

Polymer Coatings Containing ITO Nanoparticles: Effective Factors on Conductivity and Optical Properties

Mostafa Jafari^{1*}, Faezeh Ghadimi Herfeh²

1. Nano Technology Research Group, Iranian Academic Center for Education,
Culture & Research (ACECR), Fars Branch, Shiraz, Iran

2. Polymer Science Department, Faculty of Science, Iran Polymer and Petrochemical
Institute, P.O. Box: 14975-112, Tehran, Iran

Received: 24 July 2015, Accepted: 27 November 2015

Abstract

Polymers usually have high resistance to electricity flow. Electrical conductivity of polymers could be changed utilizing fillers. One of these fillers, indium tin oxide (ITO), has many different applications in various fields due to its relatively low electrical resistance and its ability to impart transparency and clear coatings. Electrically conductive transparent coatings containing ITO nanoparticles can be prepared via sol-gel technique (low temperature) and cured by UV irradiation and/or by post curing at low temperature and reduction under a passage of gas (such as N₂) on polymeric substrates. Fluence of UV irradiation is an effective parameter on surface morphology of polymeric samples. Photo-degradation of coatings may occur at high irradiation fluence due to the photons leaked from polymeric substrates surface. The difference in surface topography (surface roughness) of polymeric substrates results in samples with different electrical resistance. A polymeric substrate with the lowest surface roughness shows the highest electrical conductivity.

Key Words

ITO nanoparticle,
sheet electrical resistance,
conductive coating,
optical transparency,
conductivity

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: mstf.jafari@yahoo.com

پوشش‌های پلیمری دارای نانوذرات ITO: عوامل مؤثر بر خواص رسانایی و نوری

مصطفی جعفری^{۱*}، فائزه قدیمی حرفه^۲

۱- شیراز، معاونت پژوهشی جهاد دانشگاهی فارس، گروه نانو تکنولوژی

۲- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده علوم، گروه علوم پلیمر، صندوق پستی ۱۴۹۷۵-۱۱۲

دریافت: ۱۳۹۴/۵/۲، پذیرش: ۱۳۹۴/۹/۶

به‌طور معمول، پلیمرها مقاومت زیادی در برابر عبور جریان الکتریسیته دارند. رسانندگی الکتریکی آن‌ها را می‌توان با استفاده از پرکننده‌ها تغییر داد. گروهی از این پرکننده‌ها، نانوذرات ایندیم قلع اکسید (ITO) هستند که به‌دلیل برخورداری از مقاومت الکتریکی کم و امکان استفاده از آن‌ها در پوشش‌های پلیمری شفاف، کاربردهای فراوانی را در زمینه‌های مختلف به خود اختصاص داده‌اند. پوشش‌های رسانای شفاف دارای نانوذرات ITO را می‌توان با روش سل-ژل (دمای کم) و درنهایت پخت UV یا گرمادهی در دمای کم و کاهش در اتمسفر کنترل شده (مانند گاز N_2) روی بسترهای پلیمری تهیه کرد. شدت تابش UV از عوامل اثرگذار بر شکل‌شناسی سطح نمونه‌های پلیمری است. تخریب نوری پوشش در مقادیر زیاد تابش، به‌دلیل فوتون‌های منتشر شده از سطح بستر پلیمری مشاهده شده است. همچنین، توپوگرافی سطح (زبری سطح) بستر پلیمری استفاده شده، سبب تفاوت در مقادیر مقاومت الکتریکی نمونه‌ها می‌شود. بستر پلیمری با کم‌ترین زبری سطح، بیشترین رسانایی را نشان می‌دهد.

بسیار ش

فصلنامه علمی- ترویجی

سال ششم، شماره ۳،

صفحه ۶۲-۵۵، ۱۳۹۵

ISSN: 2252-0449

چکیده



مصطفی جعفری



فائزه قدیمی حرفه

واژگان کلیدی

نانوذره ITO،

مقاومت الکتریکی سطحی،

پوشش رسانا،

شفافیت نوری،

رسانندگی

مقدمه

به‌طور کلی، محصولات ساخته شده از پلیمرها نارسا هستند و مقاومت زیادی در برابر عبور جریان الکتریسیته نشان می‌دهند. گاهی این مقاومت زیاد، موجب ذخیره‌شدن الکتریسیته می‌شود که مجموعه‌ای از مشکلات ناخواسته را به دنبال دارد. برای نمونه می‌توان به ایجاد الکتریسیته ساکن در تسمه‌ها و جعبه‌های حفاظ دستگاه‌های الکتریکی، کف‌پوش‌ها، البسه و صفحه نمایشگرها اشاره کرد که موجب تولید جرقه الکتریکی و حتی ایجاد آتش‌سوزی می‌شود. در این‌گونه شرایط، هدایت الکتریسیته به محیط اطراف لازم است. در جدول ۱، مقاومت الکتریکی تعدادی از پلیمرهای مهم آمده است [۱].

