

بهبود تزریق حفره در دیودهای نورگسیل آلی: مقایسه‌ای میان یک پلیمر رسانا و یک مولکول کوچک^۱

عزالدین مهاجرانی*^۲، ابراهیم مهرپرور^۳،
محمد رضا فتح‌اللهی^۴، رسول بابایی^۵

تاریخ ارسال: ۱۳۹۴/۰۹/۲۹

تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۰۷/۱۷

چکیده

در این مقاله، اثر لایه‌ی تزریق‌کننده‌ی حفره در بهبود عملکرد دیودهای نورگسیل آلی مورد بررسی قرار گرفته است. به‌خصوص کارآیی لایه‌ی ای از پلیمر رسانا، شامل پلی تیوفن - آماده شده به روش لایه‌نشانی چرخش - و کارآیی لایه‌ی ای از مولکول کوچک فتالوسیانین مس - لایه‌نشانی شده به صورت تبخیری - در تزریق حفره، بررسی و مقایسه شده است. در ابتدا با اضافه کردن کلسیم به ساختار دیود - به عنوان تزریق‌کننده

^۱ شناسه دیجیتال (DOI): 10.22051/jap.2017.7867.1023

^۲ استاد گروه فیزیک دانشگاه شهید بهشتی؛ e-mohajerani@sbu.ac.ir

^۳ فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد رشته فوتونیک دانشگاه شهید بهشتی

^۴ پژوهشیار فرا دکتری دانشگاه شهید بهشتی

^۵ فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد رشته نانو دانشگاه رازی کرمانشاه

الکترون - ولتاژ روشن شدن از $11/4$ به $1/5$ ولت کاهش یافت. در ادامه اثر افزودن لایه‌های تزریق کننده حفره متفاوت (پلی تیوفن و فتالوسیانین مس) به ساختار دیود، به منظور بهبود عملکرد قطعه مورد بررسی قرار گرفت. مشخصه‌های مختلف قطعه از جمله چگالی جریان - ولتاژ، طیف الکترو لومینسانس، روشنایی بر حسب ولتاژ و طول عمر قطعات و همچنین بازده جریان، اندازه گیری شد. کاهش ولتاژ آستانه‌ی روشنایی از $1/5$ به $6/5$ ولت، افزایش شدت طیف الکترو لومینسانس، افزایش شدت نورخروجی از 1160 Cd/m^2 به 1600 Cd/m^2 ، افزایش طول عمر از 72 به 94 ساعت و افزایش بازده جریان از $0/2 \text{ Cd/A}$ به $0/6 \text{ Cd/A}$ با لایه نشانی فتالوسیانین مس به عنوان لایه تزریق کننده حفره در ساختار قطعه مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: دیود نورگسیل آلی، لایه تزریق کننده حفره،

پلی تیوفن، فتالوسیانین مس

۱- مقدمه

دیودهای نورگسیل آلی به دلیل قابلیت‌های منحصر به فردی که نسبت به دیگر انواع قطعات تابنده از خود نشان می‌دهند، مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند. از جمله این قابلیت‌ها می‌توان به امکان ساخت نمایشگرهای شفاف، نمایشگرهای قابل انعطاف و نمایشگرهایی در ابعاد بسیار کوچک اشاره نمود که تنها به کمک تکنولوژی دیودهای آلی قابل تحقق می‌باشند [۴-۱].

در یک دیود آلی پارامترهای متنوعی بیانگر کیفیت عملکرد قطعه نورتاب می‌باشند، که از آن جمله می‌توان به ولتاژ کاری قطعه، شدت روشنایی آن، رنگ تابش حاصله و بازده جریان و بازده توان قطعه اشاره نمود. بازده تابش نور در یک دیود نورگسیل به چهار عامل بستگی دارد: تعادل بار^۱، نسبت سینگلت به تریپلت^۲، بازده کوانتومی

¹ Charge balance

² To triplet ratio Singlet

فوتولومینسانس^۱، جفت شدگی به بیرون قطعه^۲ [۷-۵]. از این رو یکی از عوامل اصلی در کارکرد بهینه قطعه نورگسیل، متعادل بودن تزریق حامل ها و در نتیجه جریان الکترون ها و حفره ها درون قطعه می باشد. در این قطعات، الکترون ها و حفره ها از سمت الکترودها به درون لایه آلی تزریق می شوند. حامل ها تحت اثر میدان اعمالی به درون قطعه ترابرد یافته، در محل لایه تابنده زوج اکسایتون تشکیل داده و نهایتا با باز ترکیب اکسایتون، تابش نور حاصل می گردد [۹-۸].

