



مقاله علمی-ترویجی

چالش‌های موجود و راهکارهای ارائه شده در مسیر توسعه فناوری دیود ساطع کننده نور آلی

- زهرا کچوئی/ گروه پژوهشی شیمی و فرآیند/ پژوهشگاه نیرو/ تهران- ایران / zahrakachoei@gmail.com
- فرزانه هاشمی نصر/ گروه پژوهشی شیمی و فرآیند/ پژوهشگاه نیرو/ تهران- ایران / f.hasheminasr@gmail.com
- مهدی صالحی راد/ گروه پژوهشی شیمی و فرآیند/ پژوهشگاه نیرو/ تهران- ایران / msalehirad@nri.ac.ir
- فرهاد اکبری برومند/ گروه الکترونیک دانشکده برق/ دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی/ تهران- ایران / boroumand@eetd.kntu.ac.ir

چکیده

دیودهای ساطع نوری آلی با توجه به مزایای هزینه ساخت پایین، مصرف انرژی کم، ولتاژ آستانه پایین، سازگاری با محیط زیست، سبک بودن و انعطاف پذیری به سرعت نسل جدید منابع نوری خواهند شد. تجاری سازی روشنایی‌های دیود ساطع نوری آلی وابسته به موفقیت در رفع چالش‌های موجود در روش تولید صنعتی، بازدهی و طول عمر سیستم است. در این مطالعه به شرح چالش‌های پیش‌رو و پیشرفت‌های اخیر در زمینه رفع این چالش‌ها در جهت توسعه دیودهای ساطع نوری آلی پرداخته شده است. بسترهای پلاستیکی انعطاف پذیر مورد استفاده، روش یکنواخت کردن الکتروود شفاف ITO، الکتروودهای رسانای شفاف جایگزین ITO، کاهش آسیب بین لایه‌ای، افزایش شدت نور و روش افزایش طول عمر مواد بکار رفته در OLED و پایداری عملکرد قطعه بررسی شده‌اند. مورد توجه‌ترین روش‌های ساخت سیستم OLED صنعتی از قبیل چاپ گلتنک به گلتنک، چاپ گراوو و چاپ جوهرافشان نیز مورد بحث و مقایسه قرار گرفته‌اند.

کلمات کلیدی: دیودهای ساطع کننده نور آلی (OLED)، چالش، راهکار، منابع نوری، انعطاف پذیر

Current Challenges and Presented Solutions in the Path of Development of Organic Light-Emitting Diodes Technology

- Zahra Kachoei/Chemistry and Process Department/Niroo Research Institute/Tehran, Iran/ zahrakachoei@gmail.com
- Farzaneh Hashemi Nasr/ Chemistry and Process Department/Niroo Research Institute /Tehran, Iran/ f.hasheminasr@gmail.com
- Mehdi Salehirad/Chemistry and Process Department/Niroo Research Institute /Tehran, Iran/ msalehirad@nri.ac.ir
- Farhad Akbari Boroumand/Assistant Prof. of Electronic Eng. K. N. Toosi University of Technology (KNTU)/ Tehran, Iran/ boroumand@eetd.kntu.ac.ir

Abstract

organic light-emitting diodes (OLEDs) are quickly becoming the next generation of lighting sources due to the following advantages: low-cost manufacture methods, low power consumption, environment compatibility, light and flexibility. Commercialization of organic light-emitting diode lightings will depend on the success of overcoming current challenges in industrial manufacture method, efficiency and life time of system. In this study, current developments

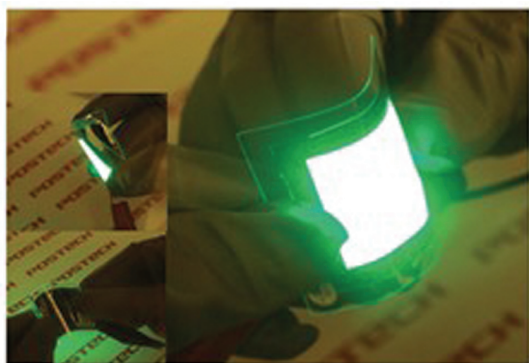
in the field of types of materials and preparation method of organic light-emitting diodes are discussed. Plastic substrates used in OLEDs, ITO smoothing method, transparent conductive electrodes replacing ITO, encapsulation methods and increasing light intensity are investigated. Most interesting manufacturing methods of OLED system such as roll-to-roll printing, gravure printing and inkjet printing are discussed and compared.

Keywords: organic light-emitting diodes (OLED), challenges, solution, lighting sources, flexible

۱- مقدمه

می‌شوند، اما دمای تخریب حرارتی ($100-150^{\circ}\text{C}$) آنها در مقایسه با بسترهای سخت به نسبت کم است. بسترهای پلاستیکی که پایداری حرارتی بالایی نشان می‌دهند، مانند پلی‌ایمیدها (PI)، به اندازه کافی شفاف نیستند. شفافیت مورد نیاز در ناحیه مرئی باید بیشتر از ۹۵٪ باشد. بسترهای شفاف‌ی مانند پلی‌کربنات (PC) نیز مقاومت حلال به نسبت کمی را نشان می‌دهند. اگرچه هنوز بستر انعطاف‌پذیر کاملی شناخته نشده است، اما پلیمرهای پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) و پلی‌اتیلن نفتالات (PEN) در حال حاضر با موفقیت در الکترونیک‌های انعطاف‌پذیر به کار می‌روند که این به دلیل خواص مکانیکی و نوری عالی آنها و همچنین مقاومت در برابر حلال و پایداری حرارتی به نسبت خوب و همچنین جذب رطوبت پایین و جذب اکسیژن ضعیف آنها است.

