文章编号: 1007 − 4252(2024)06 − 0323 − 07 DOI: 10.20027/j.gncq.2024.0046

基于喹喔啉的蓝色热激子荧光材料合成及光电性能研究

王宝月, 张凯旗, 廖浩森, 胡文博, 曹一铭, 简驿骅, 李　晓*
(辽宁科技大学化学工程学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 能够有效利用三重态激子的纯有机蓝色荧光材料是有机发光二极管(OLEDs)的迫切需求之一。本文以喹喔啉作为受体, 连接两个或者四个咔唑给体, 构建了两种具有热激子通道的新型蓝色荧光材料 QDC 和 DCQDC。通过在喹喔啉的 6-和 7-位上连接咔唑, 成功将分子的激发态从电荷转移态调控到局域杂化和电荷转移激发态。QDC 和 DCQDC 在溶液中分别展现出最大发射波长为 435 和 480 nm 的蓝色发光。此外, 与 QDC 的发光效率(66%)相比, DCQDC 具有更高的发光效率(93%)。基于 DCQDC 的掺杂 OLED 器件表现出蓝光发射, 其最大发射峰位于 474 nm, 最大电流效率为 3.6 cd/A, 最大外量子效率为 1.81%。

关键词: 有机发光二极管; 蓝色荧光材料; 喹喔啉; 给-受体; 热激子
中图分类号: TB34　　**文献标志码:** A

Synthesis and electroluminescence properties of blue hot exciton fluorescent materials based on quinoxaline

WANG Bao-yue, ZHANG Kai-qi, LIAO Hao-sen, HU Wen-bo, CAO Yi-ming, JIAN Yi-hua, LI Xiao*
(School of Chemical Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, 114051, Liaoning, China)

Abstract: Pure organic blue fluorescent materials that can efficiently utilize triplet excitons are one of the urgent requirements for organic light-emitting diodes (OLEDs). In this work, two novel blue fluorescent materials QDC and DCQDC with hot exciton channels were constructed by using quinoxaline as the acceptor and connecting two or four carbazole donors. The excited states of the molecules were successfully regulated from the charge-transfer state to hybridized local and charge transfer excited state by the carbazole units connected at the 6- and 7-positions of the quinoxaline. QDC and DCQDC exhibited blue emissions with the maximum emission peaks (λ_{em}) at 435 and 480 nm in toluene solution, respectively. Furthermore, DCQDC possessed a higher luminescence efficiency (93%) than that of QDC (66%). DCQDC-based doped OLED device exhibits blue emission with an electroluminescence peak (λ_{EL}) at 474 nm, a maximum current efficiency (CE_{max}) of 3.6 cd/A and a maximum external quantum efficiency (EQE_{max}) of 1.81%.

收稿日期: 2024−10−30;　　**修订日期:** 2024−12−16
基金项目: 辽宁省自然科学基金 (2020-MS-282)
作者简介: 王宝月(1999—), 女, 博士在读, 主要研究方向为有机光电功能材料与器件(E-mail: 144360409l@qq.com).
通信作者: 李　晓(1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为有机光电功能材料与器件(E-mail: lixiao@ustl.edu.cn).

Key words: organic light-emitting diodes; blue fluorescent materials; quinoxaline; donor-acceptor; hot exciton

0 引言

有机发光二极管(OLEDs)具有高效、轻薄、视角宽、成本低和柔性化等优点,在智能手机、车载显示、大尺寸电视以及固态照明等领域得到了广泛应用[1-5]。蓝光材料是 OLEDs 中不可缺少的三基色材料之一,其不仅可以单独作为发光层,还可以作为高能主体材料,通过能量转移过程实现红、绿和白光发射[6-8]。然而,蓝光材料的宽带隙特性导致载流子注入势垒较大,严重影响了载流子的复合,使得蓝光材料在器件效率和稳定性方面的发展仍落后于绿光和红光材料[9]。为了有效地利用三重态激子,三重态-三重态湮灭[10]、热激活延迟荧光(TADF)[11]和热激子[12]材料相继被提出。其中,热激子材料由于具有局域激发(LE)和电荷转移(CT)激发态的双重优点,能够通过高效的反向系间窜越实现激子的充分利用和高色纯度的蓝光发射。因此,开发高性能蓝色热激子材料成为有机发光材料的研究热点之一。

