

تاثیر ترمیم سطح ITO با استفاده از پلاسمای هوا بر عملکرد دیودهای نورگسیل آلی

مسعود یحیی | محمد رضا فدوی اسلام*

دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان، دامغان، سمنان

چکیده: در این پژوهش، دیودهای نور گسیل آلی (OLED) با ساختار Glass/ITO/PEDOT:PSS/Alq₃/Al به روشهای لایه نشانی چرخشی و تبخیر حرارتی ساخته شدند. در دیودها از اکسید ایندیوم آلایش شده با قلع (ITO) به عنوان آند استفاده شد. لایه های ITO با پلاسمای هوا در توان ۸۰ وات و تحت زمانهای ۴، ۶ و ۸ دقیقه ترمیم شدند. ساختار ITOها با پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) و ویژگی نوری آنها با طیف سنجی مرئی - فرابنفش (UV-vis) مطالعه شدند. نتایج شناسایی ساختاری و نوری ITOها نشان داد که ترمیم سطح ITOها باعث بهبود ویژگی ساختاری آنها می شود ولی تاثیر ناچیزی بر عبور انوری آنها دارد. به منظور بررسی تاثیر ترمیم سطح ITO بر عملکرد OLEDها مشخصه یابی جریان - ولتاژ و طیف سنجی نورگسیل آنها انجام شد. ترمیم سطح ITO باعث کاهش ولتاژ آستانه از ۵/۷ به ۲ ولت و افزایش شدت طیف گسیلی دیودها شده است.

واژگان کلیدی: دیود نور گسیل آلی، اکسید ایندیوم آلایش شده با قلع، پلاسمای هوا، ترمیم

*m.r.fadavieslam@du.ac.ir

این دیودها می تواند شامل آند، لایه انتقال دهنده حفره ها، لایه نورگسیل، لایه انتقال دهنده الکترون ها و کاتد باشد [۵]. معمولاً در دیودهای نورگسیل آلی اکسید ایندیوم آلایش شده با قلع (ITO) به عنوان آند به دلیل رسانندگی الکتریکی بالا، شفافیت بالا در ناحیه نور مرئی، گاف نوری و تابع کار بالا و پایداری شیمیایی بکار گرفته می شود [۶-۹].

معمولاً ویژگی های سطح ITO در اتصال مناسب آن به لایه انتقال دهنده حفره ها و تزریق حفره ها موثر است. این تاثیر در عملکرد دیود از جهت درخشندگی، کارایی و طول عمر آن دارای

۱- مقدمه

دیودهای نورگسیل آلی (OLEDs) به دلیل داشتن قابلیت استفاده در نمایشگرهای صفحه تخت و پروسه های روشنایی توجه زیادی را به خود جلب کرده اند. آنها در مقایسه با سایر منابع نوری سبک هستند و هزینه تولید و مصرف انرژی پایین دارند و علاوه بر آن دارای قابلیتها زاویه دید بزرگ، بازدهی خوب، صفحه تخت، زمان پاسخ سریع و انعطاف پذیری هستند [۱-۴]. ساختار

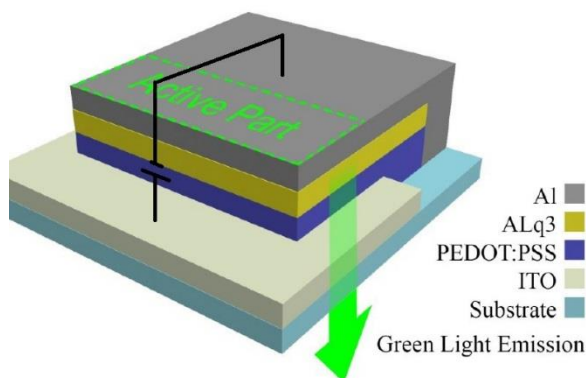
¹ Organic Light Emitting Diodes

در آنها نمونه‌های S_1 ، S_2 ، S_3 و S_4 بکارگرفته شدند به ترتیب D_1 ، D_2 ، D_3 و D_4 نامگذاری شدند. شکل (۲) نور گسیلی از دیود را نشان می‌دهد.

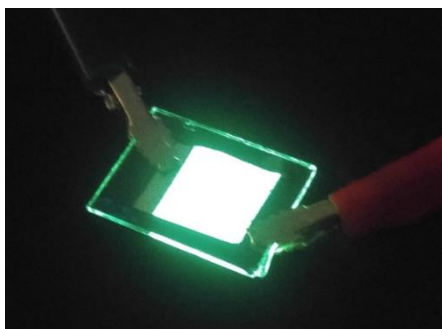
۲-۲- تجهیزات و مواد شیمیایی

در این پژوهش از دستگاه پلاسمای Diener (Tetra) استفاده شد. طیف سنجی پرتو ایکس (XRD) با دستگاه مدل ADVANCE-BRUKER D8 ($\text{CuK}\alpha$) با گسیل خط طیفی (1.5405 \AA) و ریختار توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مدل HITACHI S-4160 و مورفولوژی توسط میکروسکوپ نیروی اتمی مدل AFM: 95-50-EDME انجام شد. طیف سنجی مری-فرابنفش با UV-vis double beam spectrometer 480 برای اندازه‌گیری تغییرات جریان بر حسب ولتاژ دیودها از دستگاه Agilent U2722A استفاده شد. طیف سنجی نور گسیلی دیودها با STS microspectrum ocean optics انجام شد.

