۷، ۹ و ۱۱cm الکترودها، بهترتیب برابر با ۵۸۳±۵۹ ه ۵۸±۵۱ و ۵۸۳±۴۰ و ۵۸۳±۵۹ و جذر میانگین مربع میزان زبری سطح بهترتیب برابر با ۲/۶۹، ۱/۹۷، ۱/۹۳ و ۱/۴۷nm اندازه گیری شدهاست.

همچنین ضخامت اندازه گیری شده با استفاده از این سیستم، برای نمونههای لایهنشانی شده در فواصل ۵، ۷، ۹ و ۱۱cm الکترودها، بهتر تیب برابر با ۳۷۰، ۲۳۰، ۲۰۰ و ۱۱۰nm است. این اثر کاهش نرخ رسوب، با افزایش فاصله الکترودها را نشان می دهد.

باتوجه به شکل ۲(ب)، مشاهده می شود که در فواصل کمتر ۵ و ۲cm توزیع یک نواختی از دانه های بزرگ تر وجود دارد در حالی که در فواصل بیش تر دانه های کوچک تر با توزیعی تصادفی در سطح لایه نازک TTO دیده می شوند. طبق نتایج حاصل از بررسی و مطالعه اثر فاصله الکترودها بر انرژی جنبشی یون ها و الکترون ها با استفاده از نرمافزار شبیه سازی پلاسمای xpdp1، (شکل ۴)، در فواصل بیش تر الکترودها، انرژی جنبشی ذرات کاهش خواهدیافت و ذرات اسپاتر شده ماده هدف که با انرژی کمتر به سطح زیرلایه می رسند، دانه های کریستالی کوچک-تر با توزیعی تصادفی را شکل خواهندداد.



(ب)

شکل۲: تصویر گرفتهشده در ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ ، از سطح نمونه لایهنشانی شده در توان ۱۰۰W، (الف) در دو بعد، (ب) در سه بعد

شکل ۳ الگوهای پراش پرتو X را برای لایههای ناز ک ITO در فواصل ۵، ۷، ۹ و ITO الکترودها را نشان می دهد. همان گونه که قبلاً نیز بدان اشاره شد، بهمنظور کاهش اثر مخرب فشار، هر یک از نمونهها در حداقل فشار کاری ممکن بهمنظور خودنگهداری پلاسما رسوب یافتهاند. از-آنجایی که انرژی جنبشی ذرات اسپاترشده در نواحی حرارتی و دیفیوژن کاملاً متفاوت است، ساختار میکروسکوپی و خصوصیات لایه ناز ک ITO رسوب یافته در این دو ناحیه نیز متفاوت خواهدبود. درواقع، در فواصل بسیار دور الکترودها، لایه نازک رسوب یافته از نقطهنظر جهتهای کریستالی خود، رفتاری تصادفی و غیرقابل پیش بینی داشته و شدت پیکها در آنالیز XRD بسیار ضعیف است. این اثر حاکی از کاهش کسر کریستالی لایه نازک، در فواصل بسیار دور الکترودها است.



شکل۳: الگوهای پراش پر تو X لایههای نازک ITO در فواصل مختلف الکترودها

با کاهش فاصله الکترودها، افزایش انرژی حاصل از ارتعاش یونها در پلاسما، منجربه انتقال حرارت به زیرلایه و افزایش دمای زیرلایه خواهد-شد. این امر افزایش سایتهای خالی اکسیژن را بهدنبال خواهدداشت. چراکه انتقال انرژی حرارتی به زیرلایه، احتمال شکستهشدن پیوندهای اکسیژنی و خروج آنها از لایه نازک را افزایش خواهدداد. باتوجهبه نتایج حاصل از الگوی پراش نمونههای ITO (شکل۳)، با کاهش فاصله الکترودها و درنتیجه افزایش انرژی جنبشی یونهای برخوردی به زیرلایه، خواص کریستالی لایه با جهتگیری ترجیحی صفحه (۴۰۰) افزایش خواهدیافت. علاوهبراین، باتوجهبه اینکه، تهیجای^۵ اکسیژن نقش مهمی در دیفیوژن دیگر اتمها در این سایتهای خالی دارد، رشد نقش مهمی در دیفیوژن دیگر اتمها در این سایتهای خالی دارد، رشد مهان گونه که ذکر شد، جهتگیری ترجیحی رشد لایه در راستای صفحه کریستالوگرافی (۴۰۲)، (۴۰۲)، (۶۲۲) و (۴۳۱) نیز مشاهده میشود.