همان گونه که اشاره گردید اولین مرحله برای ایجاد تابش در قطعه، تزریق موثر حامل ها به درون لایه آلی می باشد، از این رو عدم انطباق مناسب ترازهای انرژی میان الکترودها و لایه ترابرنده حفره، یکی از دلایل اصلی کاهش بازده در دیودهای نورگسیل آلی محسوب می شود [۱۱-۱۰]. از جمله رهیافت های مطرح شده در بهبود عملکرد قطعات تابنده آلی، بکارگیری یک لایه واسط به نام لایه تزریق کننده حامل میان الکترودها و لایه ترابرنده مورد توجه می باشد [۱۲]. بکارگیری پلیمر رسانای پلی اتیلن دی اکسی تیوفن مخلوط شده در پلیمر استایرن سولفنیت^۳ به عنوان لایه تزریق کننده حفره مقبولیت و عمومیت زیادی میان جامعه علمی پیدا نموده است [۱۳]. این امر به علت خواص جالب توجه این پلیمر رسانا و به خصوص سهولت فرآیند لایه نشانی آن به کمک روش های بر پایه محلول ها بوده است. با این حال بکارگیری مواد دیگر با عملکرد مناسب تر قطعا مورد توجه خاصی خواهد بود.

در این مقاله به بررسی و مقایسه نقش فتالوسیانین مس^۴ در مقابل پلیمر رسانای بر پایه تیوفن به عنوان لایه تزریق کننده حفره (HIL) در دیودهای نورگسیل آلی پرداخته شده است. به خصوص نشان داده شده کمپلکس مولکول کوچک فتالوسیانین مس عملکرد بهتری نسبت به پلیمر رسانا شامل تیوفن در ساختار دیودی مورد مطالعه به عنوان یک ساختار استاندارد تبخیری از خود نشان می دهد؛ لذا به کارگیری عمومی مخلوط پلیمر رسانا بر اساس تیوفن برای تمامی کاربردها لزوما منجر به بهترین نتایج ممکن نمی گردد. در ادامه پس از تشریح مواد به کار رفته، ساختار قطعات و نحوه انجام آزمایشات، در ابتدا با

¹ photoluminescence quantum efficiency

² Outcoupling

³ Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate)

⁴ Copper(II) phthalocyanine

مطالعه دو ساختار شامل کلسیم و دیگری بدون آن، به بررسی اهمیت تزریق حامل‌ها و بالانس بودن جریان الکترون-حفره در قطعه پرداخته شده و سپس در یک قطعه با ساختار بهینه برای تزریق الکترون، به بررسی و مقایسه عملکرد مولکول کوچک فتالوسیانین مس آماده شده به روش تبخیری با پلیمر رسانای شامل تیوفن آماده شده به روش لایه نشانی چرخشی پرداخته شده است. در این رابطه مشخصات مختلف قطعات از جمله نمودارهای چگالی جریان بر حسب ولتاژ، شدت روشنایی بر حسب ولتاژ، طیف تابش الکترو لومینسانس و طول عمر قطعه و بازده جریان مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این مقاله، موادی که برای ساخت دیودها مورد استفاده قرار گرفته اند عبارتند از: لایه پلیمر رسانای پلی اتیلن دی اکسی تیوفن مخلوط شده در پلیمر استایرن سولفونیت (با نام اختصاری انگلیسی PEDOT:PSS) بعنوان لایه تزریق کننده حفره، لایه ای از ماده آلی مولکول کوچک فتالوسیانین مس (با نام اختصاری انگلیسی CuPc) بعنوان لایه تزریق کننده حفره، لایه ای از یکی از ترکیبات بنزداین به نام *in*، *in* پرایم- بیس (تری- متیل فنیل)- *in*، *in* پرایم دی فنیل بنزداین (با نام اختصاری TPD^۱) بعنوان لایه انتقال دهنده حفره، لایه ای از نمک آلی- فلزی به نام هیدروکسی کوینولاین آلومینیم (با نام اختصاری Alq₃) در نقش لایه انتقال دهنده الکترون و همچنین لایه نورگسیل و در نهایت لایه‌های فلزی کلسیم (Ca) و نقره (Ag) بعنوان کاتد مورد استفاده قرار گرفتند. تمامی مواد ذکر شده از شرکت آلدریچ خریداری شدند و بدون هرگونه خالص سازی بیشتر مورد استفاده قرار گرفتند.

