

## تأثیر ضخامت لایه‌های فعال و میانگیر بر کارایی دیودهای گسیلنده آلی نور سبز

حسن محبی، محسن قاسمی و رنامخواستی، نسرین جمالپور

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

(دریافت مقاله: ۹۶/۰۳/۰۶ - پذیرش مقاله: ۹۶/۰۶/۰۴)

## چکیده

در این مقاله دیودهای گسیلنده آلی نور سبز با ساختار ITO/MoO<sub>3</sub>/TPD/Alq<sub>3</sub>/LiF/Al طراحی و با استفاده از روش تبخیر حرارتی، ساخته شدند. اثرات ضخامت لایه‌های TPD به عنوان لایه انتقال‌دهنده حفره، Alq<sub>3</sub> به عنوان لایه انتقال دهنده الکترون و گسیلنده نور و MoO<sub>3</sub> که نقش لایه میانگیر تزریق کننده حفره را ایفا می‌کند، بر عملکرد این دیودها بررسی شد. به منظور به دست آوردن بهترین کارایی از ساختار مورد نظر، با در نظر گرفتن دامنه تغییرات مناسب در ضخامت لایه‌ها، ضخامت بهینه لایه‌های TPD، Alq<sub>3</sub> و MoO<sub>3</sub> در ساختار مورد استفاده تعیین و نقش هر یک از آن‌ها تجزیه و تحلیل شد. پس از اندازه‌گیری پارامترهای نورسنجی دیودهای ساخته شده، ضخامت بهینه ۴۵ نانومتر برای Alq<sub>3</sub>، ۴۰ نانومتر برای TPD و ۱۵ نانومتر برای MoO<sub>3</sub> تعیین شد. با بهینه‌سازی ضخامت لایه‌ها کارایی دیود به واسطه افزایش توازن الکترون-حفره در فصل مشترک لایه گسیلنده و انتقال دهنده حفره، بهبود داده شد. از منحنی مشخصه جگالی جریان - ولتاژ، مقدار ولتاژ آستانه برای دیود بهینه شده (V) ۳/۹ تعیین شد که مقدار آن در دیودهای نورگسیل آلی حائز اهمیت است. همچنین بر اساس نتایج الکترو لومینسانسی برای دیود نور گسیل آلی بهینه شده، حداکثر بازده جریان (cd/A) ۲/۱، بیشینه لومینسانس (cd/m<sup>2</sup>) ۷۵۳۰ و بیشترین شدت تابشی در طول موج حدود ۵۳۰ nm اندازه‌گیری شد. **واژه‌های کلیدی:** دیود نورگسیل آلی، لایه میانگیر، الکترو لومینسانس، باز ترکیب الکترون-حفره، بازده جریان.

## The Effect of Thickness of Active and Buffer Layers on Performance of Green Organic Light Emitting Diode

Hasan Mohebi, Mohsen Ghasemi Varnamkhasti, Nasrin Jamalpour

Department of Physics, Faculty of Sciences, Shahrekord University, P.O. Box 115, Shahrekord, Iran

(Received 27 May 2017, accepted 26 August 2017)

**Abstract**

In this paper, green organic light emitting diodes (OLED) with the structure of ITO/MoO<sub>3</sub>/TPD/Alq<sub>3</sub>/LiF/Al were designed and fabricated using thermal evaporation technique. The effects of thickness of the Alq<sub>3</sub> as the electron transport and emitter layer, TPD as the hole injection layer, and MoO<sub>3</sub> which plays the role of the buffer layer of hole injector, were investigated on the performance of these diodes. In order to obtain the best performance of the proposed structure, by considering the appropriate range of the thickness of the layers, the optimum thickness of the Alq<sub>3</sub>, TPD and the buffer layer of MoO<sub>3</sub> is determined in the used structure and the function of each of them was analyzed. After measuring the photometric parameters of the fabricated diodes, the optimized thickness of 45 nm for Alq<sub>3</sub>, 40 nm for TPD, and 15 nm for MoO<sub>3</sub> were determined. By optimizing the thickness of the layers, the efficiency of the diode was improved due to the balance of the distribution of electrons and holes in the interface of emissive and hole transport layers. From the current density-voltage characteristic curve, the threshold voltage for the optimized diode was determined to be 3.9 (V), which is an important value in organic light emitting diode. Also, according to electroluminescent results for the optimized organic light emitting diode, maximum current efficiency was about 2.1 (cd/A), the maximum luminescence was 7530 (cd/m<sup>2</sup>) and maximum radiation was measured at the wavelength of about 530 nm.

**Keywords:** Organic light emitting diode, Buffer layer, Electroluminescent, Electron-hole recombination, Current efficiency.**E-mail of Corresponding author:** ghasemi.mohsen@sci.sku.ac.ir.

## مقدمه

مورد نیاز تولید کرد. این ویژگی امکان داشتن چشمه‌های نوری با شار لومینسانسی بالا و بدون تابش خیره‌کننده را فراهم می‌سازد. از دیگر مزایای این دیودها می‌توان به استفاده از مواد آلی نانو ساختار به جای مواد معدنی (که گاه کمیاب‌اند)، سازگاری با زیرلایه‌های پلاستیکی، ولتاژ کار پایین، زمان پاسخ دهی سریع، تفکیک پذیری بالا و توان مصرفی کم‌تر اشاره کرد [۸-۶].