چسبندگی اتمهای اکسیژن درنتیجه بمباران یونهای پرانرژی است (بمباران یونهای پرانرژی ⁺A۲). در این تحقیق بهمنظور بررسی و مطالعه اثر فاصله الکترودها بر انرژی جنبشی یونها و الکترونها از نرمافزار شبیهسازی پلاسمای xpdp1 استفاده شدهاست [۲۸–۲۵]. نتایج حاصل از این شبیهسازی در شکل ۴ نشان داده شدهاست. درواقع، جهت گیری ترجیحی رشد لایه نازک TTO در راستای صفحه کریستالوگرافی (۴۰۰)، در فواصل کمتر الکترودها، به دلیل سازگاری بیش تر این صفحه با سایت-های خالی اکسیژن است. از سوی دیگر با افزایش فاصله الکترودها، شدت پیک صفحه کریستالوگرافی (۲۲۲) به شدت کاهشیافته که حاکی از



رسوب لایه نازک ITO با ساختار آمورف است.

شکل ۴: انرژی جنبشی یونها و الکترونها در فضای میان الکترودها. شبیه سازی به کمک نرمافزار xpdp1 انجام شده است. (انرژی جنبشی الکترونها با خط ممتد و در محور سمت راست و انرژی جنبشی یونها با نقطه چین و در محور سمت چپ نمایش داده شده است). شبیه سازی در V=۴۰۰ v ،P=۰/۵ mbar و برای L=۲،۳،۵ cm انجام شده-است.

در این تحقیق خصوصیات الکتریکی لایههای نازک ITO به کمک سیستم پروب چهار میله مورد بررسی قرار گرفتهاست. مقدار مقاومت ورقهای و مقاومت ویژه نمونههای لایهنشانی شده در توان های مختلف در جدول ۱ ارائه شدهاند. شکل ۵ روند تغییرات مقاومت ورقهای را برحسب توان DC برای نمونههای ITO نشان می دهد.

طبق نتایج حاصل از آنالیزهای AFM و XRD، افزایش خواص کریستالی فیلم با کاهش فاصله الکترودها، توجیه کننده کاهش مقاومت ورقهای فیلم است. درواقع باتوجهبه این که هر سایت خالی اکسیژن دو الکترون به باند هدایت اضافه می کند، افزایش سایتهای خالی اکسیژن با کاهش فاصله الکترودها، افزایش چگالی حاملها و درنتیجه کاهش مقاومت ورقهای را بهدنبال خواهدداشت. در این میان، اگرچه تصاویر AFM نمونه رسوبیافته در فاصله L=۵cm وجود کریستالیتهای بزرگ-تری در ساختار لایه نازک را نشان میدهد، اما وجود مراکز پراکندگی مربوط به مرز ستونهای کریستالی در ساختار این لایه سبب می گردد

تا مقاومت ورقهای لایه نازک در این فاصله (۵/۵ /۱۷/۷)، اندکی بیش از لایه نازک رسوبیافته در فاصله L=۷cm (۵/۵ /۱۷) باشد. ازسوی دیگر افزایش فاصله الکترودها به بیش از ۷cm، اثر قابل ملاحظهای در رشد مقاومت ورقهای خواهدداشت زیرا انرژی اندک ذراتی که به سطح زیرلایه میرسند قادر به شکستن پیوند اکسیژن و آزادساختن آن نبوده و با کاهش تهی جاهای اکسیژن از یک و رسوب لایه با بی نظمی بالا از سوی دیگر، موجبات افزایش نمایی مقاومت ورقهای را مهیا می سازند. خصوصیات الکتریکی لایه های رسوبیافته در جدول ۱ ارائه شدهاند.



