

Review on Metal-Free Light-emitting Dyes for OLED

Mozhgan Hosseinnezhad^{1*}, Sohrab Nasiri²

1- Department of Organic Colorants, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box: 16765-654, Tehran, Iran.

2- Department of Engineering and Physics, Karlstad University, P. O. Box: 65188, Karlstad, Sweden.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 10-05-2022

Accepted: 03-07-2022

Available online: 16-10-2022

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOR: 20.1001.1.22517278.1401.12.2.1.8

Keywords:

Organic light-emitting diodes

Organic emitter

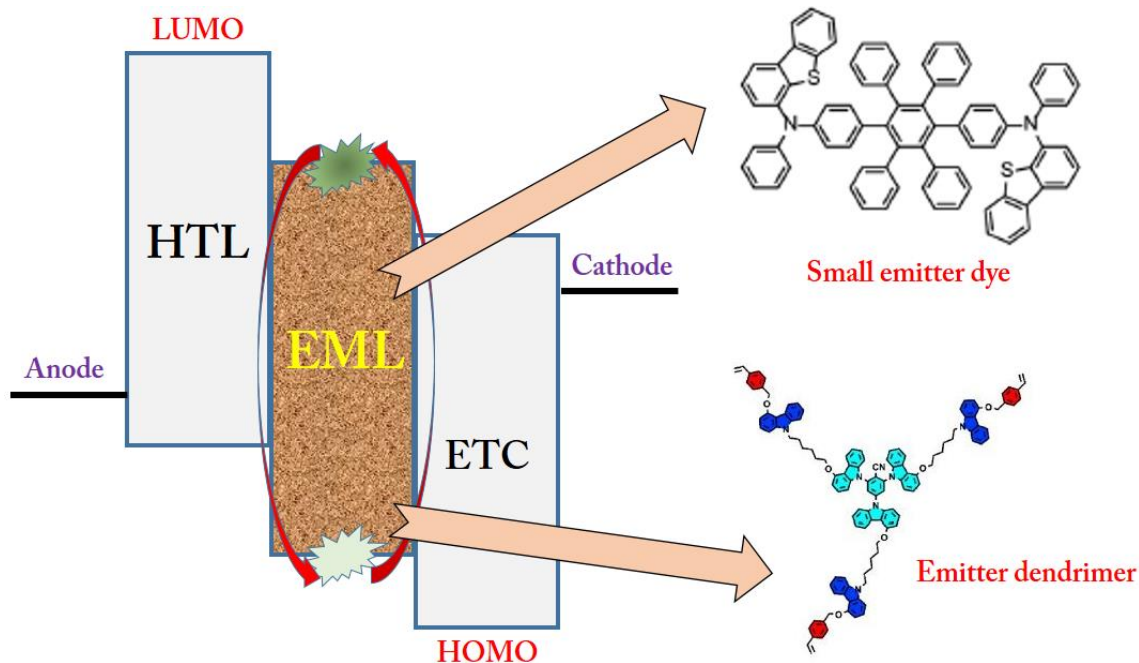
Metal-free components

Dendrimers

Display

ABSTRACT

Organic light emitting diodes containing organic materials and components create a bright vision in the development of displays and lighting technology due to the reduction of costs, the facility of the production process, and the production process due to the elimination of noble heavy metals. Today, much research is being done on developing high-efficiency of the organic emitter. For this purpose and design of effective material, it is necessary to pay attention to two points: 1) how to overcome the efficiency limit caused by the number of spin-exactions and 2) how to increase the efficiency of out-coupling. Metal-free compounds usable in organic light emitting diodes are classified into two general classes, small molecule compounds and dendrimers. Various emitter compounds are synthesized from these classes and evaluated for use in the structure of OLED. This article reviews metal-free organic emitters for use in Organic light emitting diodes.



*Corresponding author: hosseinnezhad-mo@icrc.ac.ir





مروری بر مواد رنگزای عاری از فلز نورتاب برای استفاده در دیودهای آلی نورتاب

مژگان حسین نژاد^{۱*}، سهراب نصیری^۲

۱- دانشیار، گروه پژوهشی مواد رنگزای آلی، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵۴.

۲- پژوهشگر پسا دکتري، دانشکده مهندسی و فیزیک، دانشگاه کارلستاد، کارلستاد، سوئد، صندوق پستی: ۶۵۱۸۸.

چکیده

دیودهای نورتاب آلی که از مواد و تجهیزات آلی تهیه می‌شوند به دلیل کاهش هزینه‌ها و سهولت فرآیند تهیه و تولید ناشی از حذف فلزات سنگین، افق روشنی در توسعه نمایشگرها و فناوری تولید روشنائی ایجاد می‌کنند. امروزه، تحقیقات زیادی بر روی توسعه مواد نورتاب آلی با کارایی بالا انجام می‌شود. برای این منظور و طراحی یک ماده موثر، توجه به دو نکته ضروری است: (۱) چگونگی غلبه بر محدودیت بازده ناشی از تعداد اسپین-اکسایتون و (۲) روش افزایش بازده جفت‌شدگی بیرونی. ترکیبات عاری از فلز قابل استفاده در دیودهای آلی نورتاب به دو طبقه کلی، ترکیبات کوچک مولکول و دندریمرها دسته‌بندی می‌شوند. ترکیبات نورتاب متنوعی از این طبقه‌ها سنتز و برای کاربرد در ساختار دیودهای آلی نورتاب مورد ارزیابی قرار گرفته است. این مقاله مروری بر مواد رنگزای تابش‌کننده آلی عاری از فلز برای استفاده در دیودهای آلی نورتاب می‌باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۱/۰۷/۲۴

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOR: 20.1001.1.22517278.1401.12.2.1.8

واژه‌های کلیدی:

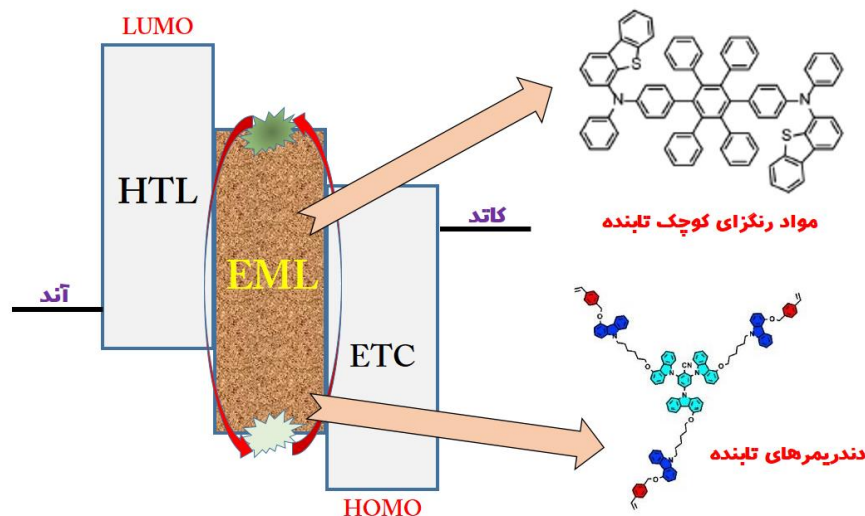
دیودهای آلی نورتاب

تابنده‌های آلی

ترکیبات عاری از فلز

دندریمرها

نمایشگر



*Corresponding author: hosseinnezhad-mo@icrc.ac.ir



۱- مقدمه

افروختگی^۱، پدیده‌ای است که در آن یک ماده در دمای مناسب، تابش الکترومغناطیسی ساطع می‌کند. یک لامپ رشته‌ای، مثلاً سیم تنگستن، در اثر قرارگیری در میدان الکتریکی قوی، نور مرئی تولید می‌کند. اگر این رشته با یک نیمه‌هادی جایگزین شود، انتشار نور نیز قابل مشاهده خواهد شد [۱]. در سال ۱۹۰۷، راند^۲، اولین بار این آزمایش را انجام داد و موفق به ثبت پدیده الکتروتانبدگی^۳ (EL) در حین اعمال میدان الکتریکی در بلورهای کاربید سیلسیم گردید. اولین بار این پدیده برای مواد آلی در دهه ۱۹۵۰ گزارش شد و بعدها در دهه ۱۹۶۰ اولین دستگاه EL تزریق دوگانه آلی با استفاده از بلورهای آنتراسن و الکترودهای تزریق الکترون ارائه گردید [۲]. اولین دیود نورتاب آلی^۴ (OLED) بر پایه لایه‌های آلی ناهمگون در سال ۱۹۸۷ تهیه شد. برای این نوع دستگاه، بخش تابنده، مواد رنگزای فلورسنت هستند. انتشار از باز ترکیب تابشی اکسیتون‌های منفرد ایجاد شده که براساس حالت‌های اسپینی، تنها از ۲۵ درصد از کل اکسیتون‌های تولید شده، استفاده می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که پلیمرهای فلورسنت نیز مانند مواد رنگزای آلی فلورسنت، عملکرد مشابهی در این دستگاه‌ها دارند. تحقیقات نشان می‌دهد که بازده ابزارهای نورتاب بر پایه مواد رنگزای فلورسنت حاوی فلزات نجیب حدوداً چهار برابر مواد رنگزای آلی عاری از فلز است. این پدیده به دلیل باز ترکیب اکسیتون‌های^۵ سه‌گانه است [۳، ۴]. با این حال، با توجه به محدودیت منابع، هزینه تولید و نیاز رو به رشد به این فناوری، کاربرد مواد رنگزای فلورسنت حاوی فلزات نجیب به طور مداوم محدودتر می‌شود. بنابراین، معرفی موادی که علاوه بر هزینه کم، عملکرد بالایی در ابزارهای OLED داشته باشند، می‌تواند در توسعه این فناوری راه‌گشا باشد. توجه به این نکته نیز ضروری است که تاکنون OLED های با نور آبی پایدار به صورت تجاری تهیه نشده‌اند و نیاز به تحقیق و توسعه در این حوزه ضروری است. پس از اولین گزارش در خصوص تولید ابزارهای نورتاب آلی و به ویژه در دو دهه اخیر، هزاران محقق تلاش خود را صرف پیشرفت و کشف بیشتر در این زمینه کرده‌اند که منجر به هزاران مقاله منتشر شده در مجلات و ثبت اختراع شده است [۴]. این حجم وسیع تحقیق و پژوهش برای کاهش قیمت ابزارهای تولیدی، افزایش طول عمر و پاسخگویی در سراسر طیف تهییج از فرابنفش تا زیر قرمز انجام شده و در حال انجام می‌باشد. در این مقاله، هدف معرفی مواد رنگزای آلی عاری از فلز مورد استفاده در ابزارهای آلی نورتاب به عنوان بخش تابنده^۶ است [۵]. برای این منظور ابتدا به معرفی ابزارهای آلی

نورتاب پرداخته و در ادامه مواد رنگزای عاری از فلز فلورسنت مورد استفاده در این دستگاه، چالش‌ها و مزایای آن مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- اجزا و اصول کاربرد

دیودهای آلی نورتاب، دستگاهی با لایه‌های نازک متوالی بهینه شده دقیق از نیمه‌هادی‌ها بوده که هر لایه عملکرد مخصوص به خود را دارند. این لایه‌ها بین الکترودها قرار می‌گیرند تا امکان تزریق حامل بار را در نتیجه بایاس اعمال شده خارجی فراهم کنند. شکل ۱، برش مقطعی از یک دستگاه OLED را نشان می‌دهد. در این شکل، حفره‌ها و الکترون‌ها به ترتیب از یک آند و یک کاتد تزریق می‌شوند، بنابراین پدیده باز ترکیب در مرکز لایه‌ها تشکیل و در نهایت فوتون‌هایی تولید می‌کند که منجر به پدیده الکتروتانبدگی (EL) می‌شوند. در مقایسه با مواد معدنی، نیمه‌هادی‌های آلی تحرک حامل بار پایینی دارند (حدوداً $10^{-2} - 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$) که این محدودیت در عملکرد نهایی دستگاه موثر است. در این ابزارها، ضخامت هر یک از لایه‌های آلی ۱۰۰ تا ۲۰۰ نانومتر در نظر گرفته شده است. افزایش ضخامت می‌تواند ویژگی‌های انتقال بار در نیمه‌های آلی را تحت تاثیر قرار داده و باعث ایجاد تلفات مقاومتی قابل توجهی شود. برای حل این مشکل از لایه‌های انتقال بار n و p دوپ شده استفاده می‌شود که در صورت حضور این لایه‌ها، امکان ساخت ابزارهای ضخیم‌تر فراهم می‌شود. روش‌های ساخت متنوعی برای تهیه OLED استفاده می‌شود که امکان مقیاس‌گذاری برای تهیه ابزارهایی با منابع نوری واقعی فراهم شود. شکل ۱ ب، سطح انرژی یک OLED چند لایه را نشان می‌دهد، که در آن موقعیت معمولی عملکرد الکتروود بالاترین اوربیتال مولکولی اشغال شده (HOMO) و کمترین اوربیتال‌های مولکولی اشغال نشده (LUMO) یک نیمه‌هادی نشان داده شده است. اعمال میدان الکتریکی خارجی منجر به تزریق حامل از لایه‌ها می‌شود و رانش و انتشار، جریان و توزیع کلی حامل‌های بار را تعیین می‌کند. این دستگاه‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که امکان انتقال موثر و بدون مانع دو نوع حامل از الکترودها به مرکزی‌ترین لایه (یعنی لایه انتشار^۷) را فراهم می‌کند. فاصله بین لایه انتقال حفره^۸ (HTL) و لایه انتقال الکترون^۹ (ETL) از انتقال بارها پشتیبانی می‌کند. این لایه‌ها معمولاً ضخیم‌ترین لایه‌های آلی هستند، زیرا به‌عنوان یک فاصله‌دهنده نوری برای به بیشینه رساندن کوپلینگ نور عمل می‌کنند. برای ترکیب مجدد کارآمد این حامل‌های بار آزاد و نامرتب به حالت‌هایی که تبدیل به فوتون‌ها را واسطه می‌کنند، سطح انرژی لایه بعدی پس از EML با توجه به الکتروود تزریقی، یک مانع

¹ Incandescence

² Round

³ Electroluminescence (EL)

⁴ Organic light-emitting diode (OLED)

⁵ Exciton

⁶ Emitter

⁷ Emission layer

⁸ Hole transport layer

⁹ Electron transport layer

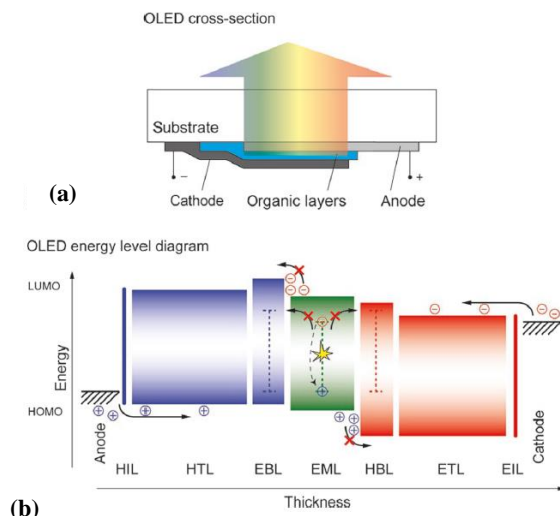
کوانتومی داخلی برسند و ویژگی‌های مقاومتی (پایداری حرارتی و نوری) خوبی داشته باشند [۱۸]. ترکیبات مختلفی برای کاربرد در بخش پیشنهاد می‌شوند که عبارتند از: مواد رنگزای آلی تابش کننده، مواد رنگزای آلی-معدنی تابش کننده و پلیمرهای تابش کننده. در این مقاله نیمه‌هادی‌های آلی مورد استفاده در دیویدهای آلی نورتاب مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در نیمه‌هادی‌های آلی، گروه‌ها و استخلاف‌ها، تاثیر بسزایی در نتیجه و عملکرد نهایی دارند. گروه‌های عاملی متنوعی برای تهیه این ترکیبات پیشنهاد شده است اما هیدروکربن‌های آروماتیک با سیستم مزدوج گسترده، مهم‌ترین واحد برای تهیه انواع نیمه‌هادی‌ها می‌باشد [۹، ۱۰]. شکل ۲ الف واحدهای هیدروکربنی مرسوم برای تهیه مواد رنگزای آلی نورتاب را نشان می‌دهد.

¹ Excitonic

انرژی بزرگ محسوب می‌شود، به این لایه‌ها، لایه‌های مسدودکننده الکترون و حفره می‌گویند. علاوه بر محصور نگه داشتن حامل‌های بار در لایه EML، این لایه‌ها نیاز به محصورسازی اکسیتونیک^۱ دارند، به ویژه در مورد اکسیتون‌های سه‌گانه با عمر طولانی این مورد اهمیت ویژه‌ای خواهد داشت. در غیر این صورت، چنین موادی، تلفات اکسیتونیک را افزایش می‌دهند، زیرا آنها اغلب مکان‌های خاموش کننده موثری را نشان می‌دهند [۶، ۷].

