

بررسی اثر بازپخت در خلأ بر روی خواص الکتریکی، اپتیکی و ساختاری لایه‌های نازک و شفاف

ITO تهیه شده به روش تبخیر در خلأ با استفاده از باریکه الکترونی

میرزائی، فاطمه^۱؛ ملکی، محمد هادی^۲؛ میرجلیلی، غضنفر^۳

^۱گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه یزد

^۲ پژوهشکده لیزر و اپتیک، سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

چکیده

لایه‌های نازک ITO بر روی زیرلایه‌های شیشه‌ای در دمای 200°C با کمک روش تبخیر در خلأ با استفاده از باریکه الکترونی، لایه نشانی شده است. نمونه‌های لایه نشانی شده، در محیط اتمسفر و محیط خلأ، در دماهای مختلف تحت بازپخت قرار گرفته‌اند. مقاومت الکتریکی نمونه پس از لایه نشانی $1/84 \times 10^{-1} \Omega\text{cm}$ اندازه گیری شد و پس از بازپخت در اتمسفر و خلأ (به ترتیب) 500°C و 400°C ، به مقدار $1/35 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ کاهش یافت. عبور نوری نمونه $78/66\%$ بدست آمد. با استفاده از نتایج XRD ثابت شبکه $10/08 \text{ \AA}$ محاسبه شد. باند ممنوعه نوری لایه‌های نازک ITO، $4/227$ بدست آمد. برای بررسی اندازه گیری خواص لایه‌های نازک ITO از سیستم چهارترمینالی، طیف سنج UV/VIS/IR، XRD و AFM استفاده شده است.

Effects of annealing an vacuum on Electrical, optical and structural characteristic of ITO thin films by electron beam evaporation

Mirzaei, Fatemeh¹; Maleki, Moham'mad hadi²; Mirjalili, Ghazanfar³

^{1,3}Physic Departmen, Yaz Univeristy

²Laser & Optics research School Nuclear Science & Technology Research Institute (NSTRI)

Abstract

Tin doped oxide, ITO thin films were prepared on glass substrate at 200°C by electron beam technique. Deposited films were annealed at different temperatures and different environment. The Resistance of films deposited is about $1/84 \times 10^{-1} \Omega\text{cm}$ and falls down to $1/35 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ after annealing 500°C at atmosphere and 400°C . Average transmittance in visible range is about $78/66\%$. The lattice constant of ITO thin films were $10/08 \text{ \AA}$ by XRD. Optical band gap calculated $4/222$. The structural, electrical and optical characteristics of ITO samples have been analyzed by XRD, AFM, Four point probe method and UV/VIS/IR spectrophotometer.

PACS No.

مقدمه

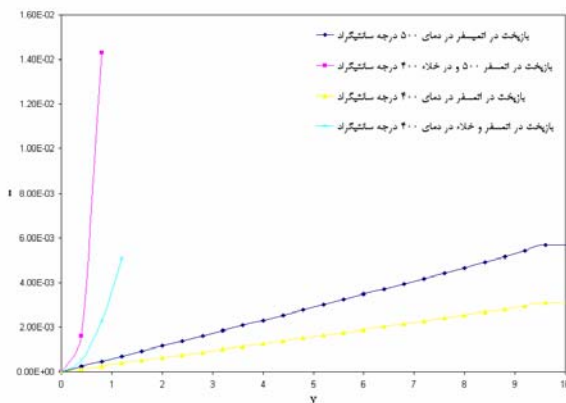
بصورت گسترده در صفحه نمایشگرهای مایع (LCD)، دیودهای گسیل کننده نور ارگانیک (OLED)، الکترودهای رسانای شفاف برای سلول‌های خورشیدی و ابزار الکترواپتیکی دیگر [۳ و ۲] استفاده می‌شود. در کاربردهای مختلف لایه‌های نازک ITO مقاومت الکتریکی پایین و توان اپتیکی بالا در ناحیه طول موج نور مرئی نیاز است.