ساختار دیودهای مورد مطالعه بدین قرار می‌باشند: ITO/HIL/TPD/Alq₃/Ca/Ag که در اینجا PEDOT:PSS و CuPc به عنوان لایه تزریق کننده حفره مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ساختار مولکولی این دو ماده در شکل ۱ نشان داده شده است. در ابتدا

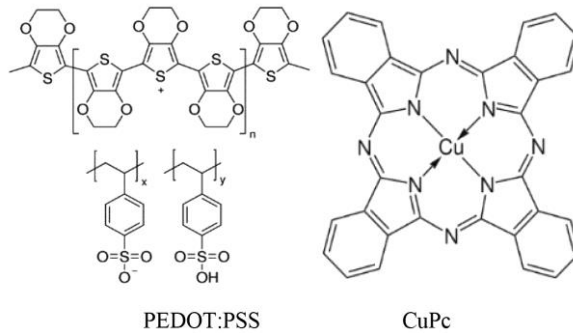
^۱ *N,N'*-Bis(3-methylphenyl)-*N,N'*-diphenylbenzidine

^۲ 8-Hydroxyquinoline aluminum salt

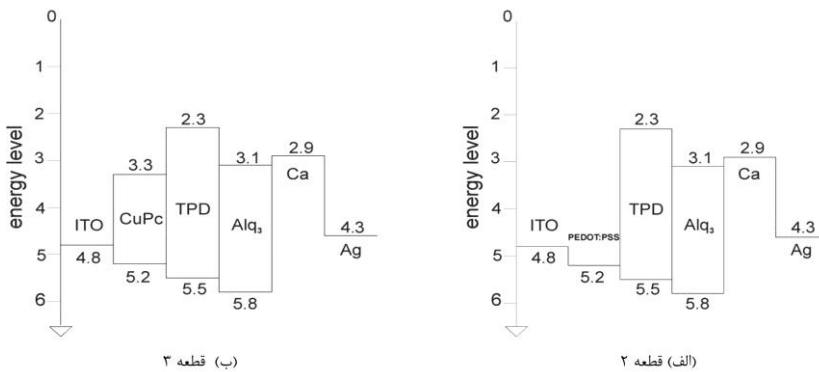
زیرلایه‌های ITO^۱ را در حلال‌های آب دوبار تقطیر، استون، اتانول، متانول، پروپانول هر کدام به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه اولتراسونیک شستشو داده و سپس زیر لایه‌ها با فشار گاز نیتروژن خشک شدند [۱۴]. در شکل ۲ شماتیکی از ترازهای انرژی لایه‌های مختلف استفاده شده در قطعات ساخته شده، قابل ملاحظه است. در نهایت سه قطعه، ساخته و مورد بررسی قرار گرفت که در جدول ۱ ساختار آن‌ها آورده شده است. در قطعه ۱ و ۲ لایه‌ی تزریق‌کننده‌ی حفره PEDOT:PSS به ضخامت ۶۰ nm بر روی زیر لایه‌ی ITO از پیش تمیز شده، به روش لایه نشانی چرخشی با استفاده از دستگاه لایه نشانی دورانی (ساخت شرکت ویرا تجارت بکر با نام تجاری VCOAT) و با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و با مدت لایه نشانی برابر با ۳۰ ثانیه لایه نشانی شد و سپس به منظور تبخیر و خروج حلال از لایه درون آن با دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس و به مدت ۲۰ دقیقه قرار گرفت. در قطعه ۳، CuPc به روش لایه نشانی تبخیری بر روی ITO تمیز شده در فشار 5×10^{-6} mbar و به ضخامت ۱۵ nm به کمک دستگاه گلاوباکس مجتمع با لایه نشانی (ساخت شرکت ویژه گران فرآیند) لایه نشانی شد. سپس در هر سه ساختار لایه‌های دیگر به ترتیب TPD(30nm)، Alq₃(60nm)، Ca(35nm)، Ag(90nm) به روش لایه نشانی تبخیری و در فشار 5×10^{-6} mbar لایه نشانی شدند. ضخامت لایه پلیمری با استفاده از پروفایلومتر دک تک ۸۰۰۰ (Dektak 8000 Profilometer) و لایه‌های مولکول کوچک و کاتد با استفاده از ضخامت‌سنج کریستالی شرکت سیگما اینسترومنت (Sigma Instrument) نصب شده بر روی دستگاه لایه‌نشانی تبخیری اندازه‌گیری شد. ناحیه فعال دیودهای نور گسیل ساخته شده برابر با $3 \times 1/5$ mm² می‌باشد، که بر طبق سطح تقاطع میان کاتد و آند تعیین می‌گردد. مشخصه الکتریکی یعنی چگالی جریان بر حسب ولتاژ (J-V)، طیف الکترو لومینسانس و شدت نور خروجی قطعات ساخته شده به ترتیب با دستگاه کیتلی Ocean Optic 4000، Lux Meter و اندازه‌گیری شد. همچنین بازده قطعات بر اساس شدت نور خروجی، چگالی جریان قطعه و ولتاژ کاری آن محاسبه گردید.