لایه‌های نازک ITO با مقاومت سطحی $9-15 \Omega/\text{sq}$ و ضخامت $1400-1200 \text{ \AA}$ از شرکت لومتک تایوان تهیه شد. ماده‌های شیمیایی PEDOT:PSS و Alq_3 نیز از شرکت لومتک تایوان تهیه شدند.



شکل ۱: ساختار دیو نور گسیل آلی



اهمیت است [۱۰-۱۲]. ترمیم سطح با از بین بردن آلاینده‌های سطح و همگن کردن آن، اتصال اهمی بین آند و لایه انتقال حفره‌ها را بهبود می‌بخشد و همچنین، با کاهش سد پتانسیل بین ایندو بدلیل افزایش تابع کار ITO در اثر ترمیم، تزریق حاملها را افزایش می‌دهد [۱۲-۱۵]. روشهای متنوعی برای ترمیم سطح مانند پالش مکانیکی، اوزن-فرا بنفش، اسید، پراکسید هیدروژن، الکتروشیمیایی و پلاσμα وجود دارند [۶، ۱۰، ۱۶، ۱۷]. ترمیم سطح ITO توسط پلاسمای هوا بکارگرفته شده است [۱۲، ۱۳، ۱۸، ۱۹].

در این پژوهش، اثر ترمیم سطح ITOs با پلاسمای هوا تحت زمانهای متفاوت بر ویژگی ساختاری و نوری آنها بررسی شده است. سپس، تاثیر ترمیم سطح آند برروی عملکرد دیودهای ساخته شده با ساختار Glass/ITO/PEDOT:PSS/Alq3/Al بررسی شده است.

۲- بخش تجربی

۲-۱- ترمیم آندها، ساخت دیودها

لایه‌های ITO در ابعاد $2 \times 2 \text{ cm}^2$ برش داده شدند. با توجه به ضخامت ناچیز لایه‌ها برای جلوگیری از اتصال کوتاه شدن دیودها قسمتی از آنها با ماسک گذاری و با بکارگیری محلول‌های هیدروکلرید اسید و سیتریک اسید از روی بستر شیشه‌ای پاک شدند. سپس، نمونه‌ها به ترتیب در محلولهای آب و صابون، استون، اتانول، پروپانول و آب دی یونیزه به مدت ۱۵ دقیقه در دستگاه اولتراسونیک در دمای 27°C درجه سانتی گراد شستشو شدند. نمونه‌های تمیز شده در دستگاه پلاσμα در محیط هوا و با توان ۸۰ وات تحت زمانهای ۴، ۶ و ۸ دقیقه قرار گرفتند تا سطح آنها توسط پلاσμα ترمیم یابد. نمونه ترمیم نشده و ترمیم شده تحت زمانهای ۴، ۶ و ۸ دقیقه به ترتیب S_1 ، S_2 ، S_3 و S_4 نامگذاری شدند.

پس از شناسایی ساختاری و نوری نمونه‌ها مطابق طرحواره شکل (۱) دیودهای نورگسیل آلی ساخته شدند. برای ساخت دیودها لایه PEDOT:PSS به روش چرخشی برروی لایه‌های ITO لایه نشانی شدند. سپس، لایه نشانی Alq_3 و Al به ترتیب بروی لایه PEDOT:PSS به روش تبخیر حرارتی انجام شد. دیودهایی که

شکل ۲: نور گسیلی از دیود

$$D_s = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

که در آن k مقدار ثابت و برابر با 0.9 ، λ طول موج پرتو ایکس و برابر با 0.154 nm ، β نیم پهنا در نصف ارتفاع و θ زاویه براگ است. نتایج این محاسبات در جدول (۱) ارائه شده است. مطالعه این نتایج نشان می‌دهد که اندازه نانو بلورکها در اکثر نمونه‌ها برای راستای (۴۰۰) نسبت به سایر راستاها بیشتر است که رشد بلوری بهتر در این راستا را نسبت به سایر راستاهای بلوری بیان می‌کند. علاوه بر آن اندازه نانوبلورکها برای نمونه S_2 نسبت به سایر نمونه‌ها تقریباً بزرگتر است.

میکروکنش ناشی از تغییر شکل شبکه و اندازه‌ی نانو بلورکها از رابطه هالدر واگنر [۲۳] بدست می‌آید:

$$\beta_{hkl}^2 = \beta_L \beta_{hkl} + \beta_G^2 \quad (2)$$

که در آن β_L و β_G به ترتیب پهن‌شدگی وابسته به توزیع‌های لورنتسی و گاوسی هستند. در روش هالدر واگنر، اندازه بلورک (D_{H-W}) و میکروکنش شبکه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\left(\frac{\beta_{hkl}^*}{d^*}\right)^2 = \left(\frac{1}{D}\right) \left(\frac{\beta_{hkl}^*}{d^*}\right) + \left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^2 \quad (3)$$