روش‌های متعددی برای لایه نشانی لایه‌های نازک ITO وجود دارد از قبیل کندوپاش مگنترونی dc و کندوپاش RF [۵ و ۴]، تبخیر به کمک پالس لیزری [۶]، تبخیر حرارتی [۷]، تبخیر باریکه

اکسید ایندیم یک ماده سرامیکی شفاف است، زمانی که با قلع (معمولاً 10%) آلائیده شود، رسانا شده اما همچنان شفاف باقی می‌ماند [۱]. ایندیم تین اکساید یا اکسید ایندیم آلائیده شده با قلع، ITO نامیده می‌شود. ITO یک نیمه رسانای نوع n با شکاف انرژی پهن است. به دلیل کاربردهای فراوان ITO در صنعت، سالهای زیادی است که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. لایه‌های نازک ITO، به دلیل مقاومت الکتریکی پایین ($10^{-4} \Omega\text{cm}$) و شفافیت نوری مناسب در ناحیه نور مرئی ($>80\%$) بطور همزمان،

سطحی پایین تر، نمونه‌ها در دمای 200°C و 300°C تحت بازپخت قرار گرفته‌اند. مقاومت سطحی نمونه‌ها پس از بازپخت در دمای 200°C و 300°C به ترتیب به مقدار $3/01 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ و $2/98 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ کاهش یافت. بازپخت در این دماها، شفافیت نمونه را به اندازه مورد نیاز بهبود نمی‌بخشد. برای رسیدن به لایه‌های به اندازه کافی شفاف، نمونه‌ها در محیط اتمسفر در دماهای 400°C و 500°C به مدت ۴ ساعت تحت بازپخت قرار می‌گیرند. اکسیژن موجود در محیط، سبب بهبود شفافیت لایه‌ها می‌شوند. پس از بازپخت در اتمسفر، لایه‌ها به شفافیت مورد نیاز رسیده‌اند اما مقاومت همچنان بالاست.

مقاومت الکتریکی لایه‌های نازک وابسته به چگالی حامل‌های آزاد است. چگالی حامل‌های آزاد از طریق دو مکانیزم بدست می‌آید، جایگزینی اتم‌های قلع و تهی جاهای اکسیژن. بازپخت در کوره خلاء (محیطی که دارای کمبود اکسیژن است). رشد کریستالی لایه‌ها را بهبود می‌بخشد و همچنین غلظت حامل‌ها را با ایجاد تهی جاهای اکسیژن افزایش می‌دهد. در حقیقت، بازپخت در کوره خلاء اکسیژن‌های اضافی را از لایه‌ها جدا کرده و با ایجاد تهی جاهای اکسیژن، مقاومت را کاهش می‌دهد. نمونه‌های که قبلاً در اتمسفر بازپخت شده‌اند، بار دیگر به مدت ۴ ساعت در دمای 400°C در کوره خلاء، بازپخت می‌شوند. پس از بازپخت مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده است و حاصل در جدول ۱، آمده است. در شکل ۱، نمودار I-V نمونه‌ها در شرایط مختلف بازپخت با هم مقایسه شده‌اند.



شکل ۱: نمودار I-V لایه‌های ITO در شرایط مختلف بازپخت.

الکترونی [۸] و فرایند سل-ژل [۹]. در این کار به بررسی اثرات بازپخت در کوره خلاء بر روی خواص الکتریکی، اپتیکی و ساختاری لایه‌های نازک ITO تهیه شده به روش تبخیر در خلاء با استفاده از باریکه الکترونی بر روی زیرلایه‌های شیشه‌ای پرداخته می‌شود.

روش انجام آزمایش

در این کار از زیرلایه‌های شیشه‌ای جهت لایه نشانی استفاده شده است. آلودگی زیرلایه بر روی خواص لایه‌های بدست آمده بسیار تاثیرگذار است بنابراین قبل از لایه نشانی، زیرلایه‌ها توسط محلول شیمیایی RCA (آب یونیزه شده، آمونیاک و پراکسید هیدروژن به نسبت ۱:۱:۵) تمیز شده‌اند. برای لایه نشانی، از روش تبخیر در خلاء با استفاده از باریکه الکترونی و هدف ITO ($90 \text{ wt}\% \text{In}_2\text{O}_3$ و $10 \text{ wt}\% \text{SnO}_2$) استفاده شده است. پس از رسیدن فشار محفظه به میزان 10^{-6} torr و دمای محیط لایه نشانی به 200°C ، لایه نشانی انجام می‌گیرد. ضخامت لایه‌های ITO با استفاده از بلور نوسانگر کوارتز دستگاه لایه نشانی اندازه‌گیری شده و در حدود 180 nm است. لایه‌های ITO بدست آمده پس از لایه نشانی، بسیار تیره است. مقاومت الکتریکی نمونه‌ها پس از لایه نشانی $3/95 \times 10^{-2} \Omega\text{cm}$ اندازه‌گیری شد. برای بهبود خواص الکتریکی و اپتیکی لایه‌های نازک ITO، نمونه‌ها پس از لایه نشانی در محیط اتمسفر و خلاء، در دماهای مختلف تحت بازپخت قرار می‌گیرند و پس از هر مرحله بازپخت خواص لایه‌ها بررسی می‌شود. به منظور بررسی خواص لایه‌های ITO، مقاومت سطحی لایه‌ها با استفاده از سیستم چهار ترمینالی اندازه‌گیری می‌شود. طیف عبوری لایه‌ها با استفاده از طیف سنج UV/VIS/IR اندازه‌گیری شد و خواص ساختاری لایه‌ها با استفاده از XRD و AFM بررسی می‌شود.