شکل ۵: مقاومت ورقهای لایههای نازک ITO بهصورت تابعی از توان رسوب درحین فرآیند لایهنشانی در حداقل فشار لازم جهت تضمین خودنگهداری پلاسما.

طیف عبوردهی نوری در ناحیه طول موج ۳۰۰۰m و نمودار²(αhv) برحسب hv برای لایههای نازک ITO در توان ۱۰۰W و فشار mTorr و در فواصل مختلف الکترودها بهترتیب در شکل ۶ و ۷ نشان داده شدهاست.



شکل ۶: طیف عبوردهی نوری در ناحیه طول موج ۲۰۰m–۸۰۰ برای لایههای نازک ITO در فواصل مختلف الکترودها و در توان ۱۰۰W و فشار ۳۲mTorr.

نوسانات مشاهدهشده در طیف عبوردهی نوری نمونههایی که در فواصل ۵، ۷ و ۹cm الکترودها از هم رسوب یافتهاند، ناشی از عدمتطابق ضریب شکست زیرلایه و لایه نازک است. ازسوی دیگر، عدموجود این نوسانات در نمونه مربوط به L=۱۱cm حاکی از رسوب این لایه نازک با بینظمی بالا و در فاز آمورف است (زیرلایه از نوع شیشه و دارای پیکربندی آمورف است). در این میان کاهش ۱۰٪ شفافیت لایه نازک در L=۵cm

مقدار متوسط محاسبهشده برای طیف عبوردهی نوری (T_{av}) و نیز پهنای باند نوری (E_g) لایههای ITO در فواصل مختلف الکترودها در جدول ۱ نشان دادهشدهاند. مطابق مقادیر محاسبهشده در این جدول، افزایش الکترونهای آزاد برای لایههایی که در فواصل کمتر الکترودها رسوبیافتهاند، منجربه افزایش پهنای باند نوری برطبق رابطه بِرستِین– ماس⁶ خواهدشد:

$$E_{g} - E_{go} = \Delta E_{gBM} = \frac{h}{2m^{*}} \left(3\pi^{2}n_{e}\right)^{2/3}$$
(Y)

ne که در آن Ego پهنای باند ذاتی ماده، *m جرم مؤثر الکترون و چگالی حاملهای الکترونی است.



شکل ۷: نمودار ⁽*ahv*) برحسب*hv* برای لایههای نازک ITO در فواصل مختلف الکترودها و در توان ۱۰۰ و فشار ۳۲mTorr.

طبق نتایج ارائهشده در جدول ۱، میزان T_{av} در فواصل مختلف الکترودها علاوهبر وجود تهی جاهای اکسیژن بهعنوان مراکز پراکندگی نوری در لایه نازک، مرتبط با ضخامت لایه نازک و درنتیجه کاهش مسیر پراکندگی نوری[^] است. ضریب جذب نوری (۵) به صورت تابعی از میزان عبوردهی نوری (*T*) و میزان بازتاب^۹(*R*) در رابطه (*T*) ارائه شده- $\alpha = \frac{1}{t} \ln \left\{ \frac{(1-R)^2}{2T} + \left[\frac{(1-R)^2}{2T} + R^2 \right]^{1/2} \right\}$ (*T*)

که در آن t ضخامت لایه نازک ITO است. درصورتی که در طیف بهدستآمده از نمونه ITO از بازتاب در ناحیه طول موج UV صرفنظر شود، ضریب جذب را می توان طبق رابطه (۴) محاسبه نمود: $\alpha = \frac{1}{t} \ln\left(\frac{1}{T}\right)$ (۴)