امروزه افزودنی‌های گوناگون برای ایجاد رسانندگی الکتریکی در پلیمرها موجود است. از جمله می‌توان نقره، فولاد زنگ‌زن و کربن را در شکل و اندازه‌های مختلف نام برد [۲،۳]. نانوذرات ایندیم قلع اکسید (ITO) نیز از جمله موادی است که به دلیل قابلیت چسبندگی مناسب روی انواع زیرلایه‌ها، مقاومت الکتریکی به نسبت کم، بازتاب نوری عالی در محدوده امواج IR، به‌ویژه در ناحیه IR دور، پایداری شیمیایی مطلوب، سختی زیاد و شفافیت مطلوب از کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف برخوردار است [۴-۶]. برای نمونه می‌توان به کارگیری آن را در الکترودهای شفاف و صنعت اپتوالکترونیک [۵]، حسگرهای گاز [۷]، ساخت پنجره‌های الکتروکرومیک [۸]، سلول‌های خورشیدی [۹] و پوشش‌های ضدبازتابش و ضدالکتریسیته ساکن روی پنجره‌ها و ورقه‌ها [۱۰،۱۱] نام برد. پوشش‌های شفاف با خاصیت ضدالکتریسیته ساکن در کاربردهایی مانند ساخت تراشه‌های الکترونیکی در شیشه نمایشگرها و ورقه‌ها اهمیت پیدا می‌کنند [۱۲،۱۳].

نانوذرات ITO

نانوذرات ITO از دو ترکیب ایندیم اکسید (In_2O_3) و قلع اکسید (SnO_2) تشکیل شده‌اند که هر یک ویژگی‌ها و خواص متفاوتی دارند [۱۴،۱۵]. مقاومت الکتریکی این نانوذرات در مقاله‌ها بسیار کم و

جدول ۱- مقاومت الکتریکی تعدادی از پلیمرها [۱].

پلیمر	مقاومت الکتریکی ($\Omega \cdot \text{cm}$)	پلیمر	مقاومت الکتریکی ($\Omega \cdot \text{cm}$)
پلی کربنات	10^{16}	پلی امید	10^{12}
پلی وینیل کلرید	10^{15}	آکریلونیتریل بوتادی‌ان استیرن	10^{16}
پلی اتیلن ترفتالات	10^{14}	پلی پروپیلن	10^{15}

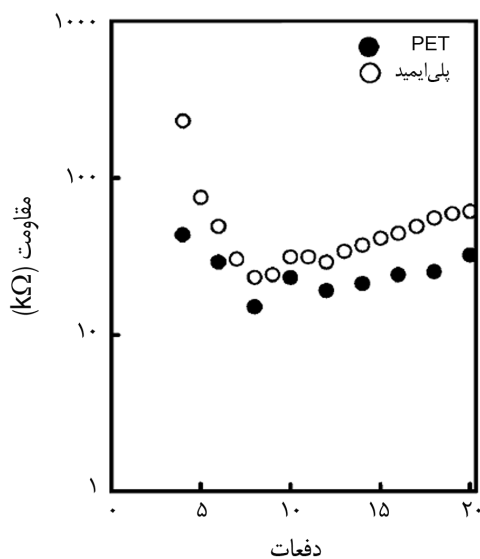
حدود $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ تا $3 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ گزارش شده است [۱۶-۱۸]. این ترکیبات، نیمه‌رسانای نوع n هستند ($E_g \geq 3 \text{ eV}$) که اتم‌های قلع آن، برای دوپه‌شدن کاتیونی به شبکه In_2O_3 وارد می‌شوند و الکترون اضافی را برای رسانش فراهم می‌کنند [۱۹-۲۱]. الکترون‌های آزاد موجود در نانوذرات ITO در طول موج‌های بلندتر تابش زیرقرمز را باز می‌تابند. آن‌ها در شیشه‌ها برای محدوده تابش IR مانند آینه عمل می‌کنند و مانع عبور امواج گرمایی از شیشه می‌شوند [۱۴]. همچنین، نانوذرات ITO بیکس‌بیت (bixbite) مکعبی شکل هستند [۱۸]. در مطالعات اخیر گزارش شده است، با ورود حدود ۱۰٪ وزنی SnO_2 در شبکه In_2O_3 ، بیشترین مقدار انحلال‌پذیری شبکه SnO_2 در شبکه In_2O_3 با ساختار تک‌فازی فراهم می‌شود که از کمترین مقاومت الکتریکی برخوردار است [۲۰]. در مقادیر بیش از ۱۰٪ وزنی، مقاومت الکتریکی افزایش اندکی نشان می‌دهد که دلیل آن را می‌توان افزایش مقدار الکترون برای رسانش، در اثر افزایش مقدار Sn دانست. اما این عامل پس از مقدار مشخصی افزایش، موجب کاهش تحرک الکترون‌ها و در نهایت کاهش اندکی در رسانش نانوذرات ITO می‌شود [۲۰].