علی‌رغم مزایای استفاده از بسترهای پلاستیکی کم هزینه، چالش اصلی آنها انبساط حرارتی و تخریب آنها طی استفاده از فرآیندهای ساخت با دماهای بالاتر از 100°C است. چنانچه اصلاح حالت‌های نشانیدن لایه در طی رشد لایه‌ها صورت نپذیرد، می‌تواند باعث ایجاد ریزساختار آمورف لایه‌های اکسیدی شود. لایه‌های آمورف با مقاومت ورق‌های بیشتر نسبت به فاز بلوری مشخص می‌شوند که همین موجب افزایش ولتاژ آستانه OLED می‌شود.

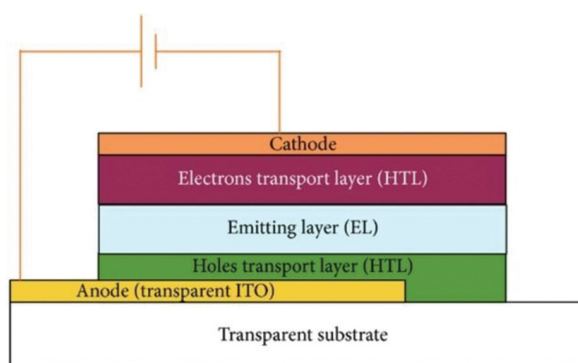


شکل ۲: تصویر OLED انعطاف‌پذیر

۳- ناهمواری سطح ماده ITO

اکسیدهای رسانای شفاف مانند ITO به دلیل پایداریشان نسبت به گذشت زمان از اهمیت و کارایی بالایی برخوردارند. لایه‌های ITO به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان الکتروود شفاف در انواع ابزارهای اپتوالکترونیکی مختلف مانند دیودهای ساطع نور آلی (OLEDs) به کار می‌روند. با این حال، برخی از مشکلات مانند تشکیل برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌ها طی روش‌های ساخت سطح لایه نازک ITO گزارش شده است که موجب تخریب کیفیت رنگ، کاهش طول عمر دستگاه و اتصال کردن به دلیل تاثیر موضعی ولتاژ می‌شود. همچنین، وابستگی شدید بین مورفولوژی سطح لایه و خواص انعکاسی آن وجود دارد. به‌عنوان مثال، در لایه‌های نازک ITO مورفولوژی سطح نقش مهمی در انتقال الکترون روی سطح لایه دارد. روش مسطح کردن به‌عنوان

دیودهای ساطع کننده نور آلی (OLED) نسل جدید منابع نوری هستند که در ساختار آن یک لایه تشکیل شده از ترکیبات آلی در پاسخ به ولتاژ الکتریکی، نور منتشر می‌کند [۱-۴]. در حالت کلی، ساختار این سیستم‌ها شامل بستر، الکتروود رسانای شفاف، لایه انتقال دهنده حفره، لایه نشر دهنده، لایه انتقال دهنده الکترون و کاتد می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱: ساختار کلی سیستم OLED

هزینه ساخت پایین، مصرف انرژی کم، ولتاژ آستانه پایین [۵-۶]، سازگاری با محیط زیست، سبک بودن و قابلیت ساخت آنها روی بسترهای انعطاف‌پذیر از جمله مزایای فناوری OLED هستند که موجب شده است این فناوری به‌شدت مورد توجه محققان قرار گیرد. علی‌رغم ویژگی‌های مثبت فناوری OLED، هنوز چالش‌هایی مربوط به انعطاف‌پذیری، پایداری و طول عمر قطعه، روش فرآیند آنها، حساسیت به رطوبت و... وجود دارد که باید قبل از تجاری‌سازی قطعات با کارکرد طولانی مدت، این چالش‌ها شناسایی شده و برطرف شود. در حال حاضر، مشکلات و موانع توسعه دیودهای نشر نور آلی انعطاف‌پذیر را می‌توان به چندین دسته کلی تقسیم کرد: ۱- انعطاف‌پذیری و پایداری حرارتی بسترهای مورد استفاده؛ ۲- ناهمواری سطح ماده ITO؛ ۳- انعطاف‌پذیری و پایداری مکانیکی الکتروود رسانای شفاف (TCE)؛ ۴- آسیب‌های بین‌لایه‌ای؛ ۵- تکنولوژی استخراج نور؛ ۶- طول عمر مواد بکار رفته در OLED و پایداری عملکرد قطعه؛ ۷- تکنولوژی ساخت قطعه؛