که در آن ε میکروکنش، $\beta_{hkl}^* = \beta_{hkl} \cos \theta / \lambda$ و $d^* = 2 \sin \theta / \lambda$ هستند. در این روش نمودار $\left(\frac{\beta_{hkl}^*}{d^*}\right)^2$

(محور y) برحسب $\left(\frac{\beta_{hkl}^*}{d^{*2}}\right)$ (محور x) مربوط به شدیدترین قله‌های صفحات hkl رسم می‌شود. اندازه بلورکها از معکوس کردن شیب برازش خطی و میکروکنش از ریشه عرض از مبدأ به دست آمده است. نتایج این محاسبات در جدول (۱) ارائه شده است. علامت منفی کرنش نشان می‌دهد که ساختار در معرض کرنش فشاری قرار گرفته است. این محاسبات نشان می‌دهند که ترمیم ITO تحت پلاسما سبب افزایش اندازه متوسط نانوبلورکها شده است.

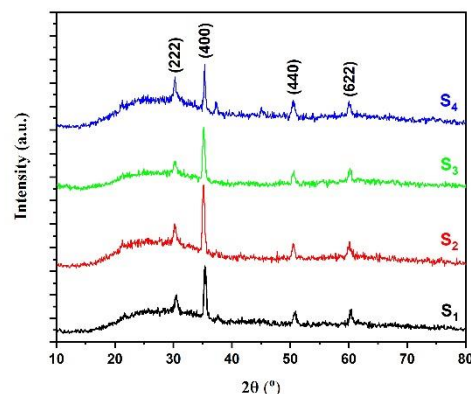
۳-۲- ریخت شناسی سطح

شکل (۴) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) از سطح نمونه های ITO را در مقیاس 200 nm نشان می‌دهد. مطالعه این شکل مشخص می‌کند دانه‌ها

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خواص ساختاری

طیف سنجی پراش پرتو ایکس به منظور تعیین ساختار لایه‌های نازک ITO انجام شد و طیفهای مقایسه‌ای آنها در شکل (۳) ارائه شده است. مطالعه این شکل نشان می‌دهد که تمام لایه‌ها ساختار چند بلوری دارند و دارای چهار قله ترجیحی در 2θ تقریباً برابر با 30.57° ، 37.51° ، 50.11° و 60.45° به ترتیب متناظر با راستای صفحات (۲۲۲)، (۴۰۰)، (۴۰۰) و (۶۲۲) هستند که مربوط به فاز مکعبی ساختار In_2O_3 هستند که با کارت استاندارد JCPDS no-06-0416 تطابق دارند [۲۰]. سایر قله‌های متناظر با فازهای In_2O_3 و عناصر Sn و In ترکیبات آنها در طیفهای XRD مشاهده نمی‌شود. افزون بر آن قله ترجیحی برای تمام نمونه‌ها در راستای (۴۰۰) است و ترمیم نمونه‌ها توسط پلاسما هوا تغییر عمده‌ای در ساختار آنها ایجاد نکرده است، ولی شدت قله‌های پراش را تغییر داده است [۲۱]. بطوری که شدت قله پراش مربوط به راستای (۴۰۰) برای نمونه‌های ترمیم شده تحت پلاسما هوا به مدت ۴ و ۶ دقیقه نسبت به نمونه‌ی ترمیم نشده افزایش یافته است که حدس زده می‌شود که ساختار آنها بهبود یافته است.



شکل ۳: طیفهای مقایسه‌ای XRD نمونه های ITO

برای بررسی دقیق تر خواص ساختاری نمونه ها اندازه نانو بلورکها و متوسط اندازه آنها محاسبه شد. اندازه نانو بلورکها (D_s) توسط رابطه شرر تعیین شده است [۲۲]:

شکل ۴: تصاویر FESEM نمونه های ITO (الف) S₁، (ب) S₂، (ج) S₃ و (د) S₄

مطالعات بر دیودها (OLEDs) نشان می دهد که مورفولوژی سطح آند (ITO) نقش مهمی در کارایی حفره دارد [۲۶]. بنابراین به منظور افزایش پایداری و کارایی دیودها باید بتوان کنترل لازم بر ریخت‌شناسی آندها داشت [۷]. به طوری که پژوهشها نشان می‌دهد که با نرم تر کردن سطح آندها کارایی دیودها به دلیل افزایش قابل توجه تزریق حاملها، افزایش می‌یابد. بنابراین اتصال مناسب بین آند و لایه انتقال حفره در اثر ترمیم باعث بهبود تزریق حفره از آند می شود [۲۶]. بنابراین، با هدف بررسی مورفولوژی سطح نمونه های ITO تصاویر دو و سه بعدی از آنها توسط میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) گرفته شد و در شکل (۵) ارائه شده است. متوسط زبری نمونه های S₁، S₂، S₃ و S₄ بترتیب ۲٫۳۴، ۰٫۷۲، ۰٫۶۵ و ۰٫۸۶ nm هستند و همچنین، انحراف معیار بررسی به ترتیب ۵٫۶۱، ۰٫۹۲، ۰٫۸۸ و ۱٫۱۵ nm بررسی شدند. مطالعه شکل (۵) و نتایج محاسبات زبری سطح نمونه‌ها نشان می‌دهد که ترمیم آنها باعث شده که ریخت‌شناسی سطح آنها بهبود و زبری آنها نیز کاهش یابد [۲۷].