ضریب جذب برای پهنای باند مستقیم ^{۱٬} را میتوان بهصورت تابعی از انرژی فوتون براساس رابطه تائوک^{۱۱} نوشت [۲۹]:

$$(\alpha h\nu)^2 = A\left(h\nu - E_g\right) \tag{(a)}$$

hv ، ^۲ مهدرآن A وابسته به احتمال انتقال بین تراز هدایت و ظرفیت ^۲ ، hv انرژی فوتون و E_g پهنای باند نوری است. پهنای باند مستقیم را می توان با رسم²(αhv) برحسب hv و سپس برونیابی ^۲ بخش خطی این نمودار در انرژیهای زیاد به نقطهای که در آن ضریب جذب صفر شود($\alpha=0$)، در انرژیهای زیاد به نقطهای که در آن ضریب جذب صفر شود($\alpha=0$)، بهدست آورد. همان گونه که در شکل ۷ نشان داده شدهاست، با برونیابی انجامشده، مقادیر پهنای باند نوری برای نمونههای رسوبیافته در فواصل ۵. ۷، ۹ و ۱۱۲۳ الکترودها، بهترتیب برابر با ۲/۰۱، ۲/۰۱، ۹/۰۹ و ۷۷

جدول ۱: خصوصیات میکروساختاری و اُپتوالکتریکی لایههای نازک TTO رسوبیافته در فواصل مختلف الکترودها و در توان W ۱۰۰ و فشار سی ۲۳

		••••		
11	٩	٧	۵	فاصله الكترودها (cm)
۴۰±۵	۴۵±۵	۵·±۵	۶۵±۵	متوسط اندازه دانه-
				های کریستالی (nm)
١/۴٧	١/٩٣	١/٩٧	۲/۶۹	میزان زبری سطح در
				معیار RMS (nm)
11.	۲۰۰	۲۳۰	۳۷۰	ضخامت (nm)
١/٨٣	٣/٣٣	٣/٨٣	8/18	نرخ رسوب (Å/s)
۵۲۰۷	۱۷۳۳	18	۱۷/۷	مقاومت ورقهای
				(Ω/□)
277/YY	848/8.	٣/۶٨	۶/۵۴	مقاومت ويژه
				(Ω-cm×10 ⁻⁴)
				درصد عبوردهی نوری
۲ .۸ ۱	×۸۲/	۲.۸۵	7.γΔ	در ناحیه ۴۰۰–
				۸۰∙nm
۳/۸۸	٣/٩۵	۴/۰۱	4/•1	پهنای باند نوری
				(eV) $\mathcal{V}\Delta \cdot nm - \mathcal{V} \cdot \cdot$
۲/۳×۱۰-۵	٧/٩×١٠-٥	•/• 17٣	•/••٣١	شاخص کیفیت هاک
				(Ω ⁻¹)

در این تحقیق، بهمنظور ارزیابی و مقایسه کیفیت لایههای مختلف ITO، از نقطهنظر خصوصیات اُپتوالکتریکی، از شاخص کیفیت هاک^{۱۴}[۳۱]، بهعنوان یک معیار مورد قبول متداول، استفاده شدهاست:

$$\Phi_{TC} = \frac{T_{av}^{10}}{R_s} \tag{(7)}$$

که در آن *T_{av} م*قدار درصد متوسط طیف عبوردهی نوری در ناحیه طول موج ۴۰۰nm - ۸۰۰ و *R_s* مقاومت ورقهای لایه نازک در واحد α/Ω است. طبق نتایج بهدستآمده در توان ۱۰۰W، فشار کاری ۳۲mTorr و در فاصله الکترودها برابر با L=۷cm فیلم رسوبیافته دارای مقاومت ورقهای برابر با α/Ω ۱۶، میزان متوسط عبوردهی ۸۵٪ و بیشترین مقدار شاخص

کیفیت ¹-۰/۰۱۲۳۵ در میان نمونههای رسوبیافته در فواصل مختلف الکترودها می اِشد.