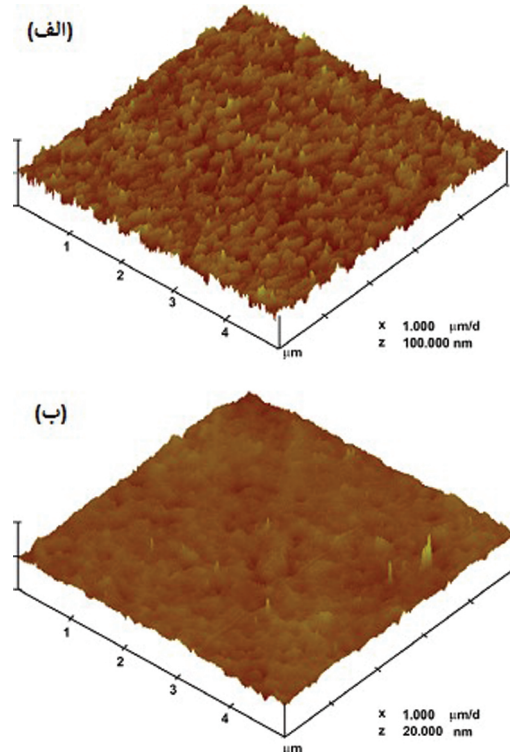
در ادامه به شرح موارد ذکر شده و توسعه پیشرفت‌های انجام شده در جهت کاهش این مشکلات پرداخته شده است.

۲- انعطاف‌پذیری و پایداری حرارتی بسترهای مورد استفاده

انواع مختلفی از بسترهای پلاستیکی که خواص مکانیکی و نوری مورد نیاز برای تهیه قطعات ساطع کننده نور آلی سبک و انعطاف‌پذیر را برآورده می‌کنند، توسعه یافته‌اند [۸-۷]، اما هنوز این‌گونه قطعات تجاری نشده‌اند. شکل (۲) تصویر OLED انعطاف‌پذیر را نشان می‌دهد.

گرچه بیشتر بسترهای پلاستیکی با شفافیت و انعطاف‌پذیری بالا تهیه

فرآیند بهبود حالت صاف و یکنواختی مواد نیمه‌رسانا تعریف شده است. یکی از روش‌های معرفی شده برای یکنواخت کردن ITO، روش پولیش شیمیایی مکانیکی^۲ (CMP) آن است [۹]. تصویر AFM از لایه نازک ITO قبل و بعد از فرآیند پولیش شیمیایی و مکانیکی در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳: تصویر AFM از لایه نازک ITO قبل و بعد از فرآیند پولیش شیمیایی و مکانیکی: قبل از CMP (الف) و بعد از CMP (ب) [۹].

۴- انعطاف پذیری و پایداری مکانیکی الکتروود رسانای شفاف (TCE)

استفاده از ایندیوم در قطعات اپتوالکترونیک برخی معضلات مانند کمبود ایندیوم روی زمین و افزایش فزاینده قیمت آن در آینده نزدیک، شکنندگی شدید مکانیکی و چسبندگی ضعیف به بسترهای پلاستیکی را به دنبال دارد، که باعث می‌شود الکتروودهای ITO برای قطعات الکترونیک انعطاف‌پذیر نامناسب باشند [۱۰]. در نتیجه، پیشرفت در زمینه جایگزینی الکتروود سنتی با الکتروودهای رسانای شفاف انعطاف‌پذیر که دارای انعطاف‌پذیری مکانیکی، هدایت الکتریکی و شفافیت نوری هستند، در دستور کار پژوهشگران قرار گرفته است.

الکتروود رسانای شفاف انعطاف‌پذیر، به‌طور معمول لایه‌های نازک تهیه شده بر روی بسترهای انعطاف‌پذیر به‌منظور عبور دادن نور و انتقال جریان الکتریکی به‌طور هم‌زمان هستند [۱۱]. الکتروودهای شفاف مختلف با انعطاف‌پذیری بسیار عالی، از قبیل پلیمرهای رسانا، نانولوله‌های کربنی چند دیواره، گرافن و لایه‌های نانولوله کربنی تک دیواره، در تلاش برای تحقق OLED بسیار انعطاف‌پذیر و بادوام مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. با این حال، مقاومت سطحی این الکتروودها هنوز به‌دلیل طبیعت آنها محدود است. اگرچه در حال حاضر لایه‌هایی با مقاومت سطحی کمتر از $100 \Omega/\text{square}$ و عبور نوری در حدود ۸۵٪ ساخته شده‌اند [۱۲]، اما هنوز این پارامترها باید بیشتر بهبود یابند.

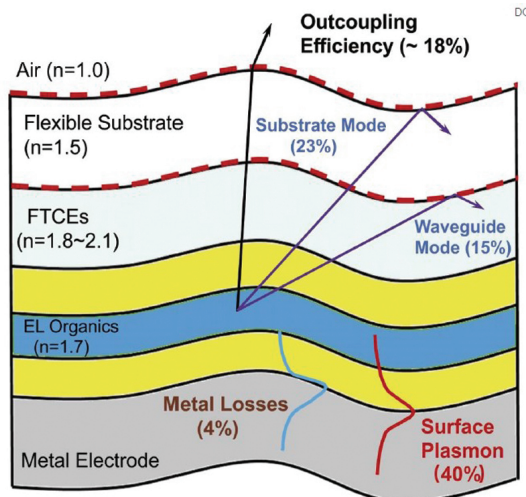
راهکار پیشنهادی جدید، دستیابی به گرافن تک لایه سنتز شده با روش CVD در مقیاس بزرگ، با استفاده از پلیمر فروالکترونیک غیرفرار است که مقاومت سطحی پایین دارد. در ساختار این کامپوزیت، ورق‌های گرافن توسط پلی (وینیلیدین فلئوراید-کو-تری فلئورو اتیلن)^۲ (P(VDFTrFE)) دوپ شده و مقاومت سطحی کم بدست می‌آید. در این ساختار هیبریدی، مقاومت سطحی در حد Ω/square در 120°C در شرایط محیطی به دست آمده و به‌دلیل طبیعت بسیار شفاف پلیمر فروالکترونیک، عبور بیش از ۹۵٪ را در محدوده مرئی نشان می‌دهند [۱۳]. علاوه بر آن، به دلیل انعطاف‌پذیری مکانیکی عالی، واکنش ناپذیری شیمیایی و نیز فرآیند ساخت ساده پلیمرهای فروالکترونیک، الکتروودهای شفاف گرافن-فروالکترونیک مسیر جدیدی را برای گسترش الکتروودهای شفاف پایه گرافنی در مقیاس بزرگ باز کرده‌اند.