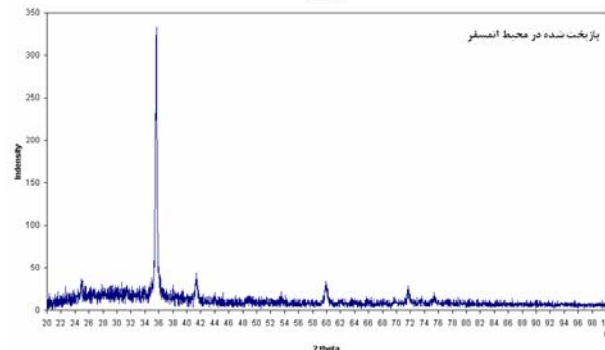
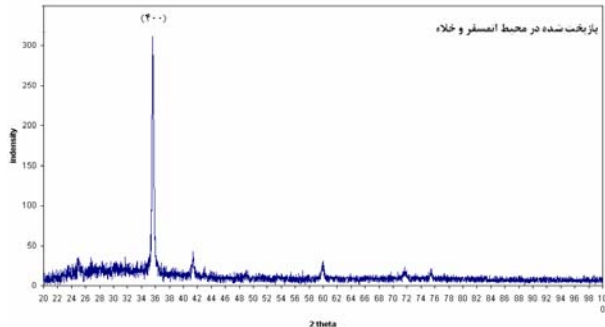
نتایج و بحث

مقاومت الکتریکی لایه‌های نازک ITO از خواص بسیار مهم و کاربردی آن است. مقاومت نمونه قبل از بازپخت، $10^{-1} \Omega\text{cm}$ و $3/95 \times 10^{-2} \Omega\text{cm}$ اندازه‌گیری شد. برای بدست آوردن نمونه‌های با مقاومت

جدول ۱، مشخصات الکتریکی و اپتیکی لایه‌های نازک بر حسب تغییر در شرایط بازیخت (محیط و دما) را نشان می‌دهد.
جدول ۱: مشخصات الکتریکی و اپتیکی اندازه گیری شده

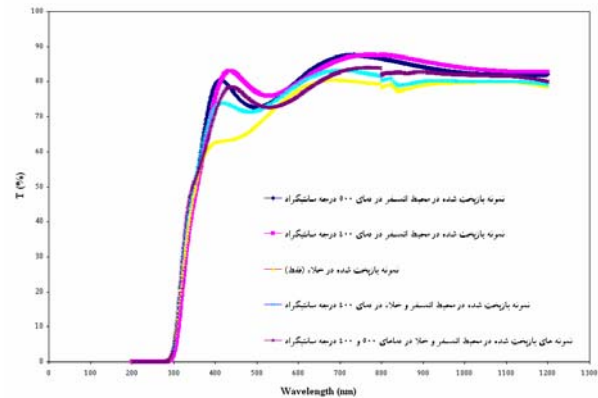
باند ممنوعه نوری	عبورنوری میانگین (T%)	مقاومت سطحی ($\times 10^{-2} \Omega \text{cm}$)	دمای بازیخت (Ts)
۴/۰۴	۸۲/۳۱	۸/۰۷	۴۰۰°C (اتمسفر)
۴/۱۱	۸۱/۴۱	۶/۲۳	۵۰۰°C (اتمسفر)
۴/۲۲	۷۸/۴۰	۲/۰۸	۴۰۰°C (اتمسفر) ۴۰۰°C (خلاء)
۴/۲۷	۷۸/۶۶	۱/۳۵	۵۰۰°C (اتمسفر) ۴۰۰°C (خلاء)