دیودهای نورگسیل آلی از قرار گرفتن یک یا چند لایه آلی یا پلیمری بین دو لایه نازک از مواد رسانا که نقش الکترودهای آند و کاتد را دارند به روش لایه‌نشانی ساخته می‌شوند. به منظور خروج نور تولید شده از دیود نورگسیل، بایستی یکی از الکترودهای آن شفاف باشد. مراحل تولید نور در یک OLED شامل تزریق بار، انتقال بار، تشکیل اکسیتون و گسیل نور است. هنگامی که به دو سر الکترودها یک اختلاف پتانسیل اعمال شود بر اثر میدان الکتریکی اعمال شده در ساختار، حامل‌های بار منفی (الکترون‌ها) و حامل‌های بار مثبت (حفره‌ها) به ترتیب از کاتد و آند به داخل ساختار تزریق شده و سپس به سمت ناحیه گسیلنده دیود حرکت می‌کنند. پس از آن که حامل‌های بار به یکدیگر می‌رسند، تشکیل حالت‌های گسیلی می‌دهند و بر اثر بازترکیب تابشی، نور از طرف الکترودها شفاف OLED به سمت خارج دیود گسیل می‌شود [۱۱-۱۳]. ساده‌ترین ساختار دیودهای نورگسیل آلی، نوع تک لایه‌ای آن است. این دیودها از یک لایه آلی (لایه فعال) که بین دو الکترودها قرار گرفته، تشکیل می‌شوند. به منظور افزایش کارایی، بهبود بازده و افزایش طول عمر دیود در ساختار آن از لایه‌های دیگری به جز لایه فعال نیز استفاده می‌شود، این لایه‌های کمکی را لایه‌های میانگیر می‌نامند. در شکل (۱) ساختار دیود نورگسیل مورد مطالعه نشان داده شده است.

توسعه مواد آلی لومینسانس به علت خواص الکتریکی منحصر به فرد و کاربردهای بالقوه در دستگاه‌های فوتونیک و اپتوالکترونیک از قبیل سلول‌های خورشیدی، دیودهای نور گسیل آلی (OLED) <sup>۱</sup> و ترانزیستورهای اثر میدانی سبب توجه ویژه محققین به این موضوع شده است [۱]. در سال ۱۹۵۰ برننوس <sup>۲</sup> اولین بار، پدیده نوردهی الکتریکی (الکترو لومینسانس) <sup>۳</sup> در یک ماده آلی را توسط اعمال جریان متناوب با ولتاژ زیاد به یک لایه نازک از ترکیب آلی کوئین اکرین <sup>۴</sup> مشاهده کرد [۲]. در سال ۱۹۸۷ تانگ <sup>۵</sup> و همکارانش برای اولین بار توانستند وسایل نورگسیل آلی با ساختاری چندلایه از لایه‌های نازک آلی مولکول کوچک بر پایه Alq<sub>3</sub> با عملکرد مناسب تولید کنند [۳]. در سال ۲۰۰۹ با وارد کردن چاه‌های کوانتومی چندگانه نوع II (m-MTDATA/ $\alpha$ -NPD) در ساختار دیود گسیلنده آلی نور سبز بازده توان این دیودها افزایش داده شد [۴]. در سال ۲۰۱۷ به کمک دوقطبی‌های میزبان بر پایه مشتقات کربازول/تریازین <sup>۶</sup> پایداری حرارتی دیودهای گسیلنده فسفرسانی نور آبی و سبز افزایش داده شد [۵]. امروزه تلاش‌های زیادی توسط محققین به منظور توسعه عملکرد دیودها جهت اصلاح ساختار و تزریق موثر بار در حال انجام است. دیودهای نورگسیل آلی در صنعت روشنایی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند و از آن‌ها به عنوان چشمه نوری پرکاربرد در آینده‌ای نزدیک یاد می‌شود.

OLEDها بر خلاف LEDها چشمه‌های نوری مسطح هستند و می‌توان آن‌ها را در صفحات گسترده با ابعاد

<sup>1</sup> Organic light emitting diode

<sup>2</sup> Bernanose

<sup>3</sup> Electroluminous

<sup>4</sup> Quinacrine

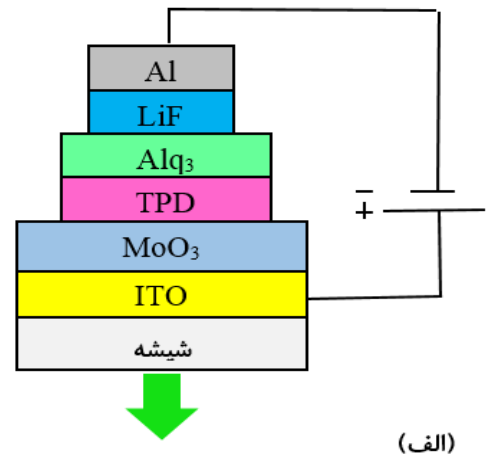
<sup>5</sup> Tang

<sup>6</sup> Carbazole/Triazine

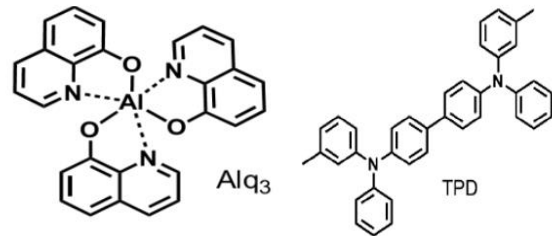
آند شفاف ITO پوشش داده شود. برای ساخت نمونه‌های مورد نظر از نوع آماده این شیشه‌ها استفاده شد که در آن ضخامت شیشه به کار رفته برابر ۱mm و مقاومت سطحی لایه ITO،  $10 \Omega / \text{Sq}$  بود. پس از تهیه این شیشه رسانا، سطح آن را به ابعاد  $1 \text{cm} \times 1 \text{cm}$  تقسیم کرده و با استفاده از اسید هیدروکلریک سونش داده شدند.