^۱ Indium Tin Oxide

۷۰ / بهبود تزریق حفره در دیودهای نورگسیل آلی: مقایسه‌ای میان یک پلیمر رسانا و یک مولکول کوچک



شکل ۱. ساختار مولکولی PEDOT:PSS و CuPc



شکل ۲: شماتیکی از ترازهای انرژی لایه‌ها در قطعه ۲ و ۳

جدول ۱: ساختار قطعات ساخته شده

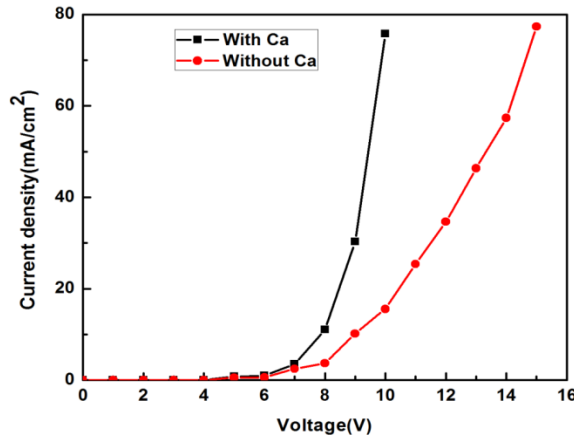
نام قطعه	ساختار قطعه
۱	ITO/PEDOT:PSS/TPD/Alq ₃ /Ag
۲	ITO/PEDOT:PSS/TPD/Alq ₃ /Ca/Ag
۳	ITO/CuPc/TPD/Alq ₃ /Ca/Ag

۳- نتایج و بحث

(۳-۱) اثر اضافه کردن کلسیم به ساختار دیود

شکل ۳ نمودار چگالی جریان بر حسب ولتاژ برای دو قطعه ۱ و ۲، را با یکدیگر مقایسه نموده است. همان‌طور که از نمودار ملاحظه می‌گردد، در قطعه ۲ که در آن از کلسیم به

عنوان تزریق کننده الکترون استفاده شده است نسبت به قطعه ۱ که در آن کلسیم به کار برده نشده است، در ولتاژ کمتر جریان بیشتری عبور می نماید که این منجر به روشن شدن قطعه در ولتاژ پایین تر می گردد. به خصوص ولتاژ آستانه‌ی روشن شدن از ۱۱/۴ به ۸/۵ ولت کاهش پیدا کرد.