پوشش‌های دارای نانوذرات ITO

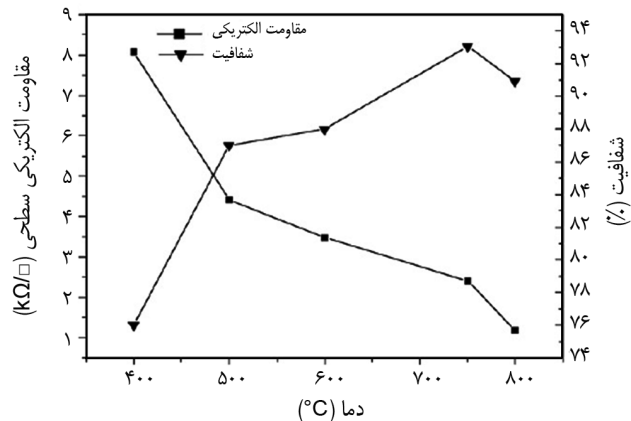
پوشش‌های رسانای شفاف دارای نانوذرات ITO را می‌توان به روش‌های متفاوت، از جمله رسوب‌دهی فیزیکی در بخار (physical vapor deposition, PVD)، رسوب‌دهی شیمیایی در بخار (chemical vapor deposition, CVD) یا فرایند شیمیایی تر تهیه کرد [۲۲]. در میان فرایندهای شیمیایی تر، فرایند سل-ژل بیشتر به کار می‌رود. این فرایند با آبکافت پیش‌ماده فلزی در محلولی از حلال‌های آلی مانند اتانول آغاز می‌شود. پس از آن، مراحل خشک‌کردن و گرمادهی اتفاق می‌افتد [۲۳]. دو روش اول، به دلیل دمای فرایند کم ($150-200^\circ\text{C}$) برای تهیه فیلم‌های ITO روی ورقه‌های پلیمری مناسب هستند. اما، تجهیزات فرایند رسوب‌دهی شیمیایی در بخار، گران‌قیمت است [۲۲]. فرایند سل-ژل، روشی ساده و ارزان برای تهیه فیلم‌های اکسیدی است. در این

(شدت 20 mJ/cm^2 و 1 Hz) تابش دهی شد [۲۲]. در این حالت، دمای سطح بستر نمونه‌ها حدود 30°C و مقاومت ویژه نمونه‌های پوشش یافته روی بسترهای PET و PI (ضخامت 95 nm) به ترتیب $6/3 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ و $6/2 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ گزارش شد [۲۲]. این روش در رسانایی بسترهای PC و PEEK ناموفق عمل کرد. با توجه به شکل ۲ که تغییرات مقاومت الکتریکی فیلم ITO بر صفحه‌های PET و PI را نشان داده است، کمترین مقاومت با اعمال 10 ضربان لیزر به دست آمد. پژوهشگران گزارش کردند، مقادیر افزوده مقاومت نمونه‌های PC و PEEK که پایداری گرمایی بیشتری نسبت به PET و PI دارند، به آثار گرمایی تابش مربوط نمی‌شود. آن‌ها فوتون‌های UV منتشر شده، تخریب سطح، ریزترک‌های ایجاد شده و به بیان دیگر، تخریب نوری بسترهای پلیمری را دلیل مقاومت زیاد و ناموفق بودن این روش در رسانندگی بسترهای PC و PEEK دانستند [۲۲].