جهت تمیز شدن زیرلایه‌ها، ابتدا آلودگی‌های روی سطح زیرلایه با آب و صابون شست و شو شدند. سپس به منظور پاکسازی لکه‌های چربی و رسوبات معدنی، آن‌ها به ترتیب در حلال‌های استون، اتانول، متانول، ایزوپروپانول و مجدد با استون و در نهایت در آب مقطر هر کدام به مدت ۵ دقیقه در دستگاه اولتراسونیک شست و شو داده شدند. پس از اتمام شست و شو و قبل از قرار دادن زیرلایه‌ها در محفظه خلأ، به کمک گاز نیتروژن خشک شدند. پس از آماده سازی زیرلایه‌ها مواد مختلف  $\text{MoO}_3$ ،

TPD،  $\text{Alq}_3$ ، LiF و Al که با خلوص ۹۹/۹۹٪ از شرکت سیگما آلدریج خریداری شدند، به عنوان ماده هدف در دستگاه لایه‌نشانی تبخیر حرارتی مدل TE302 استفاده شدند. در ساختار دیود گسیلنده آلی نور سبز مورد مطالعه ضخامت لایه‌های فعال TPD،  $\text{Alq}_3$  و لایه میانگیر  $\text{MoO}_3$  با توجه به ساختار بایستی بهینه شود. پس از قرار دادن مواد درون بوت‌ها، محفظه لایه نشانی تا فشار پایه  $10^{-5} \times$  ۱/۶ میلی بار تخلیه شد و لایه‌ها در فشار  $10^{-4} \times 1/2$  میلی بار انباشت شدند. در حین فرآیند انباشت دمای زیرلایه، دمای اتاق ( $25^\circ \text{C}$ ) انتخاب شد. ضخامت و آهنگ لایه نشانی با استفاده از دستگاه ضخامت‌سنج کریستال کوآرتز کنترل شد. آهنگ انباشت لایه‌های TPD،  $\text{Alq}_3$  و  $\text{MoO}_3$  برابر  $0.1 \text{ nm/s}$ ، آهنگ انباشت LiF،  $0.2 \text{ A/s}$  و برای کاتد Al مقدار  $1 \text{ nm/s}$  در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری‌های الکترو لومینسانسی نمونه‌ها تحت شرایط محیط و بدون کپسول‌بندی به کمک دستگاه اسپکترومتر مدل Ocean JAZ Optics انجام شد. همچنین منحنی مشخصه دیود در



(الف)



(ب)

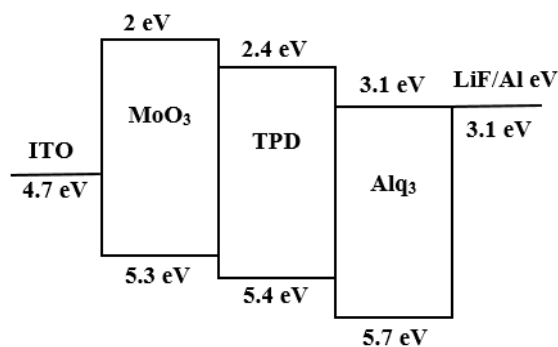
شکل ۱. الف) طرحواره دیود نورگسیل آلی چند لایه مورد مطالعه (ب) ساختار مولکولی مواد آلی مولکول کوچک TPD و  $\text{Alq}_3$

در OLEDها می‌توان با تغییر پارامترهای لایه‌نشانی از قبیل تعداد لایه‌ها، نوع مواد، ضخامت لایه‌ها، آهنگ انباشت و غیره پارامترهایی از قبیل بهره نوری، درخشندگی و طول عمر این منابع روشنایی را بهینه کرد. هدف از این تحقیق به دست آوردن OLED نور سبز با استفاده از بهینه کردن ضخامت لایه‌های تشکیل دهنده ساختار شامل  $\text{MoO}_3$ ، TPD،  $\text{Alq}_3$  و تأثیر آن‌ها بر کارایی دیود است. همچنین با تعیین ولتاژ آستانه مشخص می‌شود در کدام ضخامت از لایه‌ها بیش‌ترین شدت نور سبز حاصل خواهد شد.

### روش ساخت

معمولاً در ساخت دیودهای نور گسیل از شیشه به عنوان زیرلایه استفاده می‌شود. شیشه می‌تواند به خوبی توسط

پس از تولید نمونه‌ها و اتصال آن‌ها به اختلاف پتانسیل الکتریکی، مشاهده شد قطعه‌ای که در آن ضخامت  $\text{Alq}_3$  برابر ۱۵ nm بود، فاقد نوردهی است. این بدین علت است که اگر ضخامت لایه تزریق کننده الکترون بسیار کم باشد دیگر الکترون کافی برای ایجاد توازن بین تعداد الکترون‌ها و حفره‌ها جهت بازترکیب وجود ندارد. چگالی جریان بیشتر به تفاوت سطح انرژی لایه‌های نازک بستگی دارد [۱۲]. در شکل (۲) تفاوت سطح انرژی لایه-های به کار رفته نشان داده شده است. به بالاترین تراز اشغال شده اوربیتال مولکولی تراز  $\text{HOMO}^5$  و به پایین‌ترین تراز اشغال نشده تراز  $\text{LUMO}^6$  گویند [۱۳].