۵- آسیب‌های بین لایه‌ای

چالش‌های دیگر در روند تولید OLED با روش غلتک به غلتک، شامل آسیب‌های بین لایه‌ای، حفظ تمیزی محیط انجام فرآیند و غیره است. انتخاب مواد با ضرایب انبساط حرارتی مشابه در هنگام تشکیل لایه‌های آلی روی بستر بسیار مهم است [۱۴]. عدم تناسب ضرایب انبساط حرارتی باعث ترک خوردن و در نتیجه شکست لایه‌های آلی نشانده شده در طی چرخه دمایی خواهد شد. همچنین، محافظت از تنش‌های لایه‌های متصل به هم و حفظ خلوص لایه‌های آلی اهمیت دارد.

۶- تکنولوژی استخراج نور

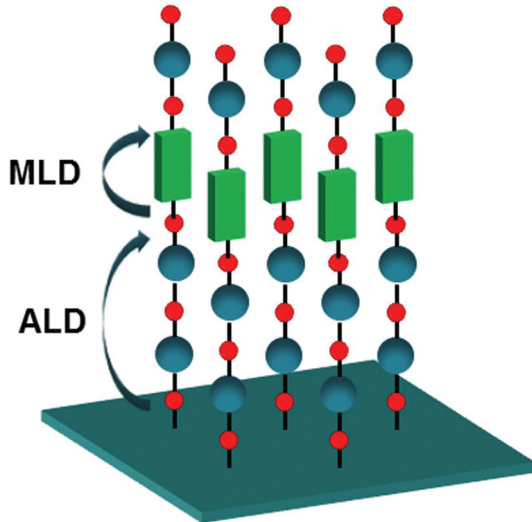
متاسفانه، بیشتر فوتون‌های تولید شده در ساطع‌کننده‌های آلی OLED انعطاف‌پذیر، به‌دلیل تفاوت زیاد شاخص‌های انعکاسی (n) لایه‌های آلی $TCE \sim 1/2 - 1/1$ ، بسترهای پلاستیکی $(n_{\text{sub}} \sim 1.5 - 1.7)$ و هوا $(n_{\text{air}} \sim 1)$ درون لایه آلی، TCE، و بستر جذب می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، بخشی از نور جذب شده، جذب الکتروود فلزی می‌شود [۱۵].



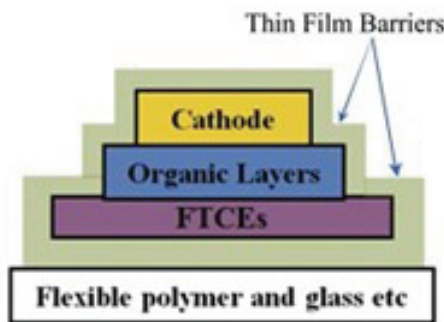
شکل ۴: حالت‌های مختلف اتلاف نور در OLED انعطاف‌پذیر.

افزایش شدت تابش نور، از چالش‌های مهم پیش رو در توسعه OLED است که نیازمند اصلاح ساختار درونی OLED می‌باشد. تاکنون اقدامات متعددی به‌منظور افزایش شدت تابش نور درون لایه‌های ITO/ITO آلی صورت پذیرفته است. به‌عنوان مثال راهکارهای استفاده

هان^۸ و همکاری از مواد هیبریدی اپوکسی-سیکلوآلیفاتیک قابل پخت با اشعه UV^۹ (hybrimer) به عنوان یک لایه بافر برای پوشش دادن OLEDهای انعطاف پذیر انکپسوله استفاده کرد [۲۱]. این فرآیند بسیار ساده، سریع، کم هزینه و مقیاس پذیر است و مسیری بالقوه برای انکپسولاسیون موثر الکترونیک های انعطاف پذیر فراهم می کند.



شکل ۵: ساختار لایه نازک آلی/ معدنی هیبریدی ساخته شده با استفاده از تکنیک ALD/MLD [۱۹].



شکل ۶: لایه نازک OLED انکپسوله شده روی بستر انعطاف پذیر و انکپسوله شده با لایه سدکننده

۸- تکنولوژی ساخت قطعه

۸-۱- تبخیر حرارتی در خلاء

تا به امروز، بیشتر ساطع کننده های آلی در OLEDهای کوچک مولکول مانند الکترودهای ذکر شده در قسمت بالا معمولاً از طریق تبخیر حرارتی در خلاء برای نمونه های آزمایشگاهی OLED و نیز برای تولید صنعتی قطعات تجاری لایه نشانی می شوند. با وجود اینکه تکنیک تبخیر حرارتی در خلاء^{۱۰} (VTE) برای دستیابی به نمایشگرهای OLED تمام رنگی با کیفیت بالا آسان و مؤثر می باشد، محدودیت هایی در زمینه کنترل فرآیند، قابلیت مقیاس پذیری و قابلیت تولید با هزینه های مؤثر وجود دارد [۲۲]. به خصوص به دلیل پایداری حرارتی به نسبت ضعیف بسترهای پلاستیکی OLEDهای انعطاف پذیر، روش های تولید با درجه حرارت بالا مشکل آفرین خواهد بود.