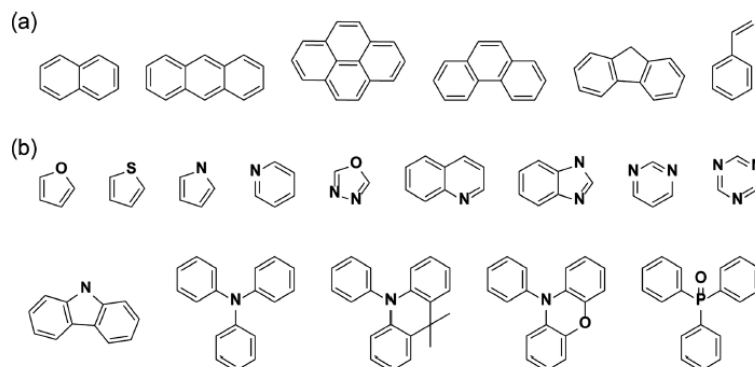
۳- لایه ساطع کننده

دیویدهای آلی نورتاب، ابزارهایی هستند که دارای یک لایه متشکل از مولکول‌های تابش کننده هستند. این ابزارها، اساس فناوری نمایشگرها بوده و در کاربردهای نوین بسیار مرسوم هستند. مولکول‌های مختلفی برای گسترش فضای رنگی و تنوع رنگی، سنتز و معرفی شده است. مولکول تابش کننده از دیدگاه تئوری باید با استفاده از اکسایتون تک‌حالتی و سه‌حالتی به ۱۰۰ درصد بازده



شکل ۱: الف) برش مقطعی و ب) نمودار سطوح انرژی و لایه‌های دیویدهای آلی نورتاب [۶].

Figure 1: (a) Cross-section schematic of an OLED, and (b) Energy-level diagram of a multilayer OLED [6].



شکل ۲: الف) واحدهای هیدروکربنی و ب) هتروحلقه‌های مرسوم برای تهیه مواد رنگزای آلی نورتاب [۱۱].

Figure 2: Some representatives of hydrocarbon (a) and heterocycle (b) building blocks in organic semiconductors [11].

دوپنت در نظر گرفته می‌شوند زیرا اغلب این ترکیبات حلالیت نسبی در انواع حلال‌های آلی مانند تولوئن، کلروبنزن و تتراهیدروفوران دارند. باوجود حلالیت نسبی ($1-5 \text{ mgmL}^{-1}$) این ترکیبات، اما غلظت‌های تهیه شده برای کاربرد در تهیه دیودهای آلی نورتاب کافی است. این ترکیبات معمولاً دارای ساختارهای مولکولی پیچ خورده و غیرمسطح برای مهار فعل و انفعالات درون مولکولی و بین مولکولی هستند که این پیکربندی ϕ_{PL} بالا برای پاسخگویی میزبان/میهمان جفت‌شوندگی از طریق فرآیند حلالی برای EML^۲ را تضمین می‌کند. پس از ترکیب میزبان جدید و/یا مواد جدید دارای فصل مشترک، دستگاه‌هایی با بازده بالا تهیه و عرضه شد [۱۳]. غلظت بالای اکسیتون‌های تولید شده توسط مولکول‌های کوچک آلی در چگالی جریان بالا، سبب افزایش سرعت نابودی آرایش سه‌گانه مولکولی و در نتیجه کاهش بازده دستگاه می‌شود. ژاو^۳ و همکارانش موفق به تهیه یک سیستم مزدوج کیف مانند در تهیه مواد رنگزای تابنده برای کاهش تجمع اکسیتون و کاهش بیشتر اثرات خاموش‌کنندگی با استفاده از یک فسفرسانس نشر کننده به عنوان کمک میزبان شدند [۱۴]. دو مشتق $3,3'$ -بی‌کاربازول، با نیمه‌های تری فنیل سیلیل و تولوئن سولفونیل متصل به موقعیت‌های $9,9'$ توسط بزویکونی^۴ و همکارانش تهیه و خواص آنها مورد مطالعه قرار گرفت. این ترکیبات، به دلیل دارا بودن انرژی‌های سه‌گانه بالا ($2/9$ الکترون ولت) برای برداشت کارآمد اکسیتون سه‌گانه بسیار مناسب هستند. این ترکیب حاوی گروه‌های تری فنیل سیلیل بوده که به دلیل خواص دوقطبی انتقال بار، گزینه مناسبی برای استفاده به عنوان میزبان در دیودهای ساطع‌کننده نور آلی فسفری هستند (شکل ۳).

از طریق مهندسی ساختار و قراردادن گروه‌های عاملی مناسب، می‌توان نیمه‌هادی‌های آلی موثری سنتز نمود. سایر حلقه‌های هتروآروماتیک که دارای هترواتم‌هایی مانند نیتروژن، گوگرد و یا اکسیژن بوده و برای تهیه نیمه‌هادی‌های آلی مناسب هستند، در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. هر یک از این ساختارهای پایه، عملکرد مخصوص به خود دارند و برای اهداف خاص می‌توان از یک و یا ترکیبی از آنها بهره برد. در نتیجه می‌توان ساختارهای مولکولی متنوع و نوآورانه تهیه و معرفی نمود.

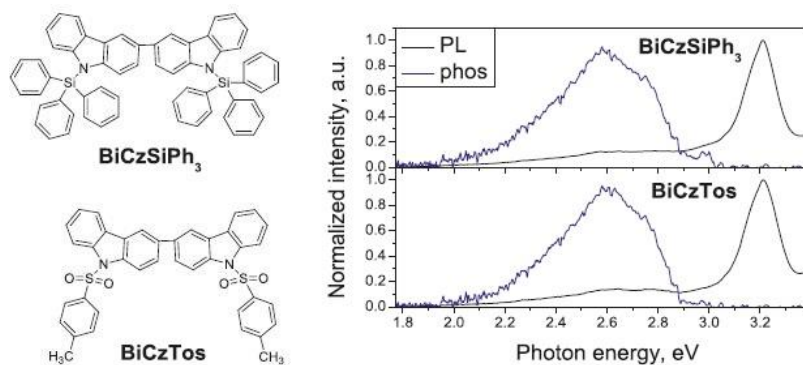
در دیودهای آلی نورتاب، هنگامی که بارهای آزاد به لایه‌های آلی تزریق می‌شوند، ساختار مزدوج نیمه‌رسانای آلی دچار بی‌نظمی شده و ارتعاشات موضعی برای جذب بارها ایجاد می‌شود که تحت عنوان پدیده پولارون^۱ شناخته می‌شود. در یک فرآیند EL آلی، اکسیتون‌ها از ترکیب مجدد آن پولارون‌ها با بارهای مخالف تولید می‌شوند. از دریافت و ترکیب مجدد پولارون‌ها، بر اساس آمار مکانیک کوانتومی، اکسیتون‌های یگانه و سه‌گانه به نسبت ۱:۳ تشکیل می‌شوند. برای بیشتر مواد تابنده آلی خالص، اکسیتون‌های منفرد منتشر می‌شوند در حالی که انتقال تابشی بین حالت‌های سه‌گانه و حالت‌های پایه (S_0) به دلیل حفظ تکانه ممنوع است، که منجر به حد بالای نظری ۲۵ درصد برای IQEs دیودهای آلی نورتاب می‌شود.