در سال ۲۰۰۳، Aegerter و Al-Dahoudi پژوهشی را به منظور مقایسه اثر تابش UV و گرمادهی بر مقاومت الکتریکی فیلم‌های سل-ژل انجام دادند. در این پژوهش، فیلم رسانای ۳-متاکریلوکسی پروپیل تری متوکسی سیلان-ITO (ITO/MPTS) با روش سل-ژل روی بسترهای پلی کربنات (PC)، پلی متیل متاکریلات (PMMA)، پلی ایمید (PI) و پلی اتیلن (PE) تهیه شد [۲۳]. نمونه‌ها در دمای کم (130°C) گرمادهی یا با UV تابش دهی شدند. در اثر تابش دهی، مقاومت ویژه پایدار (stable resistivity) نمونه‌های پلیمری تا حدود $9/5 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ (مقاومت الکتریکی سطحی $1/7 \text{ k}\Omega/\square$) در



شکل ۲- تغییرات مقاومت الکتریکی فیلم ITO بر صفحه‌های PET و PI بر حسب دفعه‌های ضربان تابش [۲۲].



شکل ۳- تغییرات مقاومت الکتریکی و شفافیت پوشش‌های دارای نانوذرات ITO روی بستر شیشه‌ای بر حسب دمای گرمادهی [۲۴].

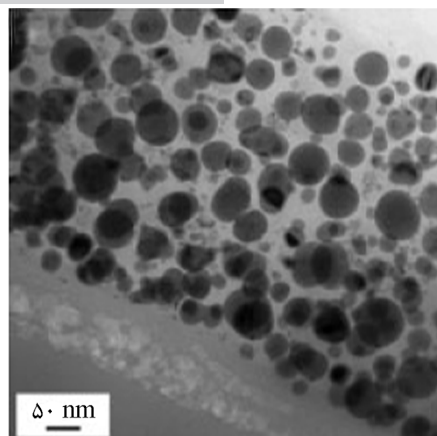
حالت، به منظور دستیابی به خواص الکتریکی، نوری و شیمیایی مناسب کلسینه کردن فیلم‌ها در دمای فراتر از 300°C تا 1000°C لازم است [۲۳]. در شکل ۱، تغییرات مقاومت الکتریکی و شفافیت فیلم دارای نانوذرات ITO پوشش یافته به روش سل-ژل روی بستر شیشه‌ای با مقدار گرمادهی نشان داده شده است. افزایش دمای گرمادهی موجب کاهش مقاومت الکتریکی سطحی و در نتیجه، افزایش رسانایی پوشش‌ها می‌شود [۲۴]. با افزایش دما، نانوذرات فشرده‌تر و ساختار بلوری فیلم منظم‌تر می‌شود. بنابراین، انتقال الکترون‌ها راحت‌تر اتفاق می‌افتد. همچنین، افزایش دما موجب شفافیت بیشتر پوشش‌ها می‌شود و این شفافیت را به درصد‌های زیاده‌تر انتقال می‌دهد [۲۴].

از سوی دیگر، دمای انتقال شیشه‌ای اغلب پلیمرهای آلی کمتر از 200°C است. بر این اساس، امکان تهیه پوشش‌های رسانا روی صفحه‌های پلیمری از روش متداول سل-ژل وجود ندارد [۲۲]. در سال‌های اخیر، مطالعات اندکی در زمینه پوشش‌های ITO تهیه شده با روش سل-ژل (دمای کم) روی بسترهای پلیمری منتشر شده است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

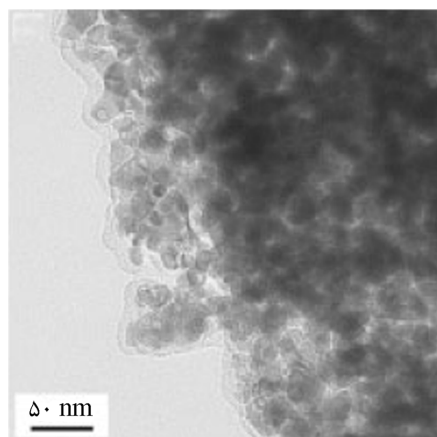
اثر تابش UV بر رسانندگی و خواص نوری پلیمرهای پوشش یافته با فیلم سل-ژل ITO

در پژوهشی که Asakuma و همکاران در سال ۲۰۰۳ در زمینه مطالعه اثر تابش روی سل-ژل‌های تهیه شده در دمای کم انجام دادند، فیلم ITO روی ورقه‌های پلی اتیلن ترفتالات (PET)، پلی ایمید (PI)، پلی کربنات (PC) و پلی اتر اترکتون (PEEK) به روش سل-ژل تهیه شد.