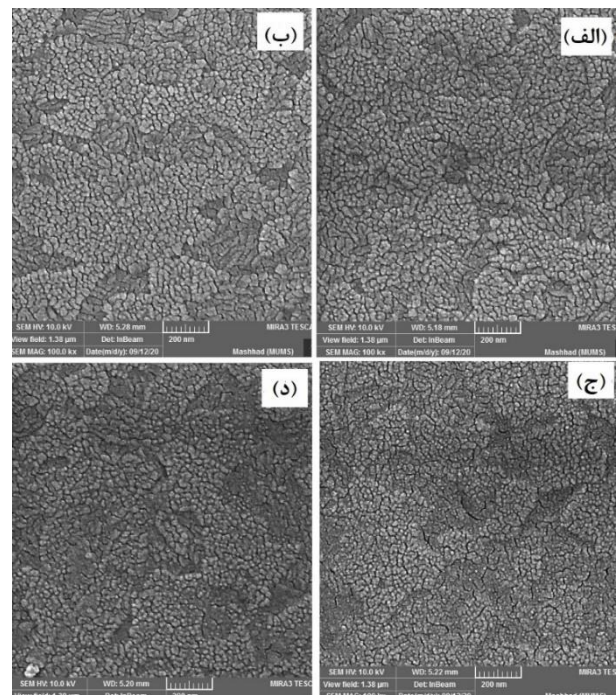
آند در دیودهای نورگسیل آلی باید شفاف باشد تا نور دیود بتواند به راحتی از آن عبور کند. بنابراین، برای مطالعه شفافیت آندها طیف عبوری آنها در گستره طول موج ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر با طیف سنج فرابنفش-مرئی اندازه گیری شدند. طیفهای مقایسه-ای عبورنوری آندها برحسب طول موج در شکل (۶) نمایش داده شده است. مطالعه این شکل نشان می‌دهد که عبور نمونه ها با افزایش طول موج روند افزایش دارند و مقدار متوسط عبور آنها در گستره نور مرئی تقریباً برابر ۹۸٪ می باشد و شفافیت آنها برای طول موج ۵۲۵ nm که از لایه نورگسیل دیود (Alq₃) گسیل می شود، مناسب هستند. افزون بر آن مقادیر عبور نوری لایه های ITO تحت تاثیر پلاسمای هوا صرفنظر از مدت زمان قرارگرفتن در محیط پلازما تغییر ناچیزی می‌کند [۲۱، ۲۴، ۲۵].

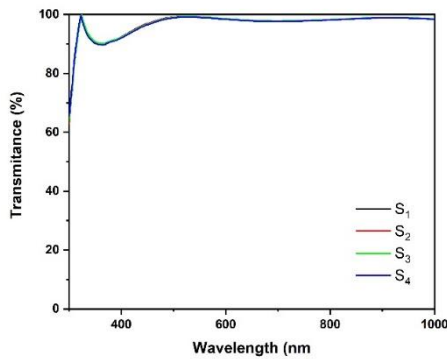
شکل (۷) نمودارهای مقایسه ای جریان - ولتاژ دیود را نشان می‌دهد. مطالعه این شکل رفتار دیودی قطعات را نشان می دهد. ولتاژ آستانه دیودهای D₁، D₂، D₃ و D₄ به ترتیب ۵٫۷، ۲، ۲٫۵ و ۳٫۲ ولت اندازه گیری شدند. این نتایج نشان می‌دهد که ولتاژ آستانه دیودها با ترمیم آندها کاهش یافته است [۲، ۱۹]. این

تقریباً کروی هستند و ترمیم در اثر پلازما در ریختار نمونه‌ها تاثیر ناچیزی داشته است [۲۴، ۲۵]. با این وجود سطح نمونه ها در اثر ترمیم توسط پلازما نرمتر شده است [۱۴]. اندازه متوسط دانه‌ها برای لایه‌های ترمیم نشده و ترمیم شده توسط پلازما در مدت زمانهای ۴، ۶، ۸ دقیقه به ترتیب ۳۷، ۳۳، ۳۴ nm هستند.