خوشبختانه، با توسعه و کاربرد ترکیبات جدید، مشخص شد که این حد بالا را می‌توان با انتقال اکسیتون‌های سه‌گانه به اکسیتون‌های یگانه یا برداشت انتشار مستقیم از اکسیتون‌های سه‌گانه شکست [۱۲]. در ادامه، رویکردهای مختلف طراحی مولکولی برای مواد رنگزای نورتاب آلی خالص مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱- مولکول‌های کوچک فسفرسانس تابنده

به طور کلی، فسفرهای کوچک مولکول تهیه شده برای کاربرد در دیودهای آلی نورتاب، به عنوان مولکول‌های دارای نشر در بخش

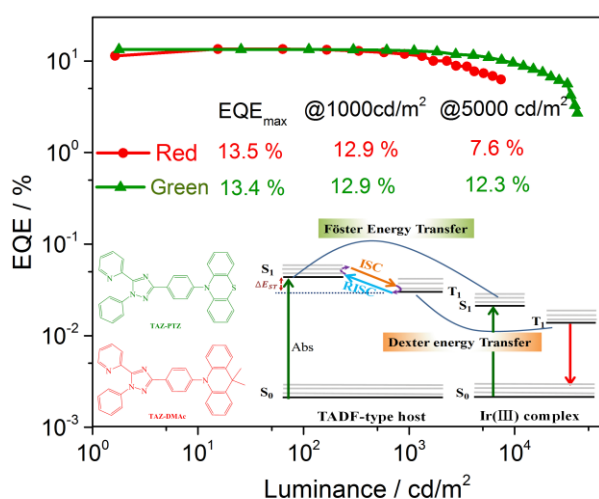
- ¹ Polaron
² Emissive layer
³ Zhao
⁴ Bezikonnyi



شکل ۳: ساختار شیمیایی و طیف‌های نشری دو ماده رنگزای سنتز شده دارای گروه تری فنیل سیلیل [۱۵].

Figure 3: Chemical structure and phosphorescence spectra of synthesized dyes contain Triphenylsilyl-substitute [15].

منظور یک واحد وینیل بنزن به صورت عرضی عامل دار گردید تا به عنوان ماده انتقال حفره با انرژی سه‌گانه بالا استفاده شود. اتصال عرضی لایه انتقال حفره در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد یک فیلم نامحلول تولید کرد که در مقابل حلال‌ها پایدار است [۱۹]. یک میزبان دوقطبی طراحی شده با استفاده از ایندولوکاربازول^۴ به عنوان یک بخش دوقطبی با جفت کردن دو قسمت ایندولوکاربازول از طریق یک پیونددهنده فنیل توسط ایم^۵ و همکارانش سنتز شد. ترکیبات مشتق شده از ایندولوکاربازول می‌توانند حفره‌ها و الکترون‌ها را در لایه گسیل‌دهنده حمل کنند و به عنوان بخش دوقطبی در دیودهای نورانی آلی فسفری سبز استفاده شوند. طراحی مولکولی مبتنی بر پیوند نسبت به طراحی مولکولی مستقیماً جفت شده برای مطابقت با تعادل حامل برای بازده کوانتومی بالا در دستگاه‌های فسفرسبز سبز ارجحیت دارد. بازده کوانتومی دیود تهیه شده با استفاده از این ماده ۱۴/۵ درصد گزارش شد [۲۰]. این پژوهشگران در تحقیق دیگری، میزبان‌های دوقطبی مشتق شده از دی بنزوتیوفن و ایندولوکاربازول برای استفاده در دیودهای نور آلی فسفری آبی را سنتز نمودند. موقعیت ۴ ترکیب دی بنزوتیوفن و موقعیت ۲ ماده ایندولوکاربازول برای جفت کردن دی بنزوتیوفن و ایندولوکاربازول استفاده شد. دو میزبان، با و بدون سیستم مزدوج (واحد مزدوج وینیلی) سنتز شده و عملکرد آن‌ها به عنوان میزبان برای یک ساطع کننده فسفرسبز آبی مورد بررسی قرار گرفتند.



شکل ۴: ساختار شیمیایی و طیف‌های نشری دو ماده رنگزای سنتز شده دارای گروه ۴،۲،۱-تریازول [۱۸].

Figure 3: Chemical structure and phosphorescence spectra of synthesized dyes contained 1,2,4-triazole-substituted [15].

این ترکیبات در دیودهای آلی نورتاب مورد استفاده قرار گرفتند و عملکرد آن با ماده ۱، ۳- بیس (N-کربازول) بنزن مقایسه شد. نتایج نشان داد که این جایگزینی بسیار موثر می‌باشد. دیودهای ساطع کننده نور آلی فسفری سبز و قرمز حاوی این میزبان به ترتیب بیشینه بازده کوانتومی خارجی ۱۳/۸ و ۷/۷ درصد را نشان دادند [۱۵].

نصیری و همکارانش دو ماده رنگزای آلی حاوی مشتق تیوکسانتون به عنوان یک واحد پذیرنده، برای دیودهای ساطع نور آلی فلورسانس تاخیری^۱ (TADF)، طراحی و سنتز نمودند. مقادیر پتانسیل یونیزاسیون مواد رنگزای لایه نشانی شده به روش پوشانش چرخشی بر روی زیرآیند FTO در محدوده ۵/۴۹-۵/۴۲ eV و تحرک حفرات در حدود $2/64 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}$ و $3/56 \times 10^{-4}$ به دست آمد [۱۶]. همین محققان در پژوهش دیگری دو ماده رنگزای آلی بر پایه زانتن با آرایش D-A-D طراحی و سنتز نمودند. در این مواد رنگزا، مشتقات زانتن و مشتقات کربازول نقش مهمی به‌عنوان گیرنده و دو واحد اهداکننده نامتقارن داشته‌اند. خواص جذبی و فوتولومینسانس مواد رنگزای سنتز شده در محلول و حالت جامد بدون دوپ و دوپ شده در دماهای مختلف و در شرایط خلا مورد مطالعه قرار گرفت. مقادیر پتانسیل یونیزاسیون مواد رنگزای سنتز شده به دلیل اثر جایگزینی گروه‌های الکترون‌دهنده در حدود ۵/۵۳ و ۵/۶۲ الکترون ولت بود. مقادیر ولتاژ پایین روشن دیود نورتاب آلی تهیه شده در حدود ۴/۰۸-۵/۳۱ ولت بود. به‌علاوه بیشینه مقادیر روشنایی، جریان، توان و بازده کوانتومی خارجی به ترتیب در حدود 72565 cd/m^2 ، $37/32 \text{ cd/A}$ ، 20999 lm/W و $13/41$ درصد به دست آمد [۱۷]. ژو^۲ و همکارانش شش ترکیب دوقطبی با ساختار الکترون‌دهنده-پل مزدوج-الکترون‌گیرنده و الکترون‌دهنده-پل مزدوج-الکترون‌گیرنده را با استفاده از مشتقات ۴،۲،۱-تریازول و فنوتیازین و فنوتیازین به عنوان گروه الکترون‌گیرنده و فنوکسازین و ۹،۹-دی متیل آکریدان به عنوان گروه الکترون‌دهنده سنتز نمودند (شکل ۴). مطالعات فیزیک نوری نشان داد که افزایش تعداد گروه‌های الکترون‌دهنده سبب افزایش سهم انتقال بار در حالت‌های برانگیخته شده و در نتیجه مقدار ΔE_{ST} قابل تنظیم می‌شود. دیودهای آلی نورتاب آلی برپایه مواد تابنده حاوی ۱،۲،۴-تریازول بازده پائینی در لومینسانس‌های بالا نشان می‌دهند [۱۸]. خلاصه‌ای از عوامل کلیدی عملکردی از جمله طول عمر دیودهای آلی نورتاب دارای مولکول تابنده TADF در جدول ۱ ارائه شده است [۱۱].

ژونگ^۳ و همکارانش یک ماده رنگزا با هسته ۳،۳-دی (۹H-کربازول-۹-ایل)-بای فنیل با فسفرسبز آبی تهیه نمودند. به این

^۱ Thermally activated delayed fluorescence (TADF)

^۲ Xu

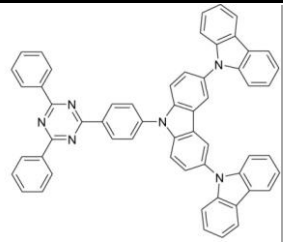
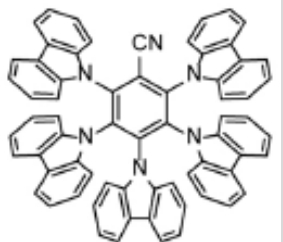
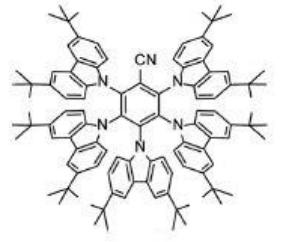
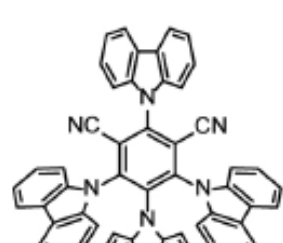
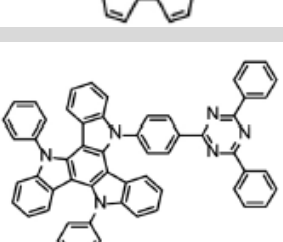
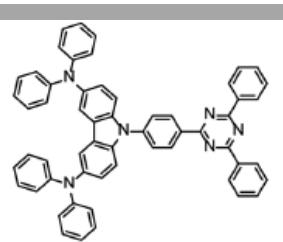
^۳ Jeong

^۴ Indolocarbazole

^۵ Im

جدول ۱: مقایسه عملکرد دیودهای آلی نورتاب دارای مولکول TADF [۱۱].