شکل ۲: نمودار ترازهای انرژی برای ساختار دیود نورگسیل آلی

در OLEDها برای تزریق مناسب حفره‌ها به داخل ساختار باید یک جفت شدگی مناسب بین تراز  $\text{HOMO}$  لایه  $\text{HTL}$  و سطح فرمی لایه آند ایجاد شود. بنابراین آند باید دارای تابع کار بالا باشد. از سوی دیگر برای تزریق مناسب الکترون به داخل ساختار باید یک جفت شدگی مناسب بین تراز  $\text{LUMO}$  لایه  $\text{ETL}$  و سطح فرمی لایه کاتد ایجاد شود. بنابراین کاتد باید دارای تابع کار پایین باشد. در یک OLED چنین جفت شدگی همواره به این سادگی ایجاد نمی‌شود، چرا که از یک طرف همیشه یک سد پتانسیل در فرآیند تزریق حامل‌ها بین لایه‌های آلی و الکترودها وجود دارد و از طرف دیگر فعل و انفعالات شیمیایی در فصل

نمونه‌ها به کمک دستگاه مشخصه یاب مدل Keithly 2400 اندازه‌گیری شد.

## نتایج و بحث

در دیود نور گسیل آلی طراحی شده، از لایه‌های ITO به عنوان آند شفاف،  $\text{MoO}_3$  تزریق کننده حفره، TPD انتقال دهنده حفره،  $\text{Alq}_3$  ماده فعال گسیلنده آلی و  $\text{LiF/Al}$  به عنوان کاتد استفاده شده است. در مورد ماده تماس کاتدی  $\text{LiF}$  ذکر این نکته حائز اهمیت است که این ماده تشکیل یک لایه نمی‌دهد بلکه با تبخیر حرارتی تنها به صورت شبکه‌ای از نقاط روی لایه  $\text{Alq}_3$  قرار می‌گیرد. وجود این ماده باعث می‌شود که ضمن جلوگیری از فعل و انفعالات شیمیایی بین کاتد و لایه آلی، مجموعه‌ای از حالت‌های انرژی فصل مشترکی ایجاد شود که در نتیجه آن سد پتانسیل تزریق الکترون بین آلومینیوم و  $\text{Alq}_3$  کاهش یابد. به عبارتی وجود این ماده از یک طرف تابع کار کاتد را کاهش داده و تزریق را افزایش می‌دهد و از طرف دیگر به کاهش واکنش‌های شیمیایی فلز کاتد و بنابراین به افزایش پایداری شیمیایی و بهبود بازده OLED منجر می‌شود.

لایه‌ی  $\text{Alq}_3$  علاوه بر نقش لایه فعال گسیلنده (EML)<sup>۱</sup>، نقش لایه‌های تزریق کننده الکترون (EIL)<sup>۲</sup> و انتقال دهنده الکترون (ETL)<sup>۳</sup> را نیز ایفا می‌کند و بازترکیب الکترون-حفره نیز در فصل مشترک این لایه و لایه انتقال دهنده حفره (HTL)<sup>۴</sup> که در این جا ماده TPD است، رخ می‌دهد. به منظور بهینه‌سازی ضخامت لایه، ضخامت این لایه از ۱۵ nm تا ۵۵ nm تغییر داده شد، در حالی که ضخامت بقیه لایه‌ها مطابق ساختار زیر ثابت می‌ماند.

ITO/ $\text{MoO}_3$  (20 nm)/TPD (40 nm)/ $\text{Alq}_3$  (x nm)  
/LiF (0.8 nm)/Al (200 nm)

<sup>1</sup> Emissive Layer

<sup>2</sup> Electron Injection Layer

<sup>3</sup> Electron Transport Layer

<sup>4</sup> Hole Transport Layer

<sup>5</sup> Highest occupied molecular orbital

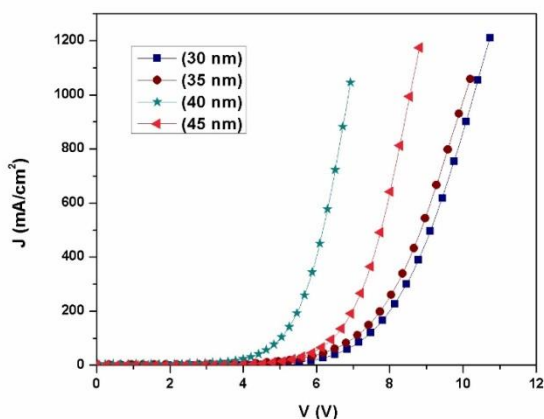
<sup>6</sup> Lowest unoccupied molecular orbital

می‌یابد. با افزایش بیشتر ضخامت از مقدار بهینه، ولتاژ راه انداز دیود افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش در چگالی تله‌هاست که منجر به دام افتادن الکترون‌ها می‌شود. بنابراین ولتاژ بالاتری برای انتقال الکترون به فصل مشترک  $\text{Alq}_3/\text{TPD}$  و افزایش تزریق الکترون نیاز است [۱۵ و ۱۶].