جدول ۱: مشخصات ساختاری محاسبه شده در نمونه های مورد مطالعه

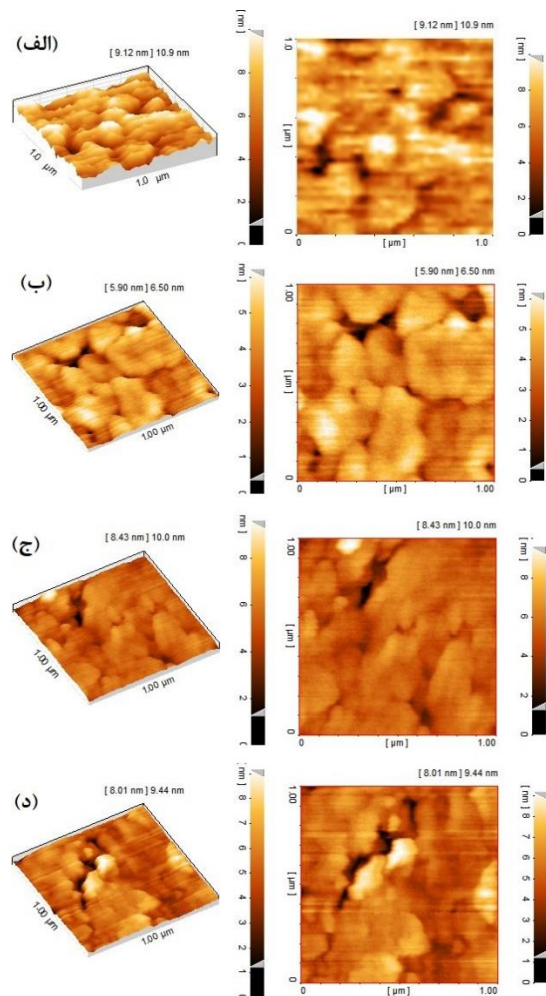
نمونه	(hkl)	2θ (°)	FWHM (°)	D _s (nm)	D _{w-H} (nm)	ε (×10 ⁻³)
S ₁	(۲۲۲)	۳۰٫۵۷	۰٫۷	۱۱٫۷۶	۱۲٫۲	-۱۴٫۳
	(۴۰۰)	۳۵٫۵۱۷	۰٫۴۷۷	۱۷٫۴۸		
	(۴۴۰)	۵۰٫۸۱	۰٫۶۷	۱۳٫۱۲		
	(۶۲۲)	۶۰٫۴۵	۰٫۴۴	۲۰٫۸۹		
S ₂	(۲۲۲)	۳۰٫۲۷۲۲	۰٫۴۵	۱۸٫۲۸	۲۰٫۸۶	-۲٫۷۹
	(۴۰۰)	۳۵٫۲۳۳	۰٫۳۶۳۳	۲۲٫۹۳		
	(۴۴۰)	۵۰٫۵۴۳۸	۰٫۴۹۴۸	۱۷٫۷۵		
	(۶۲۲)	۶۰٫۱۶۰۸	۰٫۵۱۹۶	۱۷٫۶۶		
S ₃	(۲۲۲)	۳۰٫۲۹۱۵	۰٫۴۴۰۴	۱۸٫۶۸	۲۱٫۵۹	-۱٫۲۸
	(۴۰۰)	۳۵٫۲۴۱۶	۰٫۳۳۸۶	۲۴٫۶۱		
	(۴۴۰)	۵۰٫۵۷۴۵	۰٫۴۴۷۸	۱۹٫۶۱		
	(۶۲۲)	۶۰٫۲۰۸۸	۰٫۵۸۱۲	۱۵٫۷۹		
S ₄	(۲۲۲)	۳۰٫۲۶	۰٫۵۵	۱۴٫۹۶	۱۵٫۰۷	-۱۱٫۴۲
	(۴۰۰)	۳۵٫۳۱	۰٫۲۵	۳۳٫۳۳		
	(۴۴۰)	۵۰٫۴۸	۰٫۶	۱۴٫۶۳		
	(۶۲۲)	۶۰٫۰۶	۰٫۵	۱۸٫۳۴		



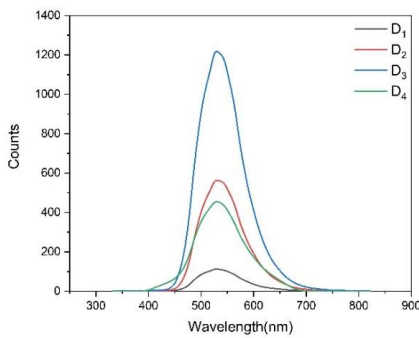


کاهش می‌تواند به دلیل تاثیر پلاسما بر سطح آندها باشد که به دلیل افزایش تابع کار ITO باعث بهبود تزریق حاملها می‌شود [۲، ۱۲، ۱۹، ۲۸]. این بهبود منجر به توازن مناسب بین جریان الکترونها و حفره ها می‌شود. در این حالت سد پتانسیل بین تابع کار ITO و PEDOT:PSS کاهش می‌یابد و حفره به آسانی به آن تزریق می‌شود و در نتیجه ولتاژ آستانه دیودها با آندهای ترمیم یافته کمتر از دیودهایی است که در آنها آند ترمیم نشده است [۲۹].