۸-۲- فرآیند پذیری محلول

فرآیند پذیری محلول ممکن است یک راهکار مقرون به صرفه و

از بسترهای با شاخص انعکاس بالا ($n \geq 1.1$) به جای شیشه استاندارد ارایه شده است [۱۶].

بسترهای با شاخص انعکاس بالا، به طور مؤثری انعکاس درونی بالا در فصل مشترک بستر/ITO را کاهش داده و اجازه میدهد که نور بیشتری از قطعه خارج شود.

۷- طول عمر مواد بکار رفته در OLED و پایداری عملکرد قطعه

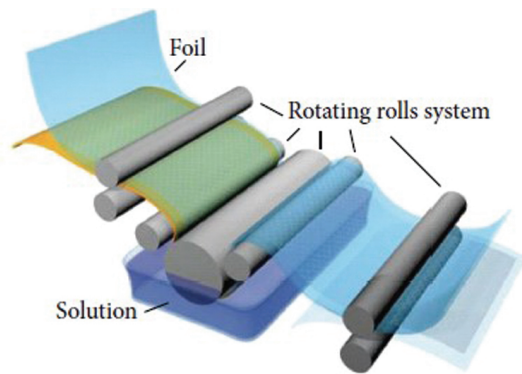
به جز کارایی، پایداری عملکرد قطعه یکی دیگر از چالش های جدی پیش رو برای توسعه OLEDهای انعطاف پذیر با کارایی بالا است. طول عمر دستگاه OLED به عنوان زمان متوسطی محاسبه می شود که میزان روشنایی به نصف کاهش یابد. T_{50} به عنوان مدت زمانی که کاهش روشنایی از شدت اولیه تا حد ۵۰٪ اولیه برسد، تعریف شده است. درخشندگی OLEDها با گذشت زمان کاهش می یابد و طول عمر پنل ها محدود است.

مطالعات کنونی نشان می دهد که واکنش های الکتروشیمیایی یا فتوشیمیایی، مهاجرت گونه های یونی، اثرات فصل مشترک، تخریب گونه مولکولی خاص، نقش مهمی در تخریب ذاتی قطعه OLED دارند [۱۷-۱۸]. مساله تخریب با عامل خارجی را می توان به ذرات گرد و غبار رسوب شده در طول فرآیند ساخت OLED و نفوذ بخار آب و اکسیژن نسبت داد. ناخالصی ها مناطق حساس برای حمله رطوبت فراهم می کنند که منجر به کاهش الکتروشیمیایی آب در فصل مشترک الکترو/فلزی آلی شده و در نتیجه توسط هیدروژن آزاد شده در زیر سطح الکتروود حباب هایی ایجاد می کند. علاوه بر آن، نفوذ اکسیژن باعث اکسیداسیون الکتروود و لایه آلی و همچنین جدا شدن لایه الکتروود می شود.

روش موثر به منظور جلوگیری از تخریب ناشی از رطوبت/اکسیژن، انکپسولاسیون مناسب OLED انعطاف پذیر است. امروزه، انکپسولاسیون لایه نازک^۴ (TFE) به عنوان امیدوارکننده ترین روش برای محافظت قطعات انعطاف پذیر پیشنهاد شده است [۱۹]. این روش می تواند با استفاده از تکنیک های لایه نشانی مختلف در دمای پائین مانند انکپسولاسیون چند لایه، لایه نشانی اتمی^۵ (ALD) / لایه نشانی مولکولی^۶ (MLD)، فرآیندهای ALD افزایش یافته پلاسمایی^۷ (PEALD) انجام شود. انکپسولاسیون چند لایه شامل لایه های مجزای Al_2O_3 و پلی اکریلات (دوتایی) در هر دو طرف پایین و بالای لایه های تشکیل دهنده قطعه به عنوان لایه انکپسولاسیون است که با ایجاد حالت سدکنندگی موجب پایداری دراز مدت آن می شود (شکل ۵) [۱۹].

فرآیندهای ALD/MLD به طور کلی شامل واکنش های متناوب واکنش دهنده ها و پیش ماده های فلزی است که فرآیندهای ALD و MLD را تکرار می کند، این فرآیندهای متناوب منجر به رشد لایه - لایه می شود. در حالت ایده آل، یک ماده لایه نازک تک لایه تشکیل شده است. برای قرار دادن لایه های ضخیم تر، چرخه ALD/MLD چندین بار تکرار می شود تا به ضخامت لایه مورد نظر برسد. چند لایه های آلی/ معدنی نه تنها به عنوان مانع اکسیژن و رطوبت با کیفیت بالا عمل می کنند، بلکه بستر پلاستیکی را صاف می کنند به طوریکه آسیب مکانیکی را کاهش داده و پایداری حرارتی دستگاه را افزایش می دهد. فرآیندهای ALD به وسیله در معرض قرار گرفتن سطح پوشش دهی شونده با پیش ماده آلی/ فلزی با یک واکنش دهنده (H_2O , O_3 , NH_3 و غیره) انجام می شود. به این ترتیب، انواع مختلفی از لایه های انکپسولاسیون نازک مانند TiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , Si_3N_4 و SiO_2 می توانند لایه نشانی شوند (شکل ۶) [۲۰].