در شکل ۴، طیف XRD مربوط به لایه‌های ITO که در محیط‌های مختلف بازیخت شده‌اند را نشان داده و با هم مقایسه کرده است. پیک ظاهر شده در شکل منطبق بر صفحه (۴۰۰) است که نشان دهنده جهت $\langle 100 \rangle$ است. بازیخت در محیط خلاء سبب کاهش اندکی در مقدار پیک می‌شود.



شکل ۴: XRD نمونه‌های بازیخت شده در اتمسفر و بازیخت شده در هر دو محیط اتمسفر و خلاء.

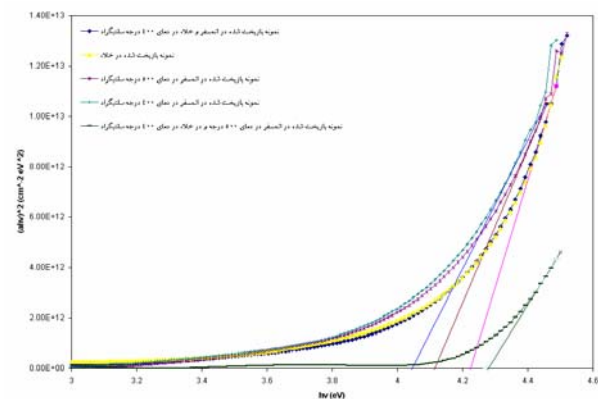
طیف عبوری لایه‌های ITO با استفاده از طیف سنج UV/VIS/IR اندازه گیری شده است. شکل ۲، طیف عبوری لایه‌های نازک ITO که در شرایط مختلف بازیخت شده‌اند را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با تغییر دمای بازیخت و محیط بازیخت درصد عبور نوری تغییر می‌کند.



شکل ۲: طیف عبوری لایه‌های ITO تحت شرایط مختلف بازیخت. برای گذار مستقیم در لایه‌های ITO، باند ممنوعه نوری بر حسب انرژی فوتونها از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$(ahv)^2 = A(hv - E_g) \quad (1)$$

hv انرژی فوتون، E_g باند ممنوعه نوری و A عددی ثابت است. برای محاسبه باند ممنوعه نوری لایه‌ها باید منحنی $(ahv)^2$ را بر حسب hv رسم کرده و سپس قسمت خطی نمودار $(ahv)^2$ را آنقدر امتداد داد تا محور hv را در $\alpha = 0$ قطع کند. شکل ۳، نمودار $(ahv)^2$ را بر حسب hv ، برای لایه‌های ITO که در شرایط مختلف بازیخت شده‌اند را نشان می‌دهد.



شکل ۳: نمودار $(ahv)^2$ بر حسب hv برای تعیین باند ممنوعه مستقیم لایه‌های نازک ITO بازیخت شده در شرایط مختلف.