شکل ۳: نمودار چگالی جریان بر حسب ولتاژ دو قطعه با کلسیم و بدون کلسیم

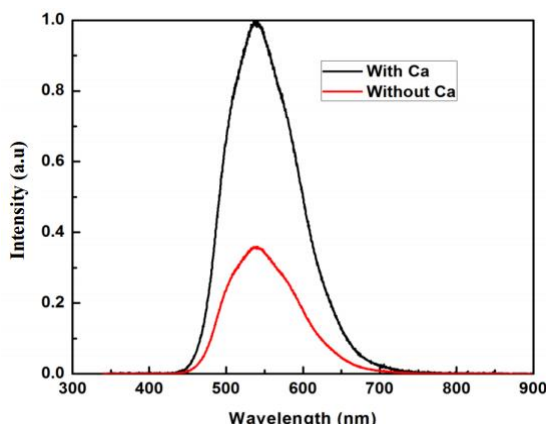
همچنین شکل ۴ طیف الکترو لومینسانس (EL) دو نمونه در ۱۳ ولت را نشان داده است که به وضوح بیان می دارد؛ ساختاری که در آن از کلسیم استفاده شده است، شدت الکترو لومینسانس (EL) بیشتری نسبت به ساختار بدون کلسیم دارد؛ که این پدیده به دلیل تزریق بهتر الکترون به درون لایه ی نور گسیل است.

به طور کلی موادی که به عنوان کاتد به کار گرفته می شوند باید تابع کار پایین داشته باشند تا با تراز مربوط به الکترون ها در ماده آلی یعنی پایین ترین اوربیتال مولکولی اشغال نشده^۱ کمترین اختلاف ممکن را داشته باشند. پایین ترین اوربیتال مولکولی اشغال نشده ماده تابنده (Alq₃) دارای تراز انرژی ای برابر ۳/۱ الکترون ولت و تابع کار کلسیم و نقره به ترتیب ۲/۹ و ۴/۳ الکترون ولت می باشد [۱۷-۱۵]. همانطور که مشخص است اختلاف تراز انرژی الکترونی ماده آلی و تابع کار کلسیم و نقره به ترتیب برابر ۰/۲ و ۱/۲ الکترون ولت است. بنابراین ساختار با کاتد کلسیم، تزریق الکترون بسیار سریعتری در

¹ Lowest unoccupied molecular orbital

۷۲ / بهبود تزریق حفره در دیوده‌های نورگسیل آلی: مقایسه‌ای میان یک پلیمر رسانا و یک مولکول کوچک

مقایسه با کاتد نقره انجام می‌دهد که در کاهش ولتاژ آستانه و همچنین افزایش طیف الکترو لومینسانس قطعه موثر می‌باشد.



شکل ۴: طیف الکترو لومینسانس دو قطعه با کلسیم و بدون کلسیم در ولتاژ بایاس ۱۳ ولت

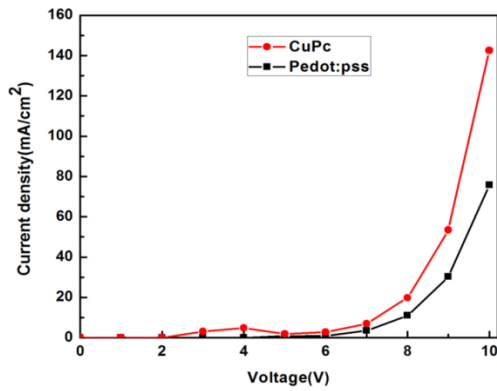
(۲-۳) اثر فتالوسیانین مس در مقابل پلیمر رسانای پلی تیوفن

در ادامه، بهبود تزریق حفره به کمک مولکول کوچک فتالوسیانین مس در مقابل پلیمر رسانای شامل پلی تیوفن مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. شکل ۵ نمودار چگالی جریان بر حسب ولتاژ را برای دو ساختار مقایسه می‌نماید. ولتاژ آستانه‌ی روشنایی در قطعه ۲، ۸/۵ ولت و در قطعه ۳، ۶/۵ ولت بوده است. با افزایش ولتاژ، چگالی جریان و همچنین میزان روشنایی نیز افزایش یافت. از آنجا که ترازهای مرتبط با حفره‌ها یعنی بالاترین اوربیتال مولکولی اشغال شده^۱ در هر دو ماده تقریباً برابر است لذا این کاهش ولتاژ روشنایی می‌بایست ناشی از تاثیر عواملی بجز تطابق ترازهای انرژی در ساختار دیود نورگسیل در نظر گرفته شود. در قطعه ۳، CuPc ساختار مولکول کوچک دارد و به روش تبخیری لایه نشانی شده است. اولاً در روش تبخیری کیفیت سطح لایه بدست آمده یکنواخت تر می‌باشد و همچنین اتصال مناسب تری به لایه‌ی آلی بعدی که TPD می‌باشد برقرار می‌کند. اتصال بهتر لایه‌ی CuPc به لایه‌ی بالایی TPD، انتقال حامل‌های حفره را به