سپس، این فیلم با لیزر فرابنفش ArF (193 nm) در شرایط ملایم



(الف)



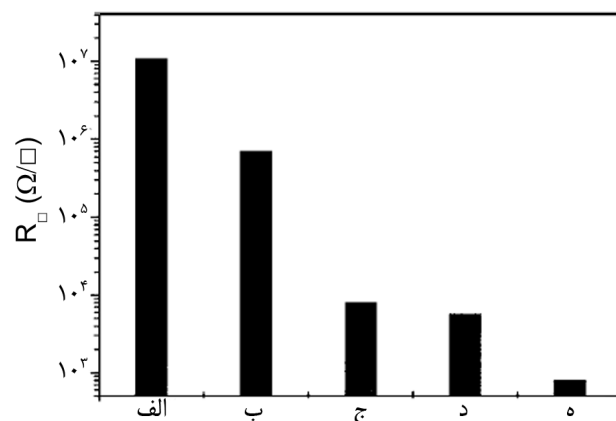
(ب)

شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری پوشش ITO/MPTS پس از: (الف) گرمادهی در دمای ۱۳۰°C و (ب) پخت UV [۲۵].

بسترهای پلی کربنات (PC)، پلی متیل متاکریلات (PMMA) و پلی استر را با تابش UV (10 J/cm^2) یا گرمادهی در دمای ۱۳۰°C تهیه کردند [۲۵]. مقاومت ویژه نمونه تابش دهی شده با UV برابر $0.4 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ و مقاومت الکتریکی سطحی آن $8 \text{ k}\Omega/\square$ گزارش شد که بسیار کمتر از شرایط گرمادهی بود. بر اساس نظر پژوهشگران، ساختار نمونه تابش دهی شده با UV دارای نانوذرات ITO چسبیده تر و متراکم تر است (شکل ۴) و همین تفاوت ساختاری موجب تفاوت چشمگیر مقادیر مقاومت الکتریکی نمونه‌ها می‌شود [۲۵].

اثر زبری سطح بر رسانندگی و خواص نوری پلیمرهای پوشش‌یافته با فیلم سل-ژل ITO

در سال ۲۰۰۸، Münstedt و Königer پژوهشی را با هدف مطالعه رفتار الکتریکی فیلم‌های ITO سل-ژل انجام دادند. آن‌ها نانوذرات ITO پراکنده شده در اتانول را به شکل فیلم روی بسترهای پلیمری



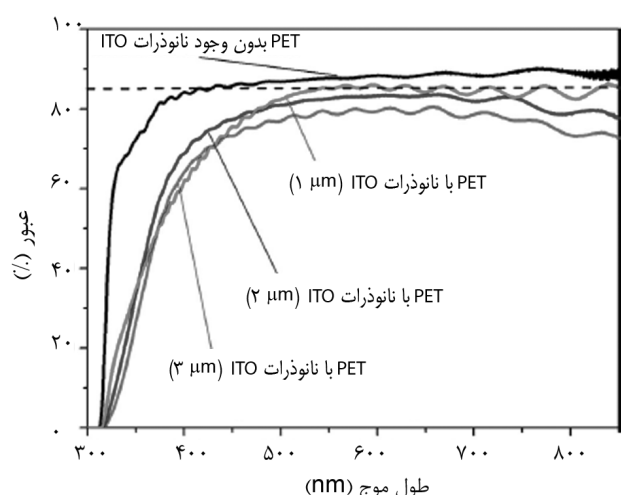
شکل ۳- مقاومت سطحی پوشش‌های ITO/MPTS (۶٪ حجمی) روی بستر PC با ضخامت ۵۷۰ nm پس از: (الف) پوشش دهی، (ب) ۱۰ h گرمادهی در دمای ۱۳۰°C، (ج) تابش دهی UV (10.5 mW/cm^2 و ۱۱۰ s)، (د) فرایند ج و ۱۰ h گرمادهی مجدد در دمای ۱۳۰°C و (ه) فرایند د و قرارگرفتن در اتمسفر کنترل شده (گاز N_2) در دمای ۱۳۰°C به مدت ۲ h [۲۳].