喹喔啉是一类重要的平面杂环化合物,两个六元稠环结构上有多个取代位点,可以通过骨架、侧链和取代基等修饰来调控其分子能级,是一种优良的受体单元。其衍生物由于合成简单,成本较低,已广泛应用于光伏电池、荧光探针及有机发光材料领域[13-15]。然而,在有机发光材料中喹喔啉多用于 TADF 红光材料,应用于蓝光材料的报道极少[16,17]。为了探究喹喔啉在蓝光材料开发中的潜力,本文以喹喔啉作为受体,连接两个或者四个弱咔唑给体,构建了两个具有热激子通道的新型蓝色荧光材料 2,3-双 (4-(9H-咔唑-9-基) 苯基) 喹喔啉(QDC)和 9,9'-(2,3-双 (4-(9H-咔唑-9-基) 苯基) 喹喔啉-6,7-二基) 双 (9H-咔唑)(DCQDC),通过理论计算探究了目标化合物的基态和激发态的性质,并系统地研究了其光物理、电化学以及热力学性能,最后对 DCQDC 的电致发光性能进行了研究。

1 实验部分

1.1 测试仪器

氢核磁共振(^{1}H NMR)由 AVANCE 500MHZ 核磁共振波谱仪(瑞士 BRUKER 公司)测定;质谱由 Agilent 1100 HPLC/6530 高分辨质谱仪(美国 Agilent 公司)测定;紫外吸收光谱由 Lambda-900UV/VIS/NIR 型紫外-可见分光光度计(美国 PerkinElmer 公司)测定;荧光光谱由 LS-55 型荧光分光光度计(美国 PerkinElmer公司)测定;循环伏安曲线由 Vertex.One.EIS 型电化学工作站(荷兰 IVIUM 公司)测定;热重分析(TGA)曲线由热重分析仪 TG-DTA 6300(美国 PerkinElmer公司)在氮气环境下和 10 ℃·min^{-1} 的加热速率下测定;差示量热扫描(DSC)曲线由 DSC 4000 型差示扫描量热分析仪(美国 PerkinElmer 公司)测定;OLED 器件的制备和测试在 KC-BMCVD-Ⅱ型真空镀膜机(沈阳科诚真空有限公司)、Dektak XT 型台阶仪(国家纳米科学中心)、Keithley 2400 电源计(国家纳米科学中心)和 PR655 光电测试平台(国家纳米科学中心)上进行。

1.2 合成与表征

QDC 和 DCQDC 的合成路线如图 1 所示。

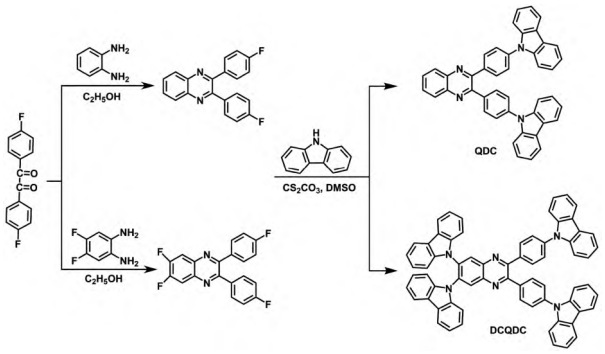

图 1 QDC 和 DCQDC 的合成路线示意图

Fig. 1 Synthetic routes of compounds QDC and DCQDC

2,3-二 (4-氟苯基) 喹喔啉的合成:在氮气氛围中,将邻苯二胺(1.0 mmol, 0.108 g)和 4,4′-二氟苯偶酰(1.0 mmol, 0.246 g)置于两颈烧瓶中,随后加入无水乙醇(10 mL),在 80 ℃ 的条件下反应 12 小时后降至室温。将反应液倒入单口烧瓶中,使用旋转蒸发仪旋干反应液,将旋干后的粗产物用石油醚重结晶,得到白色棉絮状晶体。收率:65%。