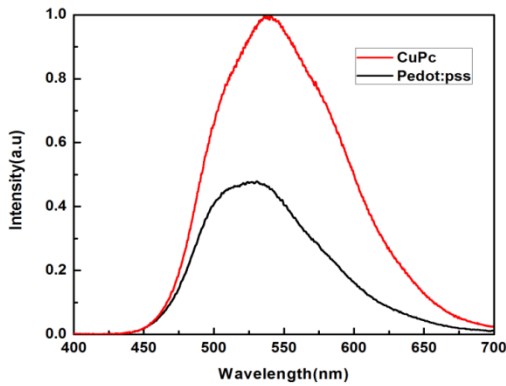
¹ Howest occupied molecular orbital

لایه‌ی TPD تسهیل کرده است که این امر موجب کاهش ولتاژ آستانه‌ی روشنایی نسبت به قطعه ۲، که PEDOT:PSS به روش چرخشی لایه نشانی می‌شود، شده است. همچنین ضخامت لایه CuPc در مقایسه با لایه PEDOT:PSS کمتر می‌باشد که این خود منجر به کاهش مقاومت سری و تلفات و افت ولتاژ ناشی از آن می‌گردد. در شکل ۶ شماتیکی از طیف الکترو لومینسانس دو قطعه در ولتاژ ۱۰ ولت، نمایش داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که شدت طیف گسیلی قطعه شماره ۳ نسبت به قطعه شماره ۲ بیشتر است. به طور معمول تزریق و انتقال الکترون در مواد آلی انتقال دهنده الکترون نسبت به تزریق و انتقال حفره در مواد آلی انتقال دهنده حفره کمتر است. لذا برقراری تعادل بین تعداد حامل‌های بار الکترون و حفره در لایه نور گسیل، تاثیر بسزایی در بازده دیود ساخته شده خواهد داشت. کم بودن تحرک حفره در لایه‌ی CuPc نسبت به پلیمر PEDOT:PSS این امکان را فراهم می‌کند که تعداد حامل‌های حفره‌ی انتقال یافته به لایه‌ی نور گسیل با تعداد حامل‌های الکترون برابری و تعادل بیشتری پیدا کنند و در نتیجه نور گسیلی قطعه افزایش یابد. شکل ۷ نمودار شدت نور خروجی بر حسب ولتاژ دو قطعه را نشان داده است. در شکل ۸ نموداری از طول عمر قطعات ساخته شده به نمایش گذاشته شده است. مشاهده می‌شود که قطعه شماره ۲ نسبت به قطعه شماره ۳، طول عمر کمتری دارد که در اینجا نقش مهم لایه‌ی CuPc نیز کاملاً مشخص است و به خصوص با کاهش ولتاژ روشن شدن و به تبع آن کاهش میدان الکتریکی خارجی، طول عمر قطعه افزایش می‌یابد. جدول شماره ۲، مشخصات دیودهای مختلف را خلاصه و با یکدیگر مقایسه می‌نماید. ملاحظه می‌گردد ساختار بهینه با بکارگیری کلسیم در سمت کاتد و بکارگیری لایه تزریق کننده حفره فتالوسیانین مس در سمت آنند منجر به بهترین کارکرد در میان قطعات مورد مطالعه شده است. در این قطعه ولتاژ روشن شدن برابر ۶/۵ ولت، ماکزیمم شدت تابش نور برابر ۱۶۰۰ کاندلا بر متر مربع و ماکزیمم بازده جریان برابر ۰/۶ کاندلا بر آمپر می‌باشد. همچنین طول عمر قطعه اندازه گیری شده در محیط مملو از عوامل تخریب کننده مانند رطوبت و اکسیژن در حدود ۱/۳ برابر افزایش یافته است. شکل ۹ تصویر قطعه ۳ در حال کار تحت ولتاژ ۱۰ ولت را نشان می‌دهد.