۴- نتیجهگیری

در این تحقیق لایههای نازک اکسید ایندیوم-قلع (ITO)، با هدف بهبود خواص اُپتوالكتريكى، بەروش كندوپاش مگنترونى DC، بر بستر شيشه، در دمای اتاق و در محدوده فاصله الکترودها برابر ۱۱-۵cm لایهنشانی شدهاند. شبیهسازی اثر فاصله الکترودها بر انرژی جنبشی یونها و الكترونها در حدفاصل ميان ماده هدف و زيرلايه، با استفاده از نرمافزار xpdp1 ، حاكى از كاهش انرژى ذرات با افزايش فاصله الكترودها است. با افزایش فاصله الکترودها، برخورد میان ذرات گاز یونیزهشده کاهش یافته و درنتیجه انرژی جنبشی یونهایی که به سمت زیرلایه شتاب گرفتهاند نیز تحت تأثیر این امر کاهش خواهدیافت. این پدیده خواص کریستالی لایههای نازک ITO را به شدت تحت تأثیر قرار خواهدداد. به-طورى كه طبق نتايج عملى بهدست آمده، نمونه رسوب يافته در فاصله ۱۱cm ساختاری آمورف دارد. در این تحقیق، از تکنیک پراش پرتو X (XRD) و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) برای آنالیز ساختاری لایه-های نازک استفاده شدهاست. به کمک میکروسکوپ AFM، ضخامت نمونهها در گستره فاصله ۱۱-۵cm الکترودها، در محدوده ۳۷۰-۱۱۰m اندازه گیری شدهاند. برای نمونه لایهنشانی شده در فواصل ۵، ۷، ۹ و ۱۱cm الكترودها، بهترتيب برابر با ۵۰±۵nm ، ۵۰±۵nm و ۴۰±۵nm و جذر میانگین مربع میزان زبری سطح بهتر تیب برابر با ۲/۶۹، ۱/۹۳، ۱/۹۷ و ۱/۴۷nm اندازه گیری شده است. طبق نتایج آنالیز XRD، ازآنجایی که انرژی جنبشی ذرات اسپاترشده در نواحی حرارتی و دیفیوژن کاملاً متفاوت است، ساختار میکروسکوپی و خصوصیات لایه نازک ITO رسوبیافته در این دو ناحیه نیز متفاوت خواهدبود. درواقع، در فواصل بسيار دور الكترودها، لايه نازك رسوبيافته از نقطهنظر جهات كريستالي خود، رفتاری تصادفی و غیرقابل پیشبینی داشته و شدت پیکها در آنالیز XRD بسیارضعیف است. باتوجه به نتایج حاصل از الگوی پراش نمونههای ITO، با كاهش فاصله الكترودها و درنتيجه افزايش انرژي جنبشي يون-های برخوردی به زیرلایه، خواص کریستالی لایه با جهت گیری ترجیحی صفحه (۴۰۰) افزایش خواهدیافت.

مقاومت ورقهای لایههای نازک TTO برای فاصله الکترودها برابر ۵، ۷، ۹ و Tto ۱۱ با استفاده از تکنیک پروب چهار میله بهترتیب برابر با خواص اپتیکی لایهها با استفاده از طیفسنجی فرابنفش-مرئی در محدوده ۲۰۰۳، ۲۰۰۹، نشان داد که در گستره فوا صل تحت برر سی میزان شفافیت لایههای نازک در محدوده ۸۵–۲۵٪ متغیر است. نوسانات مشاهدهشده در طیف عبوری نمونههای ۵۵–۱۱ مربوط به اختلاف ضریب شکست میان TTO و زیرلایه شیشه است. طبق نتایج بهدستآمده در این تحقیق، برای لایه نازک OT رسوبیافته در توان L=Vcm، فشار کاری TTOT و در فاصله الکترودها برابر با ۲۰۰۳ oxygen vacancy of hydrogen-doped indium tin oxide thin films", Thin Solid Films, vol. 519, Issue 11, pp. 3557–3561, 2011.