پس از بهینه‌سازی لایه  $\text{Alq}_3$ ، ضخامت بهینه لایه TPD که نقش لایه انتقال‌دهنده حفره را دارد، تعیین شد. برای این منظور ضخامت لایه  $\text{Alq}_3$  را در مقدار بهینه خود (۴۵ nm) ثابت نگه داشته و ضخامت لایه TPD از ۳۰ nm تا ۴۵ nm تغییر داده شد. به عبارت دیگر:

ITO/MoO<sub>3</sub> (20 nm)/TPD (x nm)/Alq<sub>3</sub> (45 nm)  
/LiF (0.8 nm)/Al (200 nm)

شکل (۴) نمودار مشخصه J-V دیودهای ساخته شده با ضخامت‌های متفاوت لایه TPD و شکل (۵) طیف الکترو لومینسانس آن‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نمونه با ضخامت ۴۰ nm، بهترین وضعیت را از نظر پایین بودن ولتاژ آستانه و نیز بالا بودن شدت نور تابشی دارد.

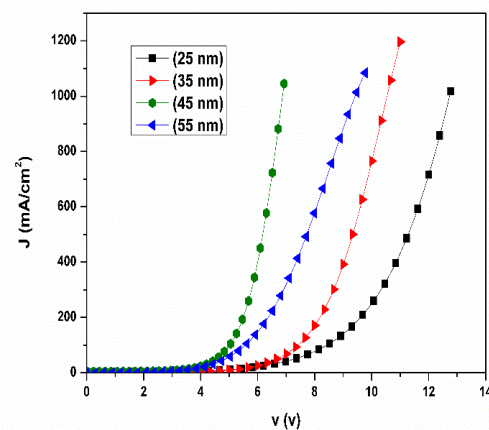


شکل ۴. نمودار J-V برای دیودهای ساخته شده با ضخامت‌های

متفاوت لایه TPD.

مطابق شکل (۵) مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت لایه انتقال‌دهنده حفره تا ۴۰ nm، علاوه بر افزایش

مشترک این لایه‌ها، فرآیند تزریق را مختل می‌کند. برای رفع این مشکل در وسایل OLED پربازده از لایه‌های میانگیر در فصل مشترک لایه‌ها استفاده می‌شود. وجود چنین لایه‌هایی بازده OLEDها را به طور چشم‌گیری افزایش خواهد داد [۱۴]. اندازه ضخامت لایه  $\text{Alq}_3$  به علت تحرک‌پذیری کم حامل‌های آن حائز اهمیت است. نمودار J-V برای دیودهای ساخته شده با ضخامت‌های متفاوت لایه  $\text{Alq}_3$  در شکل (۳) آورده شده است.

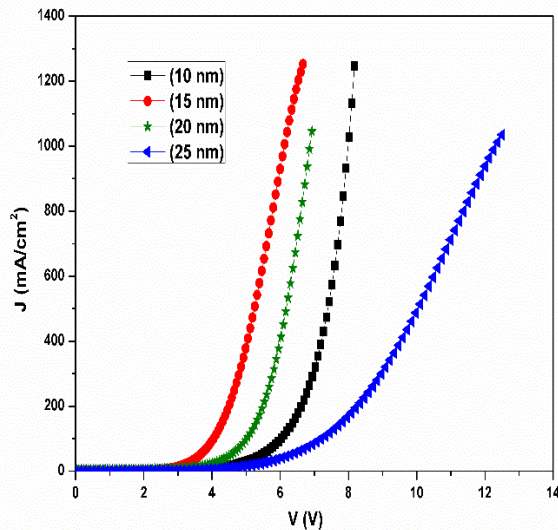


شکل ۳. نمودار J-V برای دیودهای ساخته شده با ضخامت‌های متفاوت لایه  $\text{Alq}_3$ .

مطابق شکل (۳) کم‌ترین ولتاژ آستانه در ضخامت ۴۵ nm از لایه  $\text{Alq}_3$  به دست آورده شد. در ضخامت‌های کم‌تر از این مقدار ناحیه بازترکیب به سمت کاتد نزدیک می‌شود و این مساله باعث نابودی اکسیتون‌ها خواهد شد و در ضخامت‌های بالاتر از این مقدار تحرک‌پذیری الکترون‌ها کم خواهد شد.

به عبارت دیگر، در ضخامت بهینه، توازن جریان الکترون-حفره بهینه می‌شود در حالی که افزایش بیشتر ضخامت باعث می‌شود که بیشتر حفره‌ها در لایه انتقال‌دهنده حفره مسدود شوند. در ضخامت‌های پایین هم مولکول‌های  $\text{Alq}_3$  الکترون‌ها را در تله‌ها به دام می‌اندازند. بنابراین جریان در ضخامت بهینه به شکل مؤثری بهبود

۲۵ تغییر داده شد تا مقدار بهینه آن به دست آید. نمونه با ضخامت ۱۵ nm بهترین وضعیت را از نظر پایین بودن ولتاژ آستانه و نیز بالا بودن شدت نور تابشی دارد. در مورد این نمونه ولتاژ آستانه در حدود ۳/۹ ولت و بیشینه شدت تابش در طول موج ۵۳۰ nm اندازه‌گیری شد.