Table 1: Comparing the performance of organic light emitting diodes with TADF molecule [11].

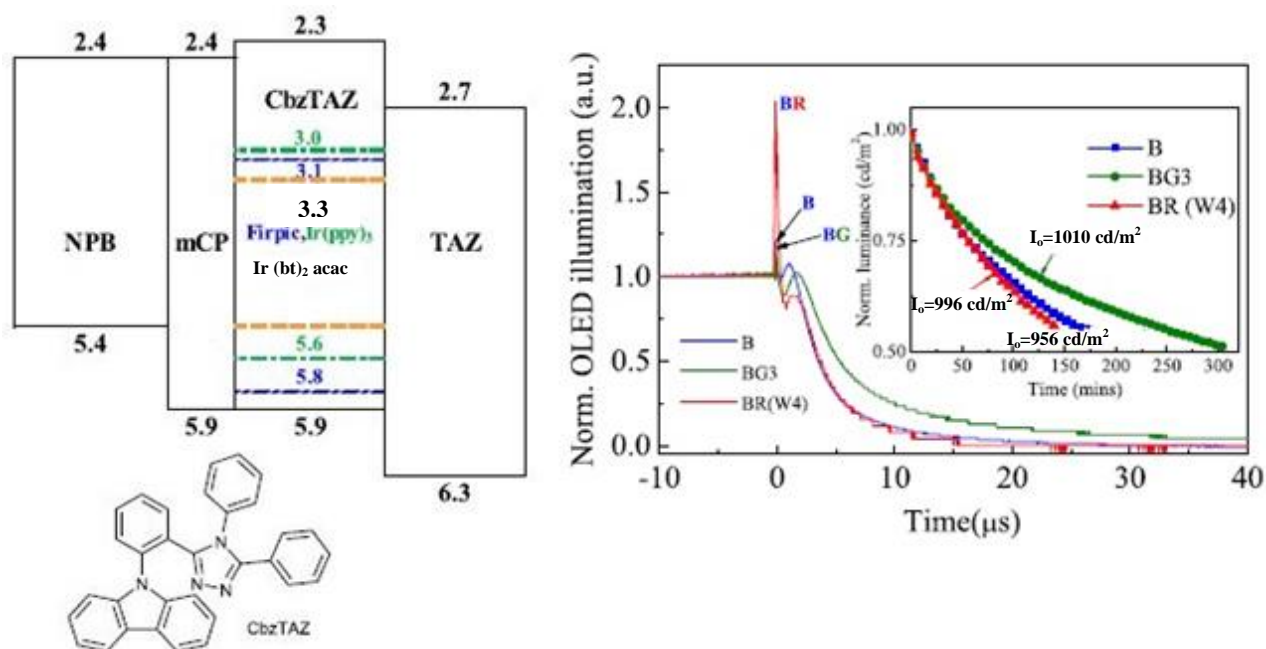
Lifetime (h)	Initial luminance (cdm^{-2})	EQE (%)	Emitter molecules
2.8 (T50)	296	12.2	
176 (T50)	500	16.7	
770 (T50)	500	21.2	
1472 (T50)	1000	19.7	
27 (T90)	200	24.1	
13.7 (T50)	5000	19.3	

نشان دهنده پراکنش یکتا می‌باشد [۲۴]. ساختارهای دندریمری به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان و همچنین قدرت نشر بالا، برای تهیه مواد کاربردی برای دیودهای نورتاب آلی قابل استفاده هستند. با طراحی دقیق مولکولی دندریمرها، پتانسیل مهمی برای کاربرد در دیودهای آلی نورتاب دارند. ساختارهای انشعابی حجیم و گروه‌های سطحی می‌توانند کپسوله‌سازی، یعنی اثر جداسازی محل، را برای هسته فسفری در سطح مولکولی فراهم کنند تا نابودی T-T را کاهش دهد، که کارآمدتر از رویکرد جفت شونده است. بنابراین، حتی می‌توان دستگاه‌های بسیار کارآمد با فیلم دندریمر، به عنوان لایه الکتروتابنده تهیه کرد. علاوه بر این، اثر جداسازی مکان‌ها با تنظیم نسل‌های دندریمرها قابل تنظیم است تا زمینه بیشتری برای بهینه‌سازی عملکرد دستگاه فراهم کند. از طرف دیگر، طراحی دقیق دندریمرها به این ترتیب که اثربخشی اجزاء به صورت جداگانه در نظر گرفته شود، یعنی هسته با قدرت نشر در سراسر طیف مرئی، انشعابات با ویژگی تزریق حامل بار/انتقال و گروه‌های سطحی برای بهبود انحلال و یا توانایی تزریق/انتقال بار، سبب بهبود عملکرد دیود نورتاب آلی می‌شوند. استخلاف‌های حجیم در دندریمرها و اثرات ناشی از پیکربندی آن‌ها سبب ایجاد دمای انتقال شیشه‌ای بالا خواهد شد. این حالت، پایداری لایه نازک تهیه شده بهبود یافته و در نتیجه طول عمر دستگاه نیز افزایش می‌یابد [۲۳، ۲۵].

دیودهای فسفرسنس آبی تهیه شده با میزبان‌های جدید، بازده کوانتومی خارجی بالای ۱۸ درصد را نشان دادند [۲۱]. یک ترکیب دو قطبی ۹-(۲،۴،۵-دی‌فنیل-۹H-کربازول-۳-یل) تری‌آزول-۳-یل) فنیل-۹H-کربازول، به عنوان یک میزبان منفرد برای کاربرد در دیود نورتاب آلی با بازده کوانتومی خارجی بیش از ۲۰ درصد تهیه شد (شکل ۵). دیود فسفرسنس سبز تهیه شده دارای تنوع تابندگی زیاد در حدود 38360 cd/m^2 و $3/5$ و ثبات رنگی عالی و تغییرات جزئی در فضا رنگ CIE1931 است. علاوه بر این، سیگنال‌های الکتروتابندگی گذرا از ساطع‌کننده‌های سبز، بارهای به دام افتاده کمتر و طول عمر اکسایتون طولانی‌تری دارند که به طول عمر دستگاه کمک می‌کند. سیگنال‌های الکتروتابندگی گذرا و طول عمر دیودهای تهیه شده با این ترکیب (دیود نورتاب آبی آسمانی (B)، دیود نورتاب سبز (GB3) و دیود آبی-قرمز (W4) در شکل ۵ نشان داده شده است [۲۲].

۳-۲- دندریمرهای فسفرسنس تابنده

دندریمرها معمولاً از سه جز تشکیل شده‌اند که عبارتند از: هسته، استخلاف‌های شاخه‌دار متعدد با سطح انشعاب و گروه‌های سطحی (شکل ۶) [۲۳]. دندریمرها نیز مانند پلیمرها به دلیل توانایی عالی تشکیل فیلم، قابلیت تشکیل فیلم‌های نازک از محلول را دارند. مانند مولکول‌های کوچک، دندریمرها را می‌توان در درجه خلوص بالا با ساختاری کاملاً مشخص به دست آورد و وزن مولکولی دندریمرها نیز



شکل ۵: ساختار شیمیایی و سیگنال‌های الکتروتابندگی دیودهای تهیه شده با ترکیب دوقطبی [۲۲].

Figure 5: Chemical structures and Transient electro luminance signals of PhOLEDs with ambipolar component [22].