لایه‌ای با ضخامت ۵۶۰ nm به همراه شفافیت زیاد (۸۷٪) به دست آمد [۲۳]. در شکل ۳ مقاومت نمونه‌های پلی کربناتی پوشش یافته دارای فیلم ITO/MPTS (۶٪ حجمی) در ضخامت ۵۷۰ nm اثر فرایندهای مختلف نشان داده شده است. آن‌ها گزارش کردند، تابش دهی UV نمونه‌ها (10.5 mW/cm^2 و ۱۱۰ s) نسبت به فرایند گرمادهی (۱۳۰°C به مدت ۱۰ h)، سبب کاهش چشمگیر مقاومت الکتریکی می‌شود. مقاومت الکتریکی نمونه تابش دیده و گرمادهی در این شرایط، در مقایسه با نمونه‌ای که تنها با UV تابش دهی شده است، کاهش بیشتری نشان می‌دهد. کمترین مقاومت الکتریکی متعلق به نمونه‌ای است که در شرایط گفته شده تابش دهی و گرمادهی شود و سپس ۲ h در جو کنترل شده (گاز N_2) در دمای ۱۳۰°C قرار گیرد. در شکل ۳، مقادیر مختلف مقاومت، به دلیل شکل‌شناسی‌های گوناگون نمونه در اثر فرایندهای مختلف، گزارش شده است. در توضیح این پدیده گفته شد، تابش UV و در پی آن گرمادهی، در مقایسه با حالتی که فقط گرمادهی شود، تراکم بیشتر نانوذرات را به دنبال دارد. در این شرایط، ساختار پوشش متراکم‌تر و رسانش بیشتر می‌شود. همچنین، تابش UV و در پی آن کاهش جو N_2 ، سبب کاهش غلظت گونه‌های اکسیژن جذب شده شیمیایی بر سطح ذرات ITO می‌شود که به عنوان تله‌های سطحی الکترون‌های آزاد عمل می‌کنند. در این حالت، رسانش افزایش می‌یابد [۲۳].

در سال ۲۰۰۴، Puetz و همکاران نتایج مشابهی را منتشر کردند [۲۵]. آن‌ها فیلم‌های سل-ژل ITO/MPTS پوشش‌یافته روی

جدول ۲- مقاومت الکتریکی سطحی و مقاومت الکتریکی ویژه فیلم‌های PET، PEN، PEEK و PI دارای نانوذرات ITO [۲۶].

مقاومت الکتریکی حجمی ($\Omega \cdot \text{cm}$)	مقاومت الکتریکی سطحی ($\text{k}\Omega/\square$)	بیشینه دمای گرمادهی ($^{\circ}\text{C}$)	بستر پلیمری
۰/۶	۲	۲۰۰	PET
۰/۹	۳	۲۰۰	PEN
۳/۰	۱۰	۳۰۰	PEEK
۱/۵	۵	۴۰۰	PI



شکل ۶- درصد عبور نور در ناحیه نور مرئی برای PET خالص و PET دارای مقادیر متفاوتی از فیلم ITO [۲۶].

به منظور مطالعه اثر نانوذرات ITO بر شفافیت فیلم‌های PET گزارش کردند، فیلم PET با ضخامت $100 \mu\text{m}$ و بدون وجود نانوذرات ITO، در ناحیه طیف مرئی شفافیت زیاد ۸۵٪ نشان می‌دهد [۲۶]. اما فیلم‌های PET دارای ITO، از شفافیت کمتری نسبت به حالت بدون نانوذرات ITO برخوردارند. با افزایش غلظت و مقدار نانوذرات، شفافیت نمونه‌ها کاهش می‌یابد [۲۶].

در شکل ۶، درصد عبور نور در طیف نور مرئی برای نمونه‌های مختلف از فیلم PET دارای نانوذرات ITO را می‌توان مشاهده کرد.

نتیجه‌گیری

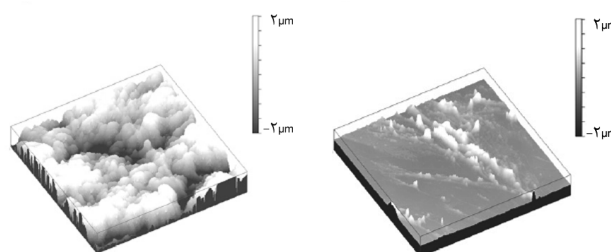
پوشش‌های رسانای دارای نانوذرات ITO روی بسترهای پلیمری را می‌توان به روش سل-ژل و پس از آن، پخت UV یا گرمادهی در دماهای کم (130°C) و در نهایت، کاهش اتمسفر کنترل شده تهیه کرد. به منظور افزایش چسبندگی نانوذرات ITO و دستیابی

انعطاف‌پذیر پلی اتیلن ترفتالات (PET)، پلی اتیلن نفتنات (PEN)، پلی اتر اتر کتون (PEEK) و پلی ایمید (PI) به روش پوشش‌دهی چرخشی، با ضخامت یکسان، به مدت ۲۰ min، در بیشینه دمای پایداری این پلیمرها قرار دادند [۲۶].