بعدی چاپ، سرعت چاپ را محدود می‌کند. یکی دیگر از چالش‌های پیش‌رو در این تکنیک، دستیابی به توزیع یکنواخت جریان قطره روی سطح بستر انعطاف‌پذیر است که بیشتر طبیعت آن هیدروفوب است. به این منظور اصلاح اولیه سطوح پلاستیکی از طریق پلاسما، حلال یا اشعه ماوراء بنفش باید صورت پذیرد که باعث بهبود خاصیت ترشوندگی^{۱۷} الگوهای چاپ شده می‌شود. به‌تازگی، لایه‌های مختلفی مانند الکتروگرافن، الکترو نانو سیسم نقره و لایه فعال آلنی با چاپ جوهر افشان لایه نشانی شده‌اند.



شکل ۷: نشان دادن رول به رول لایه‌های آلنی روی فویل.

چاپ گراوو^{۱۸} یکی دیگر از تکنیک‌های بسیار محبوب برای قرار دادن لایه‌های انتقال حفره و ساطع کننده و انتقال الکترون در OLED های بر روی بستر پلاستیکی است که در مقایسه با فرآیندهای چاپ رول به رول، سرعت بیشتری دارند [۲۵]. غلتک چاپ، جوهر را از مخزن برداشته و حفره‌ها را برای الگوگذاری سطح حکاکی می‌کند. شکل حفره و تراکم نقش و اثر می‌تواند متفاوت باشد. تیغه‌های مخصوص میزان اضافی جوهر را برمی‌دارد تا توزیع جوهر در هر حفره یکنواخت باشد. چالش عمده‌ای که با این روش همراه است، بازدهی نشر پایین OLED ساخته شده است، هر چند برخی از مطالعات نتایج امیدوار کننده و بهبود یافته‌ای را نشان می‌دهند.

ساختارهای چند لایه که توسط تکنیک‌های فرآیند محلول لایه نشانی شده‌اند، یک مشکل پیچیده دارند و آن است که پوشش لایه‌ی بالایی که بر پایه محلول است، می‌تواند لایه‌ی پایینی را حل کند. این مساله چالش انگیز نیازمند انتخاب دقیق مواد و حلال‌ها برای عدم حل‌شوندگی لایه‌های مجاور است.

۹- نتیجه‌گیری

دیویدهای ساطع نوری آلنی با توجه به مزایای گوناگونی که نسبت به دیویدهای ساطع نوری غیرآلی دارند، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در ساختار دیویدهای ساطع نوری آلنی یک لایه تشکیل شده از ترکیبات آلنی در پاسخ به جریان الکتریکی نور منتشر می‌کند. در مسیر توسعه دیویدهای ساطع نوری آلنی چالش‌های متعددی وجود دارد که باید بر آنها غلبه شود. مهم‌ترین چالش‌های مطرح شده در زمینه تجاری شدن دیویدهای ساطع نوری آلنی به ۷ دسته تقسیم شده‌اند: ۱- انعطاف‌پذیری و پایداری حرارتی بسترهای مورد استفاده، ۲- ناهم‌واری سطح ماده ITO، ۳- انعطاف‌پذیری و پایداری مکانیکی الکترو رسانی شفاف (TCE)، ۴- آسیب‌های بین لایه‌ای، ۵- تکنولوژی استخراج نور، ۶- طول عمر مواد بکار رفته در OLED و پایداری عملکرد قطعه و ۷- تکنولوژی ساخت قطعه. راهکارهای ارائه شده در راستای برطرف شدن این چالش‌ها در این مطالعه بررسی