دندریمرها به عنوان میزبان و فسفر ایریدیوم سبز سنتی به عنوان ساطع‌کننده دوپ شده ساخته شدند. در شرایط محیطی، حداکثر بازده درخشندگی $19/83 \text{ cdA}^{-1}$ و حداکثر بازده کوانتومی خارجی $5/85$ درصد به دست آمد [۲۶]. یک سری مواد جدید برپایه ۳،۶-فلورن-کربازول دو استخلافی از طبقه دندریمرهای کربازولی (شکل ۷) در شرایط حلالی توسط کوآن^۳ و همکارانش تهیه شدند. ترکیبات تهیه شده دارای پیکربندی چهاروجهی بوده و به همین دلیل دارای دمای انتقال شیشه‌ای و سطوح انرژی سه‌گانه بالا، قابلیت تشکیل فیلم عالی و امتزاج‌پذیری شیمیایی خوبی هستند. دیود نورتاب آلی تهیه شده با این ترکیبات، بیشینه بازده درخشندگی $18/5 \text{ cdA}^{-1}$ و بیشینه بازده کوانتومی خارجی $10/3$ درصد را نشان داد. نتایج نشان داد که دیوهای نورتاب آلی با نشر آبی بر پایه ترکیبات سنتز شده، عملکرد بسیار خوبی دارند [۲۷]. سان^۴ و همکارانش دو مولکول فلورسنت تاخیری فعال حرارتی (TADF)^۵ که در اثر اعمال حرارت تشکیل شبکه می‌دهند، تهیه نمودند. مطالعات نشان می‌دهد ترکیبات تهیه شده، قابلیت تشکیل یک لایه نازک پایدار و یکنواخت را با فرآیند دارد و همچنین به طور موثری غلظت اکسیژن‌های سه‌گانه را که توسط برهم‌کنش بین مولکولی خاموش می‌شود، سرکوب می‌کنند.

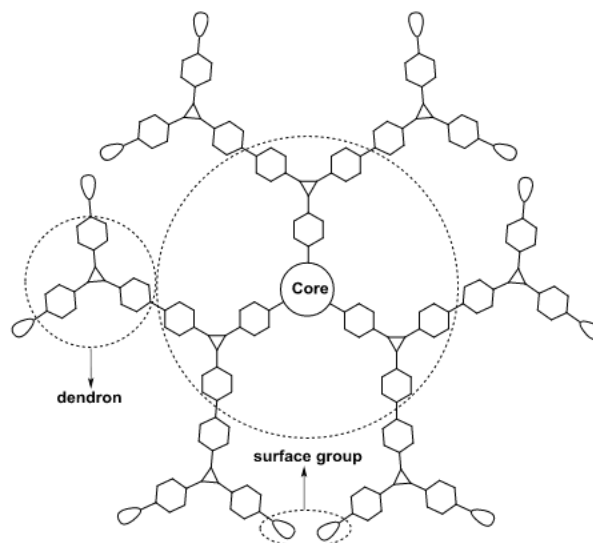
¹ Zhang

² Ullmann

³ Qian

⁴ Sun

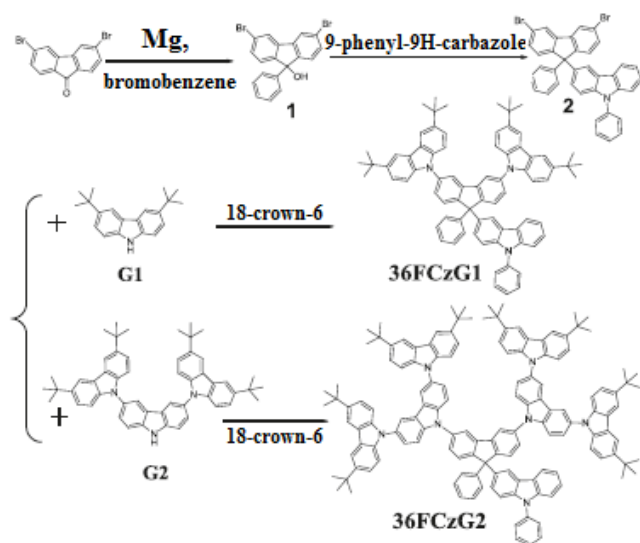
⁵ Thermally activated delayed fluorescent



شکل ۶: ساختار شیمیایی از نسل دوم دندریمرها [۲۳].

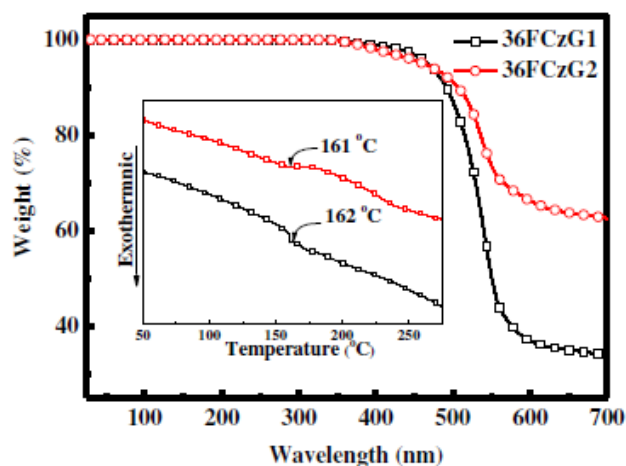
Figure 6: Schematic diagram of the second-generation dendrimer [23].

ژانگ^۱ و همکارانش گروهی از دندریمرهای جدید بر پایه کربازول متشکل از هسته دی‌بنزوتیوفن به عنوان پذیرنده الکترون و انشعابات الیگو-کربازول به عنوان اهداکننده الکترون را با استفاده واکنش اولمن^۲ تهیه نمودند. دندریمرهای سنتز شده، حلالیت خوبی در حلال‌های آلی معمولی و پایداری حرارتی عالی با دمای تجزیه تا 830 درجه سانتی‌گراد نشان دادند، از طرف دیگر سطوح انرژی HOMO در محدوده $5/45$ تا $5/37$ الکترون ولت به دست آمد. دیوهای آلی نورتاب فسفری سبز با روش پوشش چرخشی با



شکل ۷: فرآیند سنتز و نمودار دمای انتقال شیشه‌ای دو ماده رنگزای جدید برپایه ۳،۶-فلورن-کربازول [۲۷].

Figure 7: Synthetic routes and TGA traces of two new dyes based on 3, 6-fluorene-carbazole [27].



از آن، با توسعه مواد جدید و بهینه‌سازی دستگاه، فلوروفورهای سبز و قرمز با طول عمری در محدوده 10^5 ساعت به دست آمد، که قابل مقایسه با آخرین روش تراشه‌های LED غیر آلی و بسیار بهتر از لامپ‌های رشته‌ای معمولی است. چندین ساطع کننده فلورسنت آبی معروف نیز توسعه یافته‌اند. در این مولکول‌ها عموماً مشتقات آنتراسن، پیرن، ایمیدازول و استایرن به‌عنوان هسته‌های سفت و سخت با استخلاف‌های آمین آروماتیک ترکیب می‌شود تا بازده کوانتومی بالا به دست آید و رنگ انتشار آبی قابل کنترل باشد. در مقایسه با فلوروفورهای سبز و قرمز، ساطع کننده‌های فلورسنت آبی هنوز بازده کوانتومی پایین و طول عمر نسبتاً کوتاهی دارند، زیرا اکسایتون‌های منفرد با انرژی بالا (بیش از $2/7$ الکترون ولت) تمایل بیشتری به القای خاموش کردن بار/اکسیتون و تسریع تفکیک پیوند شیمیایی دارند. سازوکار TADF² یکی از نویدبخش‌ترین رویکردها برای توسعه مواد نشرکننده و دستیابی به بازده و طول عمر بالا است. در مقایسه با فلوروفورهای سنتی، هم ترازوی حالت برانگیخته ساطع کننده‌های TADF می‌تواند تأثیرات مرگباری بر پایداری دستگاه داشته باشد. به عنوان مثال، ترکیبات تابنده دارای پیکربندی متقاطع و انتقال تابشی، باعث برهم‌کنش شدید اکسیتون-اکسیتون³ یا اکسیتون-پلارون⁴ می‌شود و این اکسایتون‌های بسیار واکنش‌پذیر مستعد ایجاد تخریب پیوند شیمیایی هستند. علاوه بر این مولکول‌های تابنده متقاطع، عموماً عبور بین سیستم قوی دارند. بنابراین شروع طیف انتشار در سمت طول موج کوتاه می‌تواند به مناطق انرژی بالاتر گسترش یافته که سبب کاهش انرژی حالت برانگیخته می‌گردد. برای گسیل کننده‌های اکسیپلس⁵، جفت‌های الکترون-حفره از نظر فضایی با انرژی اتصال کوچکی از هم جدا می‌شوند، از این رو حالت‌های انتقال بار منجر به ایجاد تفکیک جفت‌های قطبی می‌شوند. در این حالت، تخریب ناشی از پلارون منجر به تخریب مولکول‌ها در حالت برانگیخته بارداری می‌شود. برای بهبود بازده و طول عمر دیودهای آلی نورتاب، ابزارهایی بر پایه TADF و یا تابنده‌های اکسیپلس توسعه یافت [۳۰، ۳۱].