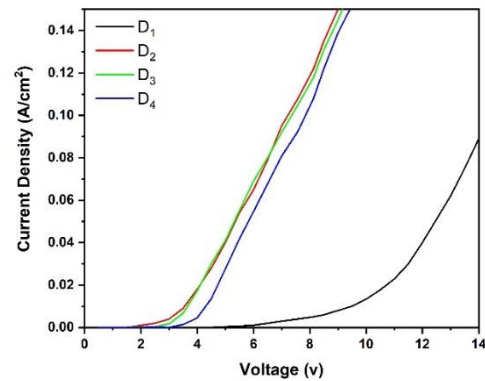
شکل ۶: طیفهای مقایسه ای عبور نوری ITOها بر حسب طول موج چگالی جریان به ازای ولتاژ اعمال شده ۸ ولت به دیودهای D_1 ، D_2 ، D_3 و D_4 به ترتیب به 7.59 ، 149.78 ، 145.35 و $139.3 \frac{mA}{cm^2}$ اندازه‌گیری شدند. این نتایج نشان می‌دهد ترمیم آند به شدت بر روی چگالی جریان دیودها تاثیر می‌گذارد و باعث افزایش آن می‌شود [۶، ۲۷]. این افزایش را می‌توان به تزریق و ترابرد مناسبتر حفره در اثر ترمیم سطح آند نسبت داد [۲۹]. همچنین این پدیده را می‌توان ناشی از حذف آلاینده ها و کاهش سد پتانسیل بین الکتروود شفاف و بالاترین اربیتال مولکولی (HOMO) مربوط به PEDOT:PSS دانست که سبب بهبود تزریق حفره و افزایش عملکرد ITO می‌شود [۲، ۲۹]. علاوه بر این کاهش زبری سطح آندها در اثر پلاسما، به استناد تصاویر AFM، باعث اتصال بهتر و چسبندگی مناسبتر بین بسیار و الکتروود می‌شود که باعث سبب افزایش کارایی تزریق حفره از آند به لایه PEDOT:PSS می‌گردد [۵، ۳۰، ۳۱]. مطالعه شکل (۷) نشان می‌دهد که ترمیم آند (ITO) باعث کاهش ولتاژ آستانه می‌شود، با این وجود افزایش مدت تحت تاثیر بودن در محیط پلاسمای هوا به بیش از ۴ دقیقه برای آندهای بکاررفته در دیودها باعث افزایش ولتاژ آستانه و کاهش چگالی جریان در آنها می‌شود. این پدیده احتمالا به این علت است که تمام دیودها با ITO ترمیم شده دارای حفره‌های اضافی در ناحیه بازترکیب هستند. تزریق بیشتر حاملها، به علت ترمیم سطح آند، باعث انحراف از حالت توازن جریانهای الکترون و حفره شده و باعث افزایش ولتاژ آستانه، کاهش چگالی جریان و کاهش کارایی دیود می‌شود [۶، ۳۲].



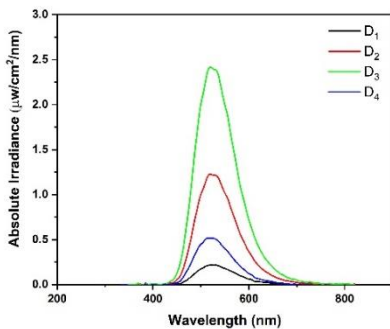
شکل ۵: تصاویر AFM نمونه های ITO (الف) S_1 ، (ب) S_2 ، (ج) S_3 و (د) S_4



شکل ۸: طیفهای مقایسه ای شدت طیف گسیلی دیودها بر حسب طول موج



شکل ۷: نمودارهای مقایسه ای جریان - ولتاژ دیودها



شکل ۹: طیفهای مقایسه ای چگالی شدت طیف گسیلی دیودها بر حسب طول موج

شکل‌های (۸) و (۹) به ترتیب چگالی تابشی و شدت تابشی مقایسه‌ای دیودها را بر حسب طول موج نشان می‌دهند. تمام طیفهای گسیلی در فاصله ۱٫۵ cm از دیودها و در چگالی جریان عبوری $120 \frac{mA}{cm^2}$ از آنها طیف‌سنجی شده‌اند. مطالعه این شکلها نشان می‌دهد که قله طیفهای گسیلی در حدود ۵۲۵ nm است که مربوط به نور سبز گسیلی از لایه نور گسیل Alq_3 در دیودها است. بنابراین، ترمیم ITOها تاثیری بر خواص نور گسیلی Alq_3 ندارد و محل قله طیف گسیلی در دیودها تغییر نمی‌کند [۳۳]. به طور کلی شدت نور گسیلی با ترمیم سطح آند افزایش می‌یابد که به دلیل تزریق حاملهای بیشتر و توازن ترابرد حاملها و بازترکیب بیشتر آنها در لایه نور گسیل در اثر ترمیم است. با این وجود مشاهده می‌شود افزایش مدت زمان ترمیم آند توسط پلاسما از ۴ به ۸ دقیقه باعث روند افزایشی - کاهشی در شدت نور گسیلی می‌شود که احتمالاً به این دلیل است که با وجود اینکه طیفهای گسیلی به ازای چگالی جریان عبوری یکسان از دیودها طیف‌سنجی شده‌اند ولی ولتاژ به ازای این چگالی جریان در دیودها متفاوت است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نشان داده شد که بطور کلی ترمیم سطح ITO توسط پلاسمای هوا باعث بهبود خواص ساختاری و کاهش زبری سطح می‌شود، ولی بر روی عبور نوری لایه‌ها تاثیر ناچیزی دارد. ساختار، اندازه نانو بلورکها و اندازه زبری سطح متأثر از مدت زمان قرار گرفتن سطح ITO در معرض پلاسمای هوا است. همچنین ترمیم سطح ITO بر روی عملکرد دیود ساخته شده از آن تاثیر دارد. به طوری که ترمیم سطح ITO باعث کاهش ولتاژ آستانه و افزایش شدت نورگسیلی دیود می‌شود. بیشترین کاهش ولتاژ آستانه مربوط به دیودی است که از ITO ساخته شده بود که به مدت چهار دقیقه تحت پلاسمای هوا قرار گرفته بود. این در حالی است که بیشترین شدت نور گسیلی مربوط به دیودی است که از ITO ساخته شده است که به مدت شش دقیقه در معرض پلاسمای هوا بوده است.