- [13] Sh. Qamar Hussain, W. K. Oh, Sh. Ahn, A. H. Tuan Le, S. Kim, S. M. Iftiquar, S. Velumani, Y. Lee and J. Yi, "Highly transparent RF magnetron-sputtered indium tin oxide films for a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells amorphous/crystalline silicon", Materials Science in Semiconductor Processing, vol. 24, pp. 225-230, 2014.
- [14] Zhixuan Lv, Jindong Liu, Dengyao Wang, Hualong Tao, Weichao Chen, Haoting Sun, Yanfei He, Xin Zhang, Zhiyu Qu, Zicheng Han, Xuelin Guo, Shiping Zhao, Yunxian Cui, Hualin Wang, Shimin Liu, Chaoqian Liu, Nan Wang, Weiwei Jiang, Weiping Chai, Wanyu Ding, "A simple route to prepare (100) preferred orientation indium tin oxide film onto polyimide substrate by direct current pulsed magnetron sputtering", Materials Chemistry and Physics, vol. 209, pp. 38-45, 2018.
- [15] Shumei Song, Tianlin Yang, Jingjing Liu, Yanqing Xin, Yanhui Li, Shenghao Han, "Rapid thermal annealing of ITO films", Applied Surface Science, vol. 257, Issue 16, pp. 7061-7064, 2011.
- [16] Z. Qiao, Fabrication and study of ITO thin films prepared by magnetron sputtering, Ph.D thesis, University of Duisburg-Essen, May 2003.
- [17] W. F. Wu, B. S. Chiou and S. T. Hsieh, "Effect of sputtering power on the structural and optical properties of RF magnetron sputtered ITO films", Semicond. Sci. Technol, vol. 9, pp. 1242-1249, 1994.
- [18] P. Gao, L. J. Meng, M. P. dos Santos, V. Teixeira and M. Andritschky, "Characterisation of ZrO₂ films prepared by rf reactive sputtering at different O₂ concentrations in the sputtering gases", Vacuum, vol. 56, pp. 143-148, 2000.
- [19] C. V. R. Vasant Kumar and A. Mansingh, "Effect of targetsubstrate distance on the growth and properties of rf-sputtered indium tin oxide films", J. Appl. Phys., vol. 65, pp. 1270, 1989.
- [20] J. L. Perry, Effects of sputter deposition parameters on stress in tantalum films with applications to chemical mechanical planarization of copper. Ph.D Thesis. Rochester Institute of Technology, 2004.
- [21] C. V. R. Vasant kumar and A. Mansingh, "Effect of targetsubstrate distance on the growth and properties of rf-sputtered indium tin oxide films", J. Appl. Phys., vol.65, pp. 1270-1280, 1989.
- [22] M. Shakiba, A. Kosarian and E. Farshidi, "Effects of processing parameters on crystalline structure and optoelectronic behavior of DC sputtered ITO thin film", J Mater Sci: Mater Electron, vol. 28, pp. 787-797, 2017.
- [23] A. Kosarian, M. Shakiba, and E. Farshidi, "Role of Sputtering Power on the Microstructural and Electro-Optical Properties of ITO Thin Films Deposited Using DC Sputtering Technique", IEEJ Transaction on Electrical and Electronic Engineering, vol. 13, Issue 1, pp. 27-31, 2018.
- [24] M. DM, Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing, William Andrew, United States of America, April 2010.
- [25] Xpdp1 v.3.5 plasma simulation software, *Plasma Theory and* Simulation Group at University of California, Berkeley.
- [26] C. K. Birdsall and A. B. Langdon, *Plasma Physics via Computer Simulations*. Adam Hilger, IOP Publishing, Bristol, 1991.
- [27] V. Vahedi, M. Surendra, "A Monte Carlo collision model for the particle-in-cell method: applications to argon and oxygen discharges", Computer Physics Communications, vol. 87, Issues 1–2, pp. 179-198, 1995.
- [28] V. Vahedi, R. W. Stewart, and M. A. Lieberman, "Analytic model of the ion angular distribution in a collisional sheath", J. Vac. Sci. Technol. A, vol. 11, Issue 4, pp. 1275, 1993.
- [29] D. K. Schroder, Semiconductor material and device characterization, Wiley, New York, 1990.
- [30] J. I. Pankove, Optical process in semiconductors, Dover Publications, Inc., New York, 1971.
- [31] G. Haacke, "New figure of merit for transparent conductors", J. Appl. Phys., vol. 47, pp. 4086, 1976.

کمینه مقاومت ورقهای□/Ω ۱۶، بیشینه میزان متو سط عبوردهی ۸۵٪ و بیشترین شاخص کیفیت ^{۱-}۱۲۳۵۰ ۰/۰ قابل دستیابی است.