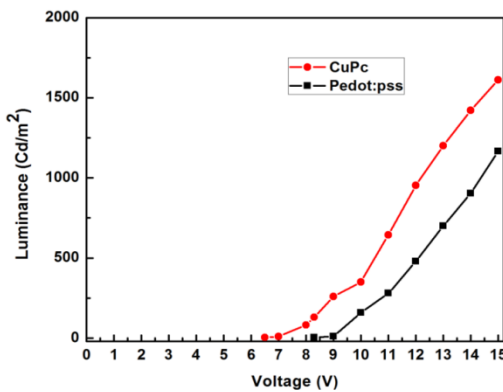
۷۴ / بهبود تزریق حفره در دیودهای نورگسیل آلی: مقایسه‌ای میان یک پلیمر رسانا و یک مولکول کوچک



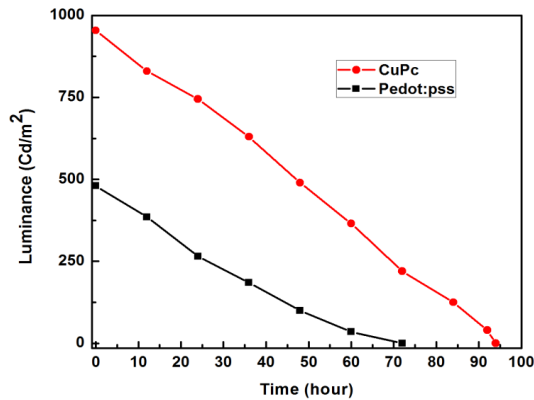
شکل ۵: نمودار چگالی جریان بر حسب ولتاژ برای دو قطعه شماره ۲ و ۳



شکل ۶: نمودار طیف الکترو لومینسانس برای قطعه شماره ۲ و ۳ در ولتاژ اعمالی ۱۰ ولت



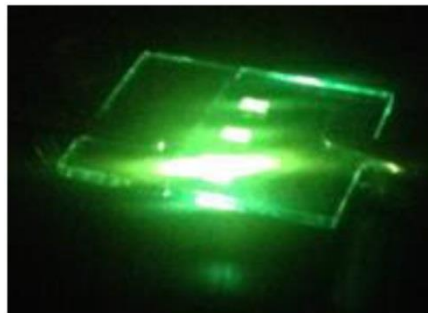
شکل ۷: نمودار شدت نور خروجی بر حسب ولتاژ قطعه ۲ و ۳



شکل ۸: نمودار طول عمر قطعه ۲ و ۳

جدول ۲: مشخصات دیودهای ساخته شده

نام قطعه	ولتاژ روشن شدن (ولت)	ماکزیمم شدت نور خروجی (کاندلا بر متر مربع)	طول عمر (ساعت)	ماکزیمم بازده جریان (کاندلا بر آمپر)
۱	11.4
۲	8.5	1160	72	0.2
۳	6.5	1600	94	0.6



شکل ۹: تصویر قطعه ۳ تحت ولتاژ ۱۰ ولت

۴- نتیجه گیری

لایه‌ی تزریق کننده حفره به چند دلیل برای بهبود عملکرد دیود آلی مورد استفاده قرار می‌گیرد مانند: اتصال مکانیکی خوب، تنظیم تراز انرژی، کاهش جریان نشتی، کاهش ولتاژ کاری و بالا بردن پایداری حرارتی و افزایش بازدهی کوانتومی. در این تحقیق نشان داده شد که استفاده از لایه‌ی CuPc تاثیر قابل توجهی در افزایش شدت نور خروجی قطعه دارد.

همچنین برقراری اتصال مناسب CuPc با لایه مولکول کوچک دیگر_ که در اینجا TPD است_، منجر به کاهش ولتاژ آستانه‌ی روشنایی و افزایش شدت روشنایی می‌شود. بعلاوه لایه‌ی CuPc همانند لایه‌های الکتروود از تخریب لایه‌ی آلی در برابر اکسیژن جلوگیری می‌کند که تاثیر قابل توجهی در افزایش طول عمر قطعه و همچنین در روشنایی قطعه دارد.