مراجع

- [12] A. Sharma, B. Kippelen, P.J. Hotchkiss, S.R. Marder, "Stabilization of the work function of indium tin oxide using organic surface modifiers in organic light-emitting diodes," *Applied Physics Letters*, 93, 163308, 2008.
- [13] J.H. Choi, E.S. Lee, S.H. Choi, H.K. Baik, K.M. Song, Y.S. Lim, S.-M. Lee, "Work function increase of indium-tin-oxide surfaces by atmospheric air plasma treatment with steady-state airflow," *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 23, 1479-1482, 2005.
- [14] T.P. Nguyen, P. Le Rendu, N.N. Dinh, M. Fourmigué, C. Mézière, "Thermal and chemical treatment of ITO substrates for improvement of OLED performance," *Synthetic Metals*, 138, 229-232, 2003.
- [15] C.H. Jeong, J.H. Lee, J.T. Lim, M.S. Kim, G.Y. Yeom, "Effects of inductively coupled plasma treatment using O₂, CF₄, and CH₄ on the characteristics of organic light emitting diodes," *Surface and Coatings Technology*, 201, 5012-5016, 2007.
- [16] Z.H. Huang, X.T. Zeng, X.Y. Sun, E.T. Kang, J.Y.H. Fuh, L. Lu, "Influence of plasma treatment of ITO surface on the growth and properties of hole transport layer and the device performance of OLEDs," *Organic Electronics*, 9, 51-62, 2008.
- [17] S.-G. Jung, K.B. Choi, C.H. Park, Y.S. Shim, C.H. Park, Y.W. Park, B.-K. Ju, "Effects of Cl₂ plasma treatment on stability, wettability, and electrical properties of ITO for OLEDs," *Optical Materials*, 93, 51-57, 2019.
- [18] E.S. Lee, J.H. Choi, H.K. Baik, "Surface cleaning of indium tin oxide by atmospheric air plasma treatment with the steady-state airflow for organic light emitting diodes," *Surface and Coatings Technology*, 201, 4973-4978, 2007.
- [19] Y. Ueda, J. Abe, H. Murata, Y. Gotoh, O. Sakai, "Control of work function of indium tin oxide: A surface treatment by atmospheric-pressure plasma layer on fabric-type electrodes," *Japanese Journal of Applied Physics*, 53, 03DG03, 2014.
- [20] M.R. Fadavieslam, "The effect of thickness of light emitting layer on physical properties of OLED devices," *Optik*, 182, 452-457, 2019.
- [21] D.-K. Hwang, M. Misra, Y.-E. Lee, S.-D. Baek, J.-M. Myoung, T.I. Lee, "The role of Ar plasma treatment in generating oxygen vacancies in indium tin oxide thin films prepared by the sol-
- [1] N. Kumar Katam, C. Singh, M. Rawat, R.S. Anand, "Effect of Chemical Treatments on ITO and OLED Device," *Advanced Materials Research*, 849, 387-390, 2014.
- [2] I.-M. Chan, W.-C. Cheng, F.C. Hong, "Enhanced performance of organic light-emitting devices by atmospheric plasma treatment of indium tin oxide surfaces," *Applied Physics Letters*, 80, 13-15, 2002.
- [3] C.C. Yap, M. Yahaya, M.M. Salleh, "Influence of thickness of functional layer on performance of organic salt-doped OLED with ITO/PVK:PBD:TBAPF6/Al structure," *Current Applied Physics*, 8, 637-644, 2008.
- [4] H. Musavi, M.R. Fadavieslam, "Improving organic light-emitting diode performance with ZnO nanoparticles," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28, 7797-7801, 2017.
- [5] R. Mahdiyari, M.R. Fadavieslam, "The effects of chemical treatment on ITO properties and performance of OLED devices," *Optical and Quantum Electronics*, 52, 262, 2020.
- [6] S.-Y. Yu, J.-H. Chang, P.-S. Wang, C.-I. Wu, Y.-T. Tao, "Effect of ITO Surface Modification on the OLED Device Lifetime," *Langmuir*, 30, 7369-7376, 2014.
- [7] F. Zhu, H. Qiao, L. Fei, K. Ong, X. Hao, "Effect of surface electronic properties of ITO on luminance efficiency of OLEDs," *SPIE*, 2004.
- [8] H.-Y. Kim, W.-S. Choi, S.-Y. Ji, Y.-G. Shin, J.-W. Jeon, S. Ahn, S.-H. Cho, "Morphologies of femtosecond laser ablation of ITO thin films using gaussian or quasi-flat top beams for OLED repair," *Applied Physics A*, 124, 123, 2018.
- [9] H. Yang, J. Kim, K. Yamamoto, X. Xing, H. Hosono, "Surface tailoring of newly developed amorphous ZnSiO thin films as electron injection/transport layer by plasma treatment: Application to inverted OLEDs and hybrid solar cells," *Applied Surface Science*, 434, 995-1000, 2018.
- [10] C.N. Li, C.Y. Kwong, A.B. Djurišić, P.T. Lai, P.C. Chui, W.K. Chan, S.Y. Liu, "Improved performance of OLEDs with ITO surface treatments," *Thin Solid Films*, 477, 57-62, 2005.
- [11] Z.H. Huang, X.T. Zeng, X.Y. Sun, E.T. Kang, J.Y.H. Fuh, L. Lu, "Influence of electrochemical treatment of ITO surface on nucleation and growth of OLED hole transport layer," *Thin Solid Films*, 517, 4810-4813, 2009.

annealing,” Journal of Molecular Structure, 1130, 327-332, 2017.