فیلم‌های ITO پوشش‌یافته روی بسترهای PET و PEN با برخورداری از سطح یکنواخت‌تر و صاف‌تر و زبری سطحی کمتر نسبت به PEEK و PI، مقاومت الکتریکی سطحی کمتری نشان دادند (جدول ۲). در حقیقت، زبری سطحی پلیمرها نسبت به اثر گرما بر مقاومت الکتریکی پوشش‌های دارای نانوذرات ITO اثرگذارتر است، به گونه‌ای که در PEEK و PI، با وجود برخورداری از امکان اعمال گرمای بیشتر نسبت به PET و PEN، رسانش کمتری گزارش شده است [۲۶].

در پژوهشی که Puetz و همکاران در سال ۲۰۰۴ به منظور پی‌بردن به اثر سطح پلیمرها بر مقاومت الکتریکی انجام دادند، دو نمونه PEEK، یکی با سطح صاف‌تر و دیگری با سطح زبرتر مقایسه شدند [۲۵]. مقاومت الکتریکی سطحی PEEK پوشش‌یافته با نانوذرات ITO با سطح صاف و یکنواخت‌تر $10 \text{ k}\Omega/\square$ و برای نمونه با سطح زبرتر $20 \text{ k}\Omega/\square$ گزارش شد (ضخامت هر دو نمونه $3 \mu\text{m}$ است) [۲۵]. در شکل ۵، سطح هر دو نمونه پلیمری PEEK نشان داده شده است.

Königer و Münstedt در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۸،



شکل ۵- تصاویر AFM از سطح PEEK: (الف) دارای سطح صاف‌تر و (ب) دارای سطح زبرتر [۲۶].

نوری بسترهای پلیمری به دلیل فوتون‌های منتشر شده در مدت تابش جلوگیری شود. همچنین، تفاوت در شکل‌شناسی سطح بسترهای پلیمری سبب تفاوت چشم‌گیر مقادیر مقاومت الکتریکی نمونه‌ها می‌شود. بستر دارای زبری سطحی کمتر، سطحی یکنواخت و همگون دارد که به رسانایی بیشتر فیلم منجر می‌شود.

مراجع

1. Rupprecht L., *Conductive Polymers and Plastics, Industrial Applications*, William Andrew, Norwich, 1st ed., 1-293, 1999.
2. Gornicka B., Mazur M., Sieradzka K., Prociow E., and Lapinski M., Antistatic Properties of Nanofilled Coatings, *Acta Phys. Polym. A.*, **117**, 869-872, 2010.
3. Kaneto K., Tsuruta M., Sakai G., Cho W., and Ando Y., Electrical Conductivities of Multi-Wall Carbon Nano Tubes, *Synth. Met.*, **103**, 2543-2546, 1999.
4. Kim S.S., Choi S.Y., Park C.G., and Jin H.W., Transparent Conductive ITO Thin Films Through the Sol-Gel Process Using Metal Salts, *Thin Solid Films*, **347**, 155-160, 1999.
5. Su C., Sheu T.K., Chang Y.T., Wan M.A., Feng M.C., and Hung W.C., Preparation of ITO Thin Films by Sol-Gel Process and Their Characterizations, *Synth. Met.*, **153**, 9-12, 2005.
6. Wei Q., Zheng H., and Huang Y., Direct Patterning ITO Transparent Conductive Coatings, *Sol. Energ Mater. Sol. Cells*, **68**, 383-390, 2001.
7. Sun K. and Ouyang J., Polymer Solar Cells Using Chlorinated Indium Tin Oxide Electrodes with High Work Function as the Anode, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **96**, 238-243, 2012.
8. Li X., Xu X., Yin X., Li C., and Zhang J., A Sol-Gel Method to Synthesize Indium Tin Oxide Nanoparticles, *Particuology*, **9**, 471-474, 2011.
9. Sytychkova A., Zola D., Bailey L., Mackenzie B., Proudfoot G., Tian M., and Ulyashin A., Depth Dependent Properties of ITO Thin Films Grown by Pulsed DC Sputtering, *Mater. Sci. Eng. B.*, **178**, 586-592, 2013.
10. Psuja P., Hreniak D., and Strek W., The Influence of Sintering Temperature and Sn^{4+} Concentration on Electrical and Optical Properties of ITO Nanocrystallites, *2nd National Conference on Nanotechnology*, Iran, 17-20 November, 1-8, 2009.
11. Jafari M., Rahimi A., Shokrolahi P., and Langroudi A.E., Syn-

thesis of Antistatic Hybrid Nanocomposite Coatings Using Surface Modified Indium Tin Oxide (ITO) Nanoparticles, *J. Coat. Technol. Res.*, **11**, 587-593, 2014.