۵- مزایا و معایب دیودهای آلی نورتاب

دیودهای آلی نورتاب، جایگزین بسیار مناسبی برای نمایشگرهای CRT و یا LED هستند. آن‌ها دستگاه‌های نیمه‌هادی آلی نازک بوده که نور را ساطع می‌کنند. چنانکه در شکل ۱ نشان داده شده لایه نازکی از مواد آلی بین دو الکتروند و کاتد قرار داده می‌شود. مزایا و

به‌علاوه این ترکیبات دارای مقاومت حلال کافی بوده که در ادامه می‌توانند سبب رسوب مواد انتقال‌دهنده الکترون توسط حلال متعامد شوند. دیود نورتاب آلی تهیه شده با این ترکیبات، بیشینه بازده درخشندگی $7/1 \text{ cdA}^{-1}$ و بیشینه بازده کوانتومی خارجی $6/8$ درصد را نشان داد [۲۸]. ما^۱ و همکارانش دو ماده رنگزای نورتاب تاخیری فعال حرارتی دارای واحد n-بوتوکسی کپسوله شده از نسل اول و دوم دندریمرها را از طریق واکنش جفت شدن C-N بین انشعابات کربازولی و هسته $2,4,6$ -تریس (۴-برموفنیل) -۵,۳,۱-تری آزین تهیه نمودند.

نتایج نشان می‌دهد که در مقایسه با گروه‌های ترت بوتیل که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند، استفاده از گروه‌های کپسوله شده n-بوتوکسی می‌تواند منجر به کوچک‌تر شدن شکاف انرژی منفرد سه‌گانه برای دندریمرها شود و اثر TADF قوی‌تر همراه با فرآیند عبور معکوس بین سیستمی سریع‌تر ایجاد کند. دیودهای آلی نورتاب تهیه شده با این ترکیبات بازدهی در حدود $16/8$ و $20/6$ درصد نشان می‌دهند که به ترتیب $1/6$ و 2 برابر بازده دیود تهیه شده با ترکیب مشابه بر پایه ترت بوتیل است. بنابراین کپسوله‌سازی آلکوکسی دندریمرهای TADF مبتنی بر کربازول می‌تواند یک دستاورد امیدوارکننده برای توسعه ساطع کننده‌های بسیار کارآمد برای دیودهای آلی نورتاب پردازش‌شده با محلول باشد [۲۹].

۴- طول عمر عملیاتی دیودهای آلی نورتاب با ساطع کننده‌های آلی

اگرچه دیودهای آلی نورتاب با ساطع کننده‌های کاملاً آلی دارای بازده رضایت‌بخشی هستند اما طول عمر عملیاتی آنها مهم‌ترین و چالش برانگیزترین مسئله برای تطبیق برنامه‌های تجاری نهایی است. به طور کلی، طول عمر T50 (زمان ۵۰ درصد ارائه از تابندگی اولیه) برای روشنایی و نمایشگر حالت جامد باید بیش از 10^5 ساعت در روشنایی اولیه از 1000 cdm^{-2} باشد. ابتدا، بهبود طول عمر عملیاتی افزاره عمدتاً بر فلورسانس معمولی و فلوروفورهای TTA¹ متمرکز بود، جایی که ΔE_{ST} بزرگ است. به خصوص برای فلوروفورهای TTA، انرژی حالت سه‌گانه تنها به نیمی از حالت منفرد می‌رسد. بنابراین، از نظر تخریب دستگاه، تفکیک مولکولی همبستگی اکسایتون سه‌گانه به طور قابل‌ملاحظه‌ای محدود می‌شود. لیو و همکارانش و گروه کداک سابق، انتقال انرژی اکسایتون ترکیبات تابنده را افزایش دادند و با جفت‌شوندگی فلوروفور TTA کاهش غلظت اکسایتون بالا را کاهش دادند. واسطه‌ها در بستر فلورسنت، منجر به بازده و پیشرفت‌های قابل توجه در طول عمر کار دیودهای آلی نورتاب فلورسنت شد. پس

¹ Triplet-triplet annihilation (TTA)

² Thermally activated delayed fluorescence (TADF)

³ Exciton-exciton

⁴ Exciton-polaron

⁵ Exciplex

می‌باشد. ترکیبات عاری از فلز به دلیل قیمت پایین، سهولت تهیه و سنتز از یک طرف و گستره نشر و جذب وسیع از طرف دیگر مورد توجه می‌باشند. ترکیبات عاری از فلز به دو طبقه کلی، ترکیبات کوچک مولکول و دندریمرها طبقه می‌شوند. ترکیبات نورتاب متنوعی از این طبقه‌ها سنتز و برای کاربرد در ساختار دیودهای آلی نورتاب مورد ارزیابی قرار گرفته است. تحقیقات، نشان می‌دهد که افزایش تعداد گروه‌های الکترون دهنده در مولکول‌های مواد رنگزای نورتاب، سبب افزایش سهم انتقال بار در حالت‌های برانگیخته شده و در تنظیم و مدیریت ΔE_{ST} تسهیل می‌شود. استفاده از استخلاف‌های n - بوتوکسی در سنتز دندریمرهای نورتاب، سبب کاهش شکاف انرژی سه‌گانه مولکولی می‌شود. در نتیجه اثر TADF تقویت شده و فرآیند عبور معکوس بین سیستمی تسریع می‌شود. برای افزایش دسترسی تجاری، اخیراً مطالعات زیادی برای افزایش طول عمر این دستگاه‌ها انجام شده است. یکی از روش‌ها برای حل این محدودیت استفاده از ترکیبات فلوروفور TTA به منظور افزایش انرژی اکسایتون ترکیبات تابنده است. اخیراً برای افزایش بازده و طول عمر دیود نورتاب آلی از ترکیبات TADF استفاده می‌شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از حمایت پژوهشگاه رنگ برای انجام این مطالعه، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

تعارض منافع

در این مقاله هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

¹ Ma

معایب این دستگاه در جدول ۲ خلاصه شده است [۲۷، ۱۸].

جدول ۲: مزایا و معایب دیودهای آلی نورتاب [۲۷، ۱۸].

Table 2: Advantage and disadvantage of OLED [18, 27].

Disadvantage	Advantage
They are unstable against water and weather conditions, especially high humidity and are easily damaged.	These devices are flexible and hence it is very suitable to make OLED displays or other OLED devices such as mobile phones, cameras, wearable devices, etc.
The commercialization of these devices has been limited, with the result that the cost of this technology is often high.	In the preparation of this device, high energy gap semiconductors are used, for this reason, compared to LEDs and LCDs, they show the phenomenon of single and triple exciton radiation.
Compared to other displays, they have a shorter lifetime.	They consume a small amount of energy.
-	Due to the thin layers, they are low in weight.

۶- نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر موضوع تولید انواع منابع انرژی و فناوری‌های نوین مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. دیودهای نورتاب آلی، یکی از فناوری‌های نوین بوده که از جهات مختلف موضوع پژوهش و توسعه می‌باشد. اجزا مختلف این فناوری، مانند مواد نورتاب، مهندسی لایه‌های اتصال، مواد میزبان و عملکرد فیزیکی/مهندسی این فناوری موضوع پژوهش بسیاری از دانشمندان می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که دیودهای آلی نورتاب، امکان کاربرد گسترده‌ای در بازارهای نمایشگرها و حوزه روشنایی دارند. مواد ساطع‌کننده مورد استفاده در دیودهای آلی نورتاب انواع مختلفی دارند که یک طبقه‌بندی کلی شامل ترکیبات آلی-فلزی و ترکیبات عاری از فلز

۷- مراجع

1. C. Murawski, K. Leo, M.C. Gather, "Efficiency roll-off in organic light-emitting diodes", Adv. Mater. 25, 6801-9827, 2013.
2. K. Miyata, F.S. Conrad-Burton, F.L. Geyer, X.Y. Zhu, "riplet Pair States in Singlet Fission", Chem. Rev. 119, 4261-4292, 2019.
- 3- M. Wohlgenannt, X.M. Jiang, Z.V. Vardeny, R.A.J. Janssen, "Conjugation-length dependence of spin-dependent exciton formation rates in II-conjugated oligomers and polymers", Phys. Rev. Lett. 88, 197401-197423, 2002.
4. B. Kang, C. Wook Han, J. Kyeong Jeong, "Advanced Display Technology: Next Generation Self-Emitting Displays", Springer Pub. Singapore, 2021.
5. P. Martin-Ramos, M. Ramos-Silva, "Lanthanide-based multifunctional materials: from OLED to SIMs", Elsevier pub, Oxford; Cambridge, 2018.
6. O. Ostroverkhova, "Handbook of organic Materials for electronic and photonic devices", Elsevier pub. United Kingdom, 2019.
7. M. Shiri, A. M. Aarabi, S. Baghshahi, "A review of the inorganic pigments used in LED bulbs", J. Stud. Color World, 7, 37-4, 2018.
8. OX. Hu, X. Xia, W. He, Z. Tang, Y. Lv, X. Li, D. Zhang, "Recent developments in benzothiazole-based iridium(III) complexes for application in OLEDs as electrophosphorescent emitters", Org. Lett. 66, 126-135, 2019.
9. X. Tang, Q. Bai, T. Shan, J. Li, Y. Gao, F. Liu, H. Liu, Q. Peng, B. Yang, F. Li, P. Lu, "Efficient nondoped blue fluorescent organic light-emitting diodes (OLEDs) with a high external quantum efficiency of 9.4% @ 1000 cd m⁻² based on phenanthroimidazole-anthracene derivative", Adv.