مراجع

- [1] Ştefan Ţălu, Slawomir Kulesza, Miroslaw Bramowicz, Adam M. Pringle, Joshua M. Pearce, Marikkan Murugesan, Vishnukanthan Venkatachalapathy, J. Mayandi," Micromorphology analysis of sputtered indium tin oxide fabricated with variable ambient combinations", Materials Letters, vol. 220, pp. 169-171, 2018.
- [2] S.M. Rozati, T. Ganj, "Transparent conductive Sn-doped indium oxide thin films deposited by spray pyrolysis technique", Renewable Energy, vol. 29, Issue 10, pp. 1671-1676, 2004.
- [3] Mirnmoy Misra, Deuk-Kyu Hwang, Yoon Cheol Kim, Jae-Min Myoung, Tae Il Lee, "Eco-friendly method of fabricating indiumtin-oxide thin films using pure aqueous sol-gel, Ceramics International", vol. 44, Issue 3, pp. 2927-2933, 2018.
- [۴] محرم غياثوند، محمد ناصر مقدسی، عباسعلی لطفی نيستانک، عليرضا

دانشگاه تبریز، دوره ۴۸، شماره ۱، صفحه ۲۰۵–۱۹۷، ۱۳۹۷.

- [5] Cristian Viespe, Ionut Nicolae, Cornelia Sima, Constantin Grigoriu, Rares Medianu, "ITO thin films deposited by advanced pulsed laser deposition", Thin Solid Films, vol. 515, Issue 24, pp. 8771-8775, 2007.
- [6] Bibhuti Bhusan Sahu, Wen Long, Jeon Geon Han, "Highly conductive flexible ultra thin ITO nanoclusters prepared by 3-D confined magnetron sputtering at a low temperature", Scripta Materialia, vol. 149, pp. 98-102, 2018.
- [7] C. David, B.P. Tinkham, P. Prunici, A. Panckow, "Highly conductive and transparent ITO films deposited at low temperatures by pulsed DC magnetron sputtering from ceramic and metallic rotary targets", Surface and Coatings Technology, vol. 314, pp. 113-117, 2017.
- [8] A. Mohammadi Gheidari, F. Behafarid, G. Kavei, M. Kazemzad, "Effect of sputtering pressure and annealing temperature on the properties of indium tin oxide thin films", Materials Science and Engineering: B, vol. 136, Issue 1, pp. 37-40, 2007.
- [9] M. Marikkannan, M. Subramanian, J. Mayandi, M. Tanemura, V. Vishnukanthan, and J. M. Pearce, "Effect of ambient combinations of argon, oxygen, and hydrogen on the properties of DC magnetron sputtered indium tin oxide films", AIP Advances, vol. 5, 2015.
- [10] K.P. Sibin, A. Carmel Mary Esther, H.D. Shashikala, Arjun Dey, N. Sridhara, Anand Kumar Sharma, Harish C. Barshilia, "Environmental stability of transparent and conducting ITO thin films coated on flexible FEP and Kapton® substrates for spacecraft applications", Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 176, pp. 134-141, 2018.
- [11] Huafei Guo, Kezhi Zhang, Xuguang Jia, Changhao Ma, Ningyi Yuan, Jianning Ding, "Effect of ITO film deposition conditions on ITO and CdS films of semiconductor solar cells", Optik -International Journal for Light and Electron Optics, vol. 140, pp. 322-330, 2017.
- [12] K. Okada, Sh. Kohiki, S. Luo, D. Sekiba, S. Ishii, M. Mitome, A. Kohno, T. Tajiri and F. Shoji, "Correlation between resistivity and

زيرنويس ها

- 8 optical scattering path
- 9 reflectance
- 10 direct allowed transition
- 11 Tauc relation
- 12 transition probability
- 13 extrapolating
- 14 Haacke's figure of merit

- 1 thermal energy
- 2 thermalization distance
- 3 thermalization region
- 4 average initial energy
- 5vacancy
- 6 Burstein–Moss 7intrinsic band gap