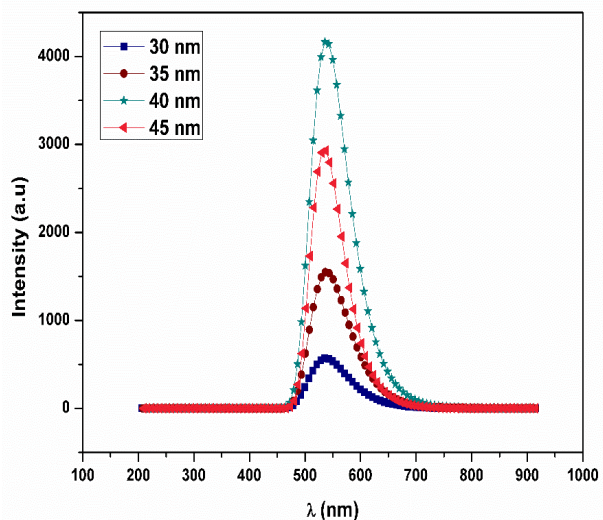


شکل ۶. نمودار J-V برای دیودهای ساخته شده با ضخامت‌های

#### متفاوت لایه MoO<sub>3</sub>

نمونه‌های J-V مربوط به بهینه‌سازی ضخامت MoO<sub>3</sub> در شکل (۶) نشان داده شده است. اگر چه افزایش ضخامت لایه MoO<sub>3</sub> در ابتدا باعث افزایش کارایی دیود می‌شود اما با افزایش بیش‌تر از مقدار بهینه، چگالی جریان کاهش می‌یابد. در ابتدا با افزایش ضخامت لایه میانگیر MoO<sub>3</sub> تا مقدار بهینه ۱۵ nm کارایی دیود افزایش می‌یابد که به دلیل متوازن شدن حامل‌های بار تزریقی است. همچنین این لایه از نفوذ اتم‌های فلزی و اکسیژن آند به درون لایه آلی جلوگیری می‌کند و از این‌رو احتمال شکست الکتریکی وسیله را کاهش می‌دهد. از طرفی می‌دانیم که تحرک‌پذیری الکترون در لایه انتقال‌دهنده الکترونی کمتر از تحرک‌پذیری حفره در لایه انتقال‌دهنده حفره است [۱۸] و [۱۹]. بنابراین تجمع بار مثبت در فصل مشترک لایه انتقال‌دهنده الکترون و انتقال‌دهنده حفره وجود دارد. از

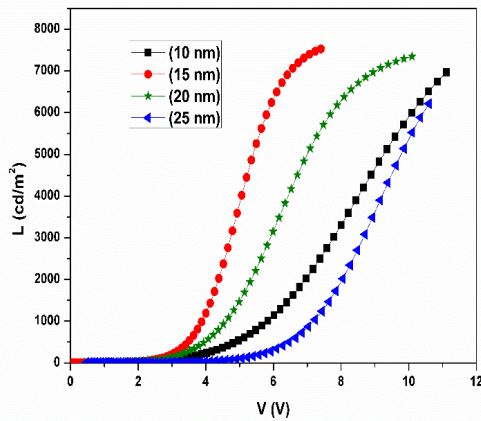
مساحت زیر نمودار و در نتیجه افزایش تابندگی کل، بیشینه شدت تابشی نیز افزایش می‌یابد و پس از آن با افزایش بیش‌تر ضخامت این لایه، تابندگی و بیشینه شدت تابشی کم‌تر از حالت قبل می‌شود. در این ساختار قله طیف تابشی حدوداً در طول موج ۵۳۶ نانومتر قرار دارد.



شکل ۵. نمودار طیف الکترولومینسانس (EL) برای قطعات ساخته شده با ضخامت‌های متفاوت لایه TPD.

افزایش بیش‌تر از مقدار بهینه در ضخامت لایه TPD منجر به کاهش انتقال حفره از طریق لایه انتقال‌دهنده حفره (TPD) به فصل مشترک با لایه انتقال‌دهنده الکترونی و گسیلنده نور (Alq<sub>3</sub>) می‌شود، در نتیجه کاهش تشکیل اکسیژن‌ها و کاهش بازترکیب آن‌ها در لایه گسیلنده نور و کم شدن شدت تابشی را به همراه خواهد داشت [۱۷].

ضخامت لایه‌های میانگیر نیز تأثیر بسزایی در کارایی دیودهای نور گسیل آلی دارد. در این قسمت ضخامت لایه میانگیر MoO<sub>3</sub> به عنوان لایه تزریق‌کننده حفره بایستی بهینه شود. این ماده به سبب داشتن تابع کار بالا سبب کاهش سد انرژی و تزریق مؤثر حفره‌ها از ITO به لایه انتقال‌دهنده حفره (HTL) می‌شود. بدین منظور ضخامت‌های Alq<sub>3</sub> و TPD را در مقادیر بهینه خود ثابت نگه داشته و ضخامت لایه میانگیر MoO<sub>3</sub> از ۱۰ nm تا



شکل ۸. نمودار L-V برای دیودهای ساخته شده با ضخامت‌های متفاوت لایه MoO<sub>3</sub>

مطابق شکل (۸) نمونه با ضخامت لایه ۱۵ nm نسبت به سایر نمونه‌ها درخشایی بیشتری را در ولتاژ آستانه کم‌تری نشان داده است. به عنوان مثال درخشایی ۵۰۰۰ cd/m<sup>2</sup> برای نمونه با ضخامت ۱۵ nm در ولتاژ ۵/۴ V به دست آمد در حالی که برای نمونه‌های با ضخامت ۲۰، ۱۰ و ۲۵ nm به ترتیب در ولتاژهای ۷/۰۸، ۹/۴ و ۹/۸ V حاصل شد.