12. Ding X., Yan J., Li T., and Zhang L., Transparent Conductive ITO/Cu/ITO Films Prepared on Flexible Substrates at Room Temperature, *Appl. Surf. Sci.*, **258**, 3082-3085, 2012.

13. Wolf N., Rydzek M., Gerstenlauer D., Arduini-Schuster M., and Manara J., Low Temperature Processing of Redispersed Tin Doped Indium Oxide Nanoparticle Coatings, *Thin Solid Films*, **532**, 60-65, 2013.

14. Yang Y., Zhou Y., Ge J., and Yang X., Optically Active Polyurethane@Indium Tin Oxide Nanocomposite: Preparation, Characterization and Study of Infrared Emissivity, *Mater. Res. Bull.*, **47**, 2264-2269, 2012.

15. Gilstrap R.A., Capozzi C.J., Carson C.G., Gerhardt R.A., and Summers C.J., Synthesis of a Nonagglomerated Indium Tin Oxide Nanoparticle Dispersion, *Adv. Mater.*, **20**, 4163-4166, 2008.

16. Kim H.W. and Kim Y.I., Characteristics of Indium-Tin-Oxide Nanoparticles Prepared by Controlled Chemical Coprecipitation Method, *Bull. Korean Chem. Soc.*, **29**, 1827-1830, 2008.

17. Sung Y.M., Electrochemical Characteristics of Indium Tin Oxide Nanoparticles Prepared by Sol-Gel Combustion Hybrid Method, *J. Electric. Eng. Technol.*, **6**, 414-417, 2011.

18. Goebbert C., Nonninger R., Aegerter M.A., and Schmidt H., Wet Chemical Deposition of ATO and ITO Coatings Using Crystalline Nanoparticles Redispersable in Solutions, *Thin Solid Films*, **351**, 79-84, 1999.

19. Guenther G., Schierner G., Theissmann R., Kruk R., Schmechel R., Baetz C., and Prodi-Schwab A., Formation of Metallic Indium-Tin Phase from Indium-Tin-Oxide Nanoparticles Under Reducing Conditions and Its Influence on the

- Electrical Properties, *J. Appl. Phys.*, **104**, 034501-034510, 2008.
20. Senthilkumar V., Senthil K., and Vickraman P., Microstructural, Electrical and Optical Properties of Indium Tin Oxide (ITO) Nanoparticles Synthesized by Co-precipitation Method, *Mater. Res. Bull.*, **47**, 1051-1056, 2012.
 21. Xu B.Q., Feng R.K., Yang B., and Deng Y., Effect of Sn⁴⁺ Content on Properties of Indium Tin Oxide Nanopowders, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, **20**, 643-648, 2010.
 22. Asakuma N., Fukui T., Toki M., and Imai H., Low-Temperature Synthesis of ITO Thin Films Using an Ultraviolet Laser for Conductive Coating on Organic Polymer Substrates, *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, **27**, 91-95, 2003.
 23. Aegerter M.A. and Al-Dahoudi N., Wet-Chemical Processing of Transparent and Antiglare Conducting ITO Coating on Plastic Substrates, *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, **27**, 81-89, 2003.
 24. Liu J., Wu D., and Zeng S., Influence of Temperature and Layers on the Characterization of ITO Films, *J. Mater. Proc. Technol.*, **209**, 3943-3948, 2009.
 25. Püetz J., Al-Dahoudi N., and Aegerter M.A., Processing of Transparent Conducting Coatings Made with Redispersible Crystalline Nanoparticles, *Adv. Eng. Mater.*, **6**, 733-737, 2004.
 26. Königer T. and Münstedt H., Coatings of Indium Tin Oxide Nanoparticles on Various Flexible Polymer Substrates: Influence of Surface Topography and Oscillatory Bending on Electrical Properties, *J. Soc. Inf. Disp.*, **16**, 559-568, 2008.