- Functional Mater. 28, 1705813, 2018.
10. A.N. Abed, R.N. Abed, "Characterization effect of copper oxide and cobalt oxide nanocomposite on poly(vinyl chloride) doping process for solar energy applications", Prog. Color Colorants Coat. 15, 235-241, 2022.
 11. D. Chen, W. Li, L. Gan, Z. Wang, M. Li, S. Su, "Non-noble-metal-based organic emitters for OLED applications", Mater. Sci. Eng. 142, 100581, 2020.
 12. F. Liu, H. Liu, X. Tang, S. Ren, X. He, J. Li, C. Du, Z. Feng, P. Lu, "Novel blue fluorescent materials for high-performance nondoped blue OLEDs and hybrid pure white OLEDs with ultrahigh color rendering index", Nano Energy, 68, 104325, 2020.
 13. T.H. Han, M.R. Choi, C.W. Jeon, Y.H. Kim, S.K. Kwon, T.W. Lee, "Ultrahigh-efficiency solution-processed simplified small-molecule organic light-emitting diodes using universal host materials", Sci. Adv. 2, 1601428, 2016.
 14. J. Zhao, X. Du, C. Zheng, Z. He, J. Guo, N. Zhang, H. Lin, S. Tao, "Reducing efficiency roll-off of phosphorescent organic light emitting diodes by using phosphor assisted energy funneling", Org. Lett. 82, 105985, 2020.
 15. O. Bezvikonny, G. Grybauskaite-Kaminskiene, D. Volyniuk, J. Simokaitiene, Y. Danyliv, R. Durgaryan, A. Bucinskas, E. Jatautienė, I. Hladka, J. Scholz, H. Starykov, J. V. Grazuleviciusa, "3,3'-Bicarbazole-based compounds as bipolar hosts for green and red phosphorescent organic light-emitting devices", Mater. Sci. Eng. B., 261, 114662, 2020.
 16. S. Nasiri, M. Hosseinezhad, M. Rabiei, A. Palevicius, Z. Rahimi, G. Janusas, A. Vilkauskas, "New approach of mechanochromic, thermally activated delayed fluorescence dyes consisting of thioxanthenone derivative as an acceptor unit and two carbazole derivatives as the donor units" used as emitting layer in organic light-emitting diodes", Opt. Mater., 127, 112320, 2022.
 17. S. Nasiri, A. Dashti, M. Hosseinezhad, M. Rabiei, A. Palevicius, A. Doustmohammadi, G. Janusas, "Mechanochromic and thermally activated delayed fluorescence dyes obtained from D-A-D' type, consisted of xanthen and carbazole derivatives as an emitter layer in organic light emitting diodes", Chem. Eng. J., 430, 131877, 2022.
 18. H. Xu, Y. Zhao, J. Zhang, D. Zhang, Y. Miao, J. Shinar, R. Shinar, H. Wang, B. Xu, "Low efficiency roll-off phosphorescent organic light-emitting devices using thermally activated delayed fluorescence hosts materials based 1,2,4-triazole acceptor", Org. Lett., 74, 13-22, 2019.
 19. S.H. Jeong, H.J. Jang, J.Y. Lee, "High triplet energy crosslinkable hole transport material for blue phosphorescent organic light-emitting diodes", J. Indust. Eng. Chem., 78, 324-329, 2019.
 20. Y. Im, S.H. Han, J.Y. Lee, "Bipolar type indolocarbazole host for green phosphorescent organic light-emitting diodes", J. Indust. Eng. Chem. 66, 381-386, 2018.
 21. Y. Im, S.H. Han, J.Y. Lee, "Dibenzothiophene and indolocarbazole cored bipolar hosts for blue phosphorescent organic light-emitting diodes", Org. Electron. 62, 560-565, 2018.
 22. T. L. Chiu, H.J. Chen, T.C. Lin, H.J. Gau, Y.H. Hsieh, J.J. Huang, L.K. Yun, J. H. Lee, M.K. Leung, "Colour stability of BlueeGreen and white phosphorescent organic light-emitting diode employing a 9-(2-(4,5-diphenyl-4H-1,2,4-triazol-3-yl)phenyl)-9H-carbazole host", Dye Pigm. 141, 463-469, 2017.
 23. X. Xu, X. Yang, J. Zhao, G. Zhou, W. Y. Wong, "Recent advances in solution-processable dendrimers for highly efficient phosphorescent organic light-emitting diodes (PHOLEDs)", Asian J. Org. Chem. 4, 394-429, 2015.
 24. M. Dodangeh, K. Gharanjig, M. Arami, M. Mohammadian, "Synthesis, infra-red study, and application of polyamidoamine dendrimer modified with 1,8-naphthalimide derivatives as novel fluorescent disperse dye", Prog. Color Colorants Coat. 15, 203-211, 2022.
 25. A. Liang, Z. Liu, Z. Wang, W. Zhou, Y. Zhang, S. Hu, J. Xu, W. Zhu, M. Cai, "Novel self-host heteroleptic green iridium dendrimers based on carbazole dendrons for solution-processable non-doped phosphorescent organic light-emitting diodes", Opt. Mater. 106, 109976, 2020.
 26. T. Zhang, D. Xu, J. Chen, P. Zhang, X. Wang, "Synthesis and characterization of carbazole-based dendrimers as bipolar host materials for green phosphorescent organic light emitting diodes", Chinese Chem. Lett. 27, 441-446, 2016.
 27. Y. Qian, F. Cao, W. Guo, "High thermal stability 3, 6-fluorene-carbazole-dendrimers as host materials for efficient solution-processed blue phosphorescent devices", Tetrahedron, 69, 4169-4175, 2013.
 28. K. Sun, J. Wu, L. Zhu, H. Liu, Y. Zhou, W. Tian, Z. Cai, W. Jiang, Y. Sun, "Highly efficient blue all-solution-processed organic light-emitting diodes based on the strategy of constructing a thermally cross-linkable TADF dendrimer", Dye Pig. 198, 109967, 2022.
 29. Z. MA, Y. Wan, W. Dong, Z. Si, Q. Duan, S. Shao, "Alkoxy encapsulation of carbazole-based thermally activated delayed fluorescent dendrimers for highly efficient solution-processed organic light-emitting diodes", Chinese Chem. Lett. 32, 703-707, 2021.
 30. T.C. Lin, M. Sarma, Y.T. Chen, S.H. Liu, K.T. Lin, P.Y. Chiang, W.T. Chuang, Y. C. Liu, H.F. Hsu, W.Y. Hung, W.C. Tang, K.T. Wong, P.T. Chou, "Probe exciplex structure of highly efficient thermally activated delayed fluorescence organic light emitting diodes", Nat. Commun. 9, 3111, 2018.
 31. H. Jung, S. Kang, H. Lee, Y.J. Yu, J.H. Jeong, J. Song, Y. Jeon, J. Park, "High efficiency and long lifetime of a fluorescent blue-light emitter made of a pyrene core and optimized side groups", ACS Appl. Mater. Interfaces. 10, 30022, 2018.

How to cite this article:

M. Hosseinezhad, S. Nasiri, Review on Metal-Free Light-emitting Dyes for OLED, *J. Stud. Color world*, 12, 2(2022), 105-116.

DOR: 20.1001.1.22517278.1401.12.2.1.8