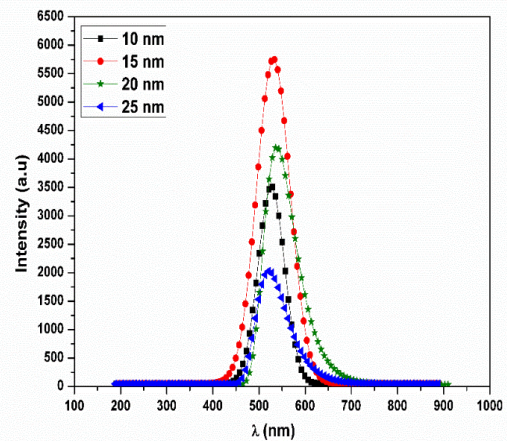
برای محاسبه بازده جریان ( $\eta_I$ ) از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\eta_I = L/J \quad (1)$$

که در آن  $J$  نشان‌دهنده چگالی جریان و  $L$  بیانگر درخشایی است [۲۰]. در شکل (۹) نمودار  $J - \eta_I$  برای این نمونه‌ها رسم شده است. از روی شکل دیده می‌شود که نمونه با ضخامت ۱۵ nm از لحاظ بازده بهتر از نمونه‌های دیگر است و حداکثر بازده جریان برای این نمونه ۲/۱ (cd/A) است، که این نشان‌دهنده تعادل توزیع الکترون‌ها و حفره‌ها و بازترکیب آن‌ها در این ضخامت است.

این‌رو برای افزایش بازده وسیله یا باید تحرک‌پذیری حامل بار مثبت را کاهش دهیم یا تحرک‌پذیری الکترون را افزایش دهیم که در این کار ما تحرک‌پذیری حامل بار مثبت را با استفاده از لایه میانگیر MoO<sub>3</sub> بین ITO و TPD متعادل می‌کنیم تا امکان تبدیل بیشتر حامل‌های بار به اکسیژن وجود داشته باشد. از طرفی باید توجه داشت که اگر ضخامت لایه میانگیر تزریق‌کننده حفره بیش‌تر از مقدار بهینه افزایش داده شود، چگالی جریان و تابندگی دیود نورگسیل آلی کاهش می‌یابد که می‌تواند به طولانی‌تر شدن مسیر حرکت حامل‌های مثبت و کاهش اثر تونل‌زنی بین آن‌د و لایه انتقال‌دهنده حفره نسبت داده شود [۱۸].

در شکل (۷) نمودار شدت تابشی در طول موج‌های مختلف هنگامی که نمونه‌ها به اختلاف پتانسیل ۷ ولت متصل شده‌اند رسم شده است. مطابق شکل نمونه‌ای که در آن ضخامت MoO<sub>3</sub> برابر ۱۵ nm است، بیشینه تابندگی و بیشینه شدت تابشی را دارد. در این ساختار و با استفاده از Alq<sub>3</sub> خالص به عنوان ماده فعال، قله طیف تابشی حدوداً در طول موج ۵۳۰ نانومتر قرار دارد.



شکل ۷. نمودار طیف الکترولومینسانس (EL) برای قطعات ساخته

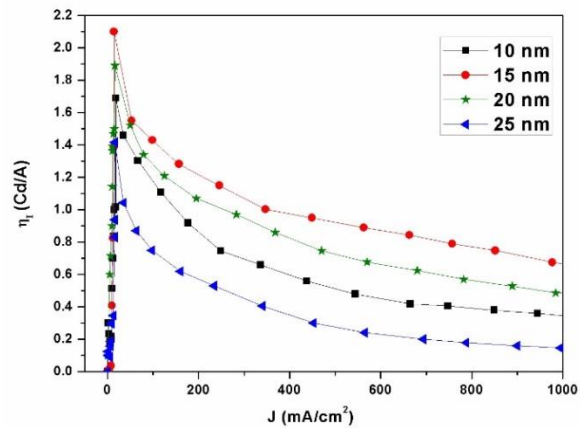
شده با ضخامت‌های متفاوت لایه MoO<sub>3</sub>

روش دیگری که به کمک آن می‌توان کارایی نمونه‌ها را با هم مقایسه کرد، رسم نمودار L-V آن‌ها است. در شکل (۸) نمودار L-V نمونه‌ها با ضخامت‌های متفاوت لایه MoO<sub>3</sub> رسم شده است.

شهرکرد به خاطر حمایت‌هایشان صمیمانه تقدیر و تشکر می‌نمایند.