مقیاس‌پذیر را برای تولید انبوه پانل‌های OLED انعطاف‌پذیر و با مساحت زیاد ارائه دهد. پوشش‌دهی چرخشی به‌عنوان یک فناوری فرآیند معتبر است که به‌طور معمول در لایه نشانی لایه‌های پلیمری استفاده می‌شود. به‌طور تقریبی تمام OLED های انعطاف‌پذیر پلیمری که تاکنون در مقالات علمی گزارش شده‌اند، با ترکیبی از پوشش‌دهی چرخشی و لایه نشانی بخار در خلاء که شامل یک پوشش‌دهی و روش تابکاری حرارتی برای بدست آوردن لایه‌های پلیمری یکنواخت و پس از آن لایه نشانی الکترودهای فوقانی در خلاء می‌باشد، بدست می‌آیند. اگر چه مواد پلیمری برای فرآیند محلول مناسب هستند، آنها در قابلیت تکرارپذیری قطعه کاربردی به‌علت تغییرات وزن مولکولی، پلی دیسپرسیویتی، ناحیه گزینی^{۱۱} و خلوص با مشکلات قابل ملاحظه‌ای مواجه می‌شوند. با توجه به این که مولکول‌های کوچک دارای یک ساختار مولکولی دقیقاً معینی هستند و قابلیت تولید دوباره را نیز فراهم می‌کنند، مولکول‌های کوچک قابل فرآیند توسط روش محلول که با فرآیند پوشش‌دهی چرخشی سازگار هستند، به‌تازگی برای ساخت OLED ها توسعه یافته‌اند. با این حال، فرآیند پوشش‌دهی چرخشی دارای محدودیت برای لایه نشانی‌های چند لایه است، زیرا پوشش‌دهی بر پایه محلول از یک لایه می‌تواند لایه زیری آن را حل کند. محدودیت‌های دیگر در فرآیند محلول عبارتند از: سرعت پایین مصرف مواد، لایه نشانی در مساحت بزرگ و الگوگذاری لایه افقی. از آنجایی که روش کلی پوشش‌دهی چرخشی به‌طور کامل با تولید مقیاس بالا سازگار نیست، بسیار مطلوب است که فرآیند محلولی که می‌تواند در یک فرآیند پیوسته برای تولید صنعتی انجام شود، گسترش یابد. به‌منظور تولید صنعتی OLED، پژوهشگران به دنبال فرآیند محلولی هستند که قادر به ساخت OLED های انعطاف‌پذیر در شرایط محیطی بوده و بنابراین هزینه‌های تولید را بسیار کاهش دهد. فرآیند تولید مورد استقبال در سال‌های اخیر، پرینت رول به رول^{۱۲} لایه‌های پلیمری (R2R) روی بسترهای PET بوده است (شکل ۷). ایده اصلی این است که قرارگیری جوهرهای آلنی در مکان تعیین شده به‌طور مستقیم بر روی بسترهای قابل رول شدن در طی یک مرحله صورت پذیرد تا الگو شکل بگیرد [۲۳]. خط تولید غلتک به غلتک به‌طور پیوسته می‌تواند با استفاده از ترکیبی از تمیز کردن، چاپ و پوشش‌دهی ساخته شود، به‌طوری که تولید قطعات OLED مساحت بزرگ، مقرون به‌صرفه و سرعت بالا را بر روی بسترهای انعطاف‌پذیر مقدور سازد. مانند فرآیند محلول، فرآیند غلتک به غلتک نیز از چندین تکنیک چاپ و پوشش‌دهی تشکیل شده است، مانند چاپ جوهر افشان، چاپ گراوو^{۱۳}، چاپ پردهای^{۱۴}، پوشش‌دهی تیغ‌های^{۱۵}، پوشش‌دهی روزنه شیباری^{۱۶}، غیره [۲۴]. این تکنیک‌های چاپ و پوشش‌دهی بر اساس همان اصل انتقال جوهر به بستر است که با موفقیت برای تولید لایه‌های کاربردی و الکترودها برای OLED های بر پایه پلیمرها و نیز مولکول‌های کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد. چاپ جوهر افشان تکنیکی است که از سر نازل برای پاشیدن جوهرهای با ویسکوزیته کم استفاده می‌کند. قطره‌های خروجی می‌تواند به‌علت تولید اولتراسونیک جریان آئروسول، مانند برخی سیستم‌های الکترواسپری بسیار ریز باشد. لایه‌ها در محدوده چند نانومتری می‌توانند به آسانی قابل تنظیم باشند، به طوری که کنترل میزان حجم پیکولیتر برای سر چاپگر قابل دستیابی است. با این حال، چون حلالیت مواد توسط نوع حلال و فراریت کنترل می‌شود، نقص‌های مختلف لایه مانند ترک خوردگی، تنش ذاتی و پیوسته پیوسته شدن طی خشک شدن ممکن است رخ دهد [۲۵]. سرعت تبخیر حلال باقیمانده به‌منظور متراکم کردن لایه، قبل از مرحله

properties of indium tin oxide thin film using chemical mechanical polishing technique, *Microelectronic Engineering*, 2007, 84, 2896-2900.