۵- سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت‌های صورت گرفته توسط دانشگاه شهید بهشتی و همچنین ستاد حمایت از فناوری نانو کشور در انجام این تحقیق قدردانی می‌گردد. بعلاوه از جناب آقایان مهندس معصومیان، برنک، ولدخانی و دیگر دوستان در شرکت ویژه‌گران فرآیند و همچنین همکاران آزمایشگاه آقایان کوهکن، مهرزاد، کلهر و شجاعی فر به جهت حمایت‌های فنی و بحث‌های مفید در زمینه تکمیل این پژوهش تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

- [1] G. Gu, V. Bulović, P. E. Burrows, S. R. Forrest, and M. E. Thompson; "Transparent organic light emitting devices"; *Applied Physics Letters* **68**, No. 19 (1996) 2606-2608.
- [2] G. Gu, P. E. Burrows, S. Venkatesh, S. R. Forrest, and M. E. Thompson; "Vacuum-deposited, nonpolymeric flexible organic light-emitting devices"; *Optics letters* **22**, No. 3 (1997) 172-174.
- [3] J. Birnstock, J. Blässing, A. Hunze, M. Scheffel, M. Stöbel, K. Heuser, G. Wittmann, J. Wörle, and A. Winnacker; "Screen-printed passive matrix displays based on light-emitting polymers"; *Applied Physics Letters* **78**, No. 24 (2001) 3905-3907.
- [4] M. Stewart, R.S. Howell, L. Pires, and M. K. Hatalis; "Polysilicon TFT technology for active matrix OLED displays"; *Electron Devices, IEEE Transactions on* **48**, No. 5 (2001) 845-851.
- [5] N. Chopra, J. Lee, Y. Zheng, S.H. Eom, J. Xue, and F. So; "Effect of the charge balance on high-efficiency blue-phosphorescent organic light-emitting diodes"; *ACS applied materials & interfaces* **1**, No. 6 (2009) 1169-1172.
- [6] Y. Kawamura, H. Sasabe C. Adachi, "Simple accurate system for measuring absolute photoluminescence quantum efficiency in organic solid-state thin films." *Japanese journal of applied physics* **43**, No. 11R (2004) 7729.

- [7] K. Saxena, D. S. Mehta, V. K. Rai, , R. Srivastava, , G. Chauhan, M.N. Kamalasanan, "Implementation of anti-reflection coating to enhance light out-coupling in organic light-emitting devices." *Journal of Luminescence* 128, No. 3 (2008) 525-530.
- [8] N. T. Kalyani, S. J. Dhoble; "Organic light emitting diodes: Energy saving lighting technology—A review"; *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, No. 5 (2012) 2696-2723.
- [9] A. Islam, M. Rabbani, M. H. Bappy, M. A. R. Miah, N. Sakib; "A review on fabrication process of organic light emitting diodes"; In *Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), 2013 International Conference on*, pp. 1-5. IEEE, 2013.
- [10] Y. Chen, H. Tian, Y. Geng, J. Chen, , D. Ma, , D. Yan, L. Wang; "Organic heterojunctions as a charge generation layer in tandem organic light-emitting diodes: the effect of interfacial energy level and charge carrier mobility"; *J. Mater. Chem.* 21, No. 39 (2011) 15332-15336.
- [11] S. Olthof, R. Meerheim, M. Schober, K. Leo; "Energy level alignment at the interfaces in a multilayer organic light-emitting diode structure"; *Physical Review B* 79, No. 24 (2009) 245308.
- [12] P.Y. Chen, H.Y. Ueng, and M. Yokoyama; "Effects of different buffer layers on the electro-luminescence performances in white organic light-emitting diodes"; *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 71, No. 6 (2010) 922-925.
- [13] T. C. Li, R. C. Chang, and Y. J. Chen; "Improving the Performance of Organic Light Emitting Diodes by Doping PEDOT: PSS"; In *Advanced Materials Research*, vol. 881, pp. 1130-1135. 2014.
- [14] R. B. Pode, C. J. Lee, et al. "Transparent conducting metal electrode for top emission organic light-emitting devices: Ca–Ag double layer." *Applied physics letters* 84. No. 23 (2004) 4614-4616.
- [15] W. M. Su, W. L. Li, Q. Zin, et al. "Effect of acceptor on efficiencies of exciplex-type organic light emitting diodes." *Applied Physics Letters* 91. No. 4 (2007) 043508.
- [16] Z. EnáOoi, T. LipáTam, et al. "Solution processable bulk-heterojunction solar cells using a small molecule acceptor." *Journal of Materials Chemistry* 18. No. 39 (2008) 4619-4622.
- [17] M. S. White, D. C. Olson, S. E. Shaheen, et al. "Inverted bulk-heterojunction organic photovoltaic device using a solution-derived ZnO underlayer." *Applied Physics Letters* 89. No.14 (2006) 143517.