#### مراجع

1. R. Pandey, G. Méhes, A. Kumar, R. S. Singh, A. Kumar, C. Adachi, D. S. Pandey, *Strong luminescence behavior of mono- and dimeric imidazoquinazolines: Swift OLED degradation under electrical current*, Journal of Luminescence, 181(2017) 252-260.
2. P. S. Kanvar, G. Sahu, P. K. Sen, R. Sharma, S. Bohidar, *A review on OLED and emission characteristics of OLED*, International Journal of Research in Aeronautical and Mechanical Engineering, 3(2015) 53-61.
3. N. T. Kalyani, S. J. Dhoble, *Novel materials for fabrication and encapsulation of OLEDs*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 44(2015) 319-347.
4. J. Yang, C. K. Suman, C. Lee, *Effect of type-II quantum well of m-MTDATA/ $\alpha$ -NPD on the performance of green organic light-emitting diodes*, Microelectronics Journal, 40(2009) 63-65.
5. Q. Dong, F. Tai, H. Lian, Z. Chen, M. Hu, J. Huang, W. Y. Wong, *Thermally stable bipolar host materials for high efficiency phosphorescent green and blue organic light-emitting diodes*, Dyes and Pigments, 143(2017) 470-478.
6. A. Kitai, *Luminescent materials and applications*, John Wiley & Sons, 25(2008).
7. S. M. Raupp, L. Merklein, M. Pathak, P. Scharfer, W. Schabel, *An experimental study on the reproducibility of different multilayer OLED materials processed by slot die coating*, Chemical Engineering Science, 160(2017) 113-120.
8. J. K. Lee, S. Cho, W. K. Dong, *Analysis of light leakage between the adjacent pixels in a color-filter stacked white OLED display*, Displays 45(2016) 6-13.
9. F. Ely, C. O. Avellaneda, P. Paredez, V. C. Nogueira, T. E. A. Santos, V. P. Mammana, L. Zhao, *Patterning quality control of inkjet printed PEDOT: PSS films by wetting properties*, Synthetic Metals, 161(2011) 2129-2134.



شکل ۹. نمودار بازده جریان بر حسب چگالی جریان برای دیودهای ساخته شده با ضخامت‌های متفاوت لایه MoO<sub>3</sub>

#### نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور ساخت و بهینه‌سازی دیود گسیلنده چندلایه آلی نور سبز، لایه‌های MoO<sub>3</sub>، TPD، Alq<sub>3</sub>، LiF و Al به ترتیب روی زیرلایه شفاف آندی ITO به روش تبخیر حرارتی انباشت شدند. در ساختار OLED موردنظر با در نظر گرفتن دامنه تغییرات مناسب در ضخامت لایه‌ها، ضخامت بهینه لایه‌های Alq<sub>3</sub>، TPD و لایه میانگیر MoO<sub>3</sub> تعیین شد. پس از بررسی پارامترهای نورسنجی دیودهای ساخته شده، ضخامت ۴۵ نانومتر برای Alq<sub>3</sub> به عنوان لایه انتقال‌دهنده و گسیلنده الکترون، ضخامت ۴۰ نانومتر برای لایه انتقال‌دهنده حفره TPD و ضخامت ۱۵ نانومتر برای MoO<sub>3</sub> که نقش لایه میانگیر تزریق‌کننده حفره را ایفا می‌کند، تعیین شد. در بهترین نمونه که با ضخامت‌های بهینه ساخته شد، نه تنها قطعه ساخته شده شدت نوردهی مناسب دارد، بلکه ولتاژ آستانه آن نیز تا ۳/۹ ولت کاهش پیدا کرده است که می‌تواند فاکتور مهمی در این وسایل به‌شمار آید.

#### تقدیر و تشکر

این کار با همکاری مرکز پژوهشی نانوفناوری دانشگاه شهرکرد انجام شده است، از این رو نویسندگان از معاونت پژوهشی و مرکز پژوهشی نانوفناوری دانشگاه



10. H. Yersin, *Highly efficient OLEDs with phosphorescent materials*, John Wiley & Sons, 2008.
11. G. Kumar, S. Biring, Y. N. Lin, S. W. Liu, C. H. Chang, *Highly efficient ITO-free organic light-emitting diodes employing a roughened ultra-thin silver electrode*, *Organic Electronics*, 42(2017) 52-58.
12. S. Jeong, and J. I. Hong, *Extremely deep-blue fluorescent emitters with CIEy  $\leq 0.04$  for non-doped organic light-emitting diodes based on an indenophenanthrene core*, *Dyes and Pigments*, 144(2017) 9-16.
13. B. Huang, X. Ban, K. Sun, Z. Ma, Y. Mei, W. Jiang, Y. Sun, *Thermally activated delayed fluorescence materials based on benzophenone derivative as emitter for efficient solution-processed non-doped green OLED*, *Dyes and Pigments*, 133(2016) 380-386.
14. X. W. Zhang, J. Li, L. Zhang, H. P. Lin, X. Y. Jiang, W. Q. Zhu, Z. L. Zhang, *Improved performance of Si-based top-emitting organic light-emitting device using MoO<sub>x</sub> buffer layer*, *Synthetic Metals*, 160(2010) 788-790.
15. L. M. Yee, W. M. Yunus, Z. A. Talib, A. Kassim, *Effect of Thickness of Tris (8-Hydroxyquinolino) Aluminum on the Photoluminescence and IV Characteristic of Organic Light Emitting Structure*, *American Journal of Applied Sciences*, 7(2010) 1215.
16. Y. S. Tsai, F. S. Juang, T. H. Yang, M. C. Yokoyama, L. W. Ji, Y. K. Su, *Effects of different buffer layers in flexible organic light-emitting diodes*, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 69(2008) 764-768.
17. B. Ding, W. Zhu, X. Jiang, Z. Zhang, *Pure blue emission from undoped organic light emitting diode based on anthracene derivative*, *Current Applied Physics*, 8(2008) 523-526
18. D. Saikia, R. Sarma, *Improved performance of organic light-emitting diode with vanadium pentoxide layer on the FTO surface*, *Pramana*, 88(2017) 83/1-83/6.
19. S. Lattante, *Electron and hole transport layers: their use in inverted bulk heterojunction polymer solar cells*, *Electronics*, 3(2014) 132-164.
20. Z. Wu, D. Ma, *Recent advances in white organic light-emitting diodes*, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 107(2016) 1-42.