- [10] S. De, P. E. Lyons, S. Sorel, E. M. Doherty, P. J. King, W. J. Blau, P. N. Nirmalraj, J. J. Boland, V. Scardaci, J. Jomel, J. N. Coleman, Transparent, flexible, and highly conductive thin films based on polymer-nanotube composites, *ACS Nano*, 2009, 3, 714-720.
- [11] K. Ellmer, Past achievements and future challenges in the development of optically transparent electrodes, *Nature Photonics*, 2012, 6, 809-817.
- [12] M. Aleksandrova, N. Kurtev, V. Videkov, S. Tzanova, S. Schintke, Material alternative to ITO for transparent conductive electrode in flexible display and photovoltaic devices, *Microelectronic Engineering*, 2015, 145, 112-116.
- [13] G.X. Ni, Y. Zheng, S. Bae et al., Graphene-ferroelectric hybrid structure for flexible transparent electrodes, *ACS Nano*, 2012, 6, 3935-3942.
- [14] SZ Zardareh, FA Boroumand, MR Fathollahi, Interface Effects on Operation of Multilayer Organic Light Emitting Diodes, Interfaces and Interphases in Multicomponent Materials (IIMM 2010).
- [15] K. Hong, J. L. Lee, Review paper: Recent developments in light extraction technologies of organic light emitting diodes, *Electronic Materials Letters*, 2011, 7, 77-91.
- [16] Y. Luo, C. Wang, L. Wang, Y. Ding, L. Li, B. Wei, J. Zhang, Flexible organic light-emitting diodes with enhanced light out-coupling efficiency fabricated on a double-sided nano-textured substrate, *ACS Applied Mater. Interfaces*, 2014, 6, 10213-10219.
- [17] FA Boroumand, Degradation in organic light emitting diodes, *World Academy of Science, Engineering and Technology* 38, 274-277.
- [18] FA Boroumand, A Hammiche, G Hill, DG Lidzey, Characterizing Joule Heating in Polymer Light Emitting Diodes Using a Scanning Thermal Microscope, *Advanced Materials*, 2004, 16 (3), 252-25.
- [19] Z. Chen, H. Wang, X. Wang, P. Chen, Y. Liu, H. Zhao, Y. Zhao, Y. Duan, Low-temperature remote plasma enhanced atomic layer deposition of ZrO₂/zirconium nanolaminated film for efficient encapsulation of flexible organic light-emitting diodes, *Scientific Reports*, 2016, 7, 40061.
- [20] R. P. Xu, Y. Q. Li, J. X Tang, Recent advances in flexible organic light-emitting diodes, *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4, 9116-9142.
- [21] Y. C. Han, E. G. Jeong, H. Kim, S. Kwon, H.G. Im, B.-S. Bae, K. C. Choi, Reliable thin-film encapsulation of flexible OLEDs and enhancing their bending characteristics through mechanical analysis, *RSC Advances*, 2016, 6, 40835-40843.
- [22] S. R. Forrest, The path to ubiquitous and low-cost organic electronic appliances on plastic, *Nature*, 2004, 428, 911-918.
- [23] J. Jensen, H. F. Dam, J. R. Reynolds, A. L. Dyer, F. C. Krebs, Manufacture and demonstration of organic photovoltaic poweredelectrochromic displays using roll coating metho-ods and printable electrolytes, *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 2012, 50, 536-545.
- [24] Y. Luo, C. Wang, L. Wang, Y. Ding, L. Li, B. Wei, J. Zhang, Flexible organic light-emitting diodes with enhanced light out-coupling efficiency fabricated on a double-sided nano-textured substrate, *ACS Applied Mater. Interfaces*, 2014, 6, 10213-10219.
- [25] M. Aleksandrova, Specifics and Challenges to Flexible Organic Light-Emitting Diodes, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 4081697.

شده است. با توجه به اهمیت بارز دیودهای ساطع نوری آلی و حجم گسترده مطالعات انجام شده در این زمینه انتظار می‌رود که طی دهه آتی شاهد تجاری شدن دیودهای ساطع نوری آلی و جایگزین شدن LED با OLED در صنعت روشنایی باشیم.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Fractal properties
- 2 Chemical mechanical polishing technique
- 3 Poly (vinylidene fluoride-co-trifluoroethylene)
- 4 Thin film encapsulation
- 5 Atomic layer deposition
- 6 Molecular layer deposition
- 7 Plasma enhanced ALD
- 8 Han
- 9 UV-curable cycloaliphatic-epoxy hybrid materials
- 10 Vacuum thermal evaporation
- 11 Regioregularity
- 12 Roll-to-Roll (R2R) printing
- 13 Gravure printing
- 14 Screen printing
- 15 Blade coating
- 16 Slot-die coating
- 17 Wetting
- 18 Gravure printing

مراجع

- [1] M Mohsennia, MM Bidgoli, FA Boroumand, A Khademi, Use of a New Blue Emitter in Color-Stable, Flexible, Polymeric White Light-Emitting Diodes with a Simple Structure, *Journal of Electronic Materials*, 2015, 44 (8), 1-9.
- [2] MN Rezaie, N Manavizadeh, FD Nayeri, MM Bidgoli, E Nadimi, Effect of seed layers on low-temperature, chemical bath deposited ZnO nanorods-based near UV-OLED performance, *Ceramics International*, 2018, 44 (5), 4937-494.
- [3] M Nouri Rezaie, MM Bidgoli, N Manavizadeh, E Nadimi, FA Boroumand, Influence of ZnO nanorods on the performance of MEH-PPV based OLED in near UV range, 3rd International Conference on Nanotechnology (ICN2015), Istanbul, Turkey.
- [4] MR Fathollahi, FA Boroumand, Fabrication and simulation of polyfluorene-based organic light-emitting diodes, *Electrical Engineering (ICEE)*, 2012 20th Iranian Conference on, 77-81.
- [5] M Mohsennia, M Massah Bidgoli, FA Boroumand, Low driving voltage in polymer light-emitting diodes with CdS nanoparticles as an electron transport layer, *Journal of Nanophotonics*, 2015, 9, 093081-1 093081-9.
- [6] MM Bidgoli, M Mohsennia, FA Boroumand, Low driving voltage characteristics of polyaniline-silica nanocomposites as hole-injection material of organic electroluminescent devices, 2015, *Materials Research Bulletin* 72, 29-34.
- [7] N Manavizadeh, FA Boroumand, E Asl-Soleimani, F Raissi, Influence of substrates on the structural and morphological properties of RF sputtered ITO thin films for photovoltaic application, *Thin Solid Films*, 2009, 517 (7), 2324-2327.
- [8] W. S. Wong, A. Salleo, *Flexible electronics: materials and applications*, Springer Science & Business Media, Berlin, Germany, 2009.
- [9] Y. Seo, G. Choi, W. Lee, Evaluation of electrical and optical