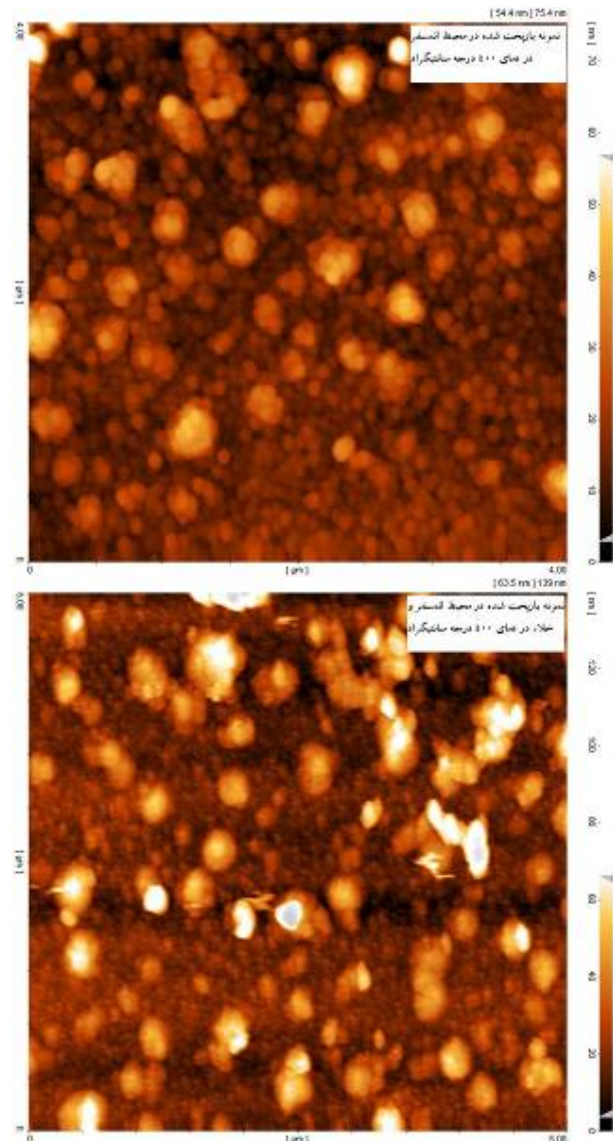
نتیجه گیری

لایه‌های نازک، شفاف و رسانای ITO به شیوه تبخیر در خلاء، با کمک باریکه الکترونی از هدف ITO (In_2O_3 , 90 wt% و SnO_2 , 10 wt%) بر روی زیرلایه شیشه‌ای، لایه نشانی شده است. تاثیر بازپخت در کوره خلاء بر روی خواص الکتریکی، اپتیکی، ساختار کریستالی و سطحی بوسیله آنالیزهای سیستم چهارترمینالی، طیف سنج UV/VIS/IR، XRD و AFM بررسی شده است. لایه-های ITO که در محیط اتمسفر در دمای 500°C بازپخت شدند و مجدداً در خلاء در دمای 400°C تحت بازپخت قرار گرفته‌اند، دارای مقاومت بهینه $1/35 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ است و میانگین درصد عبور نوری در ناحیه مرئی برابر ۷۸/۶۶٪ است.

مرجع‌ها

- [۱] J. Eite and A. G. Spencer; "Indium Tin Oxide for transparent EMC shielding and Anti-static applications"; Presented at EMCUK. (2004).
- [۲] H. Kim and A. Dique and J. S. Horwitz; Appl. Phys. Lett. **74(23)**, (1999) 3444.
- [۳] H. Hiramatsu and W. S. Seo and K. Koumoto; Chem. Mater. **10**, (1998) 3033. Kim and A.
- [۴] A. K. Kulkarni and K. H. Schulz and T. S. Lim; Thin Solid Films **345**, (1999) 273.
- [۵] S. H. Shin and J. H. Shin and K. J. Park; Thin Solid Films **341**, (1999) 225.
- [۶] F. O. Adurodija and H. Izumi and T. Ishihara and K. Yamada and H. Matsui; Thin Solid Films **350**, (1999) 79.
- [۷] F. Zhu and C. H. A. Huan and K. Zhang and A. T. S. Wee; "Investigation of annealing effects on indium tin oxide thin films by energy loss spectroscopy"; Thin Solid Films **359**, (2000) 244-250.
- [۸] J. K. Sheu and Y. K. Su and G. C. Chi and M. J. Jou and C. C. Liu and C. M. Chang; "Indium Tin Oxide ohmic contact to highly doped n-GaN"; Solid-State Electronics **43**, (1999) 2081-2084.
- [۹] H. L. Harthapel and A. L. Dawer and A. K. Jain and G. Jagadish; Semiconducting Transparent Thin Films, IOP, Bristol, (1995).

تاثیر تغییرات محیط و دمای بازپخت بر روی ساختار سطحی لایه-های نازک ITO توسط میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) بررسی شده است. با توجه با این تصاویر می‌توان دریافت که بازپخت در خلاء، موجب افزایش ناهمواریهای سطح می‌شود که نتیجه بزرگتر شدن اندازه دانه‌ها می‌باشد. بزرگ شدن سایز دانه‌ها باعث کاهش مرزدانه‌ها شده و در نتیجه تعداد الکترون‌های کمتری در مرزدانه‌ها به دام افتاده، بنابراین مقاومت لایه‌ها کمتر می‌شود و عبور نوری نیز بهبود می‌یابد.



شکل ۵: تصاویر AFM مربوط به نمونه‌های بازپخت شده در شرایط مختلف.