[31] G.-T. Chen, S.-H. Su, C.-C. Hou, M. Yokoyama, “Effects of Thermal Annealing on Performance of Organic Light-Emitting Diodes,” Journal of The Electrochemical Society, 154, J159, 2007.

[32] W.H. Lee, D.H. Kim, P. Justin Jesuraj, H. Hafeez, J.C. Lee, D.K. Choi, T.-S. Bae, S.M. Yu, M. Song, C.S. Kim, S.Y. Ryu, “Improvement of charge balance, recombination zone confinement, and low efficiency roll-off in green phosphorescent OLEDs by altering electron transport layer thickness,” Materials Research Express, 5, 076201, 2018.

[33] C.-T. Wei, J.-Y. Zhuang, Y.L. Chen, D.-Y. Zhang, W.-M. Su, Z. Cui, “Surface treatment on polyethylenimine interlayer to improve inverted OLED performance,” Chinese Physics B, 25, 108505, 2016.

gel process,” Applied Surface Science, 405, 344-349, 2017.

[22] ا. محمدی بادیزی، ح. مالکی، "بررسی و مقایسه ویژگی ساختاری، ریخت‌شناسی، مغناطیسی و نوری نانولایه و نانوذرات فریت کبالت،" نانومقیاس، ۷، ۹۷-۸۹، ۲۰۲۰.

[23] M.A. Tagliente, M. Massaro, “Strain-driven (002) preferred orientation of ZnO nanoparticles in ion-implanted silica,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 266, 1055-1061, 2008.

[24] H. Park, D. Kim, E.-C. Cho, S.Q. Hussain, J. Park, D. Lim, S. Kim, S. Dutta, M. Kumar, Y. Kim, J. Yi, “Effect on the reduction of the barrier height in rear-emitter silicon heterojunction solar cells using Ar plasma-treated ITO film,” Current Applied Physics, 20, 219-225, 2020.

[25] J. Lee, D. Lim, K. Yang, W. Choi, “Influence of different plasma treatments on electrical and optical properties on sputtered AZO and ITO films,” Journal of Crystal Growth, 326, 50-57, 2011.

[26] L.Y. Yang, X.Z. Chen, H. Xu, D.Q. Ye, H. Tian, S.G. Yin, “Surface modification of indium tin oxide anode with self-assembled monolayer modified Ag film for improved OLED device characteristics,” Applied Surface Science, 254, 5055-5060, 2008.

[27] S.H. Kim, S.J. Baek, Y.C. Chang, H.J. Chang, “Dependence of plasma treatment of ITO electrode films on electrical and optical properties of polymer light-emitting diodes,” physica status solidi (a), 209, 2317-2323, 2012.

[28] M.-H. Jung, H.-S. Choi, “Surface Treatment of Indium Tin Oxide Using Radio Frequency Atmospheric and Low Pressure Plasma for OLEDs,” Journal of The Electrochemical Society, 155, H334, 2008.

[29] S.-L. Zhao, Y.-S. Wang, S. Gao, Y.-F. Yang, Z. Xu, “The Effect of the Oxygen Plasma Treatment for ITO and ZnO Nanorods on the Electroluminescence of ZnO Nanorod/MEH-PPV Heterostructure Devices,” Chinese Physics Letters, 30, 037802, 2013.

[30] D. Hewidy, A.S. Gadallah, G.A. Fattah, “Electroluminescence enhancement of glass/ITO/PEDOT:PSS/MEH-PPV/PEDOT:PSS/Al OLED by thermal



The effect of ITO surface treatment by air plasma on the performance of organic light emitting diode

M. Yahya, M. R. Fadavieslam*

School of Physics, Damghan University, Damghan

Abstract: In this research, organic light-emitting diodes (OLEDs) with a glass/ITO/ PEDOT:PSS/Alq3/Al structure were fabricated by spin coating and thermal evaporation techniques. Indium tin oxide (ITO) was used as anode in the diodes. The ITO films were treated with air plasma at a power of 80 watts for 4, 6, and 8 minutes. The structure of the ITOs was investigated by X-ray diffraction (XRD), field emission scanning electron microscopy (FESEM), and atomic force microscopy (AFM), and the optical properties were studied by visible-ultraviolet (UV-vis) spectroscopy. The results of the structural and optical characterization of the ITOs showed that the surface treatment improved their structural properties but had little effect on their optical transmission. To investigate the effect of ITO surface treatment on the performance of the OLEDs, current-voltage characterization and their emission spectroscopy were performed. The ITO surface treatment had reduced the threshold voltage from 5.7 to 2 v and increased the emission spectrum of the diodes.

Keywords: Organic light emitting diode, Indium tin oxide (ITO), Air plasma, Treatment