HRMS(APCI, M+H$^+$)，理论值：319.1041；精确值：319.1002。

6,7-二氟-2,3-双 (4-氟苯基) 喹喔啉的合成：在氮气氛围中，将 4,5-二氟苯-1,2-二胺（1.0 mmol, 0.144 g）和 4,4′-二氟苯偶酰（1.0 mmol, 0.246 g）置于两颈烧瓶中，随后加入无水乙醇（10 mL），在 80 ℃的条件下反应 12 小时后降至室温。将反应液倒入单口烧瓶中，使用旋转蒸发仪旋干反应液，将旋干后的粗产物用用无水乙醇重结晶，得到深红棕色针状晶体。收率: 75%。HRMS(APCI, M+H$^+$)，理论值：355.0853；精确值：355.0814。

QDC 的合成[18]：在氮气氛围中，将 2,3-二（4-氟苯基）喹喔啉（0.5 mmol, 0.158 g），咔唑（0.6 mmol, 0.11 g）和碳酸铯（0.6 mmol, 0.195 g）置于两颈烧瓶中，随后加入 10 mL 二甲基亚砜（DMSO），在 170 ℃的条件下反应 24 小时后降至室温，用二氯甲烷和饱和氯化钠溶液萃取，将有机相通过旋转蒸发仪旋干得到粗产物，将粗产物通过柱层析纯化得到淡黄色固体粉末，收率：61%。HRMS(APCI, M+H$^+$)，理论值：613.2387；精确值：613.2348. ^{1}H NMR (500 MHz, Chloroform-d) δ 8.28 (dt, J = 6.7, 3.4 Hz, 2H), 8.15 (d, J = 7.7 Hz, 4H), 7.92-7.83 (m, 6H), 7.70-7.63 (m, 4H), 7.49 (d, J = 8.1 Hz, 4H), 7.42 (ddd, J = 8.3, 7.0, 1.2 Hz, 4H), 7.34-7.27 (m, 4H).

DCQDC 的合成[18]：在氮气氛围中，将 6,7-二氟-2,3-双 (4-氟苯基) 喹喔啉（0.5 mmol, 0.177 g），咔唑（0.6 mmol, 0.11 g）和碳酸铯（0.6 mmol, 0.195 g）置于两颈烧瓶中，随后加入 10 mL DMSO，在 170 ℃的条件下反应 24 小时后降至室温，用二氯甲烷和饱和氯化钠溶液萃取，将有机相通过旋转蒸发仪旋干得到粗产物，将粗产物通过柱层析纯化得到黄色固体粉末，收率：34%。HRMS(APCI, M+H$^+$)，理论值：943.3544；精确值：943.3505. ^{1}H NMR (500 MHz, Chloroform-d) δ 8.76 (s, 2H), 8.17 (d, J = 7.7 Hz, 4H), 8.01-7.95 (m, 4H), 7.84-7.79 (m, 4H), 7.74 (d, J = 8.5 Hz, 4H), 7.52 (d, J = 8.2 Hz, 4H), 7.44 (ddd, J = 8.3, 7.0, 1.2 Hz, 4H), 7.35-7.26 (m, 8H), 7.12-7.02 (m, 8H).

2　研究结果

2.1　理论计算

为探究两种材料的几何构型、能级和轨道分布，使用 Gaussian 16 软件在 B3LYP/6-31G 基组下进行密度泛函理论计算（DFT）和含时 DFT（TD-DFT）计算，得到优化后的分子几何构型、最高占据分子轨道（HOMO）和最低未占据分子轨道（LUMO）的能级与分布，自然跃迁轨道（NTOs）以及激发态能级，如图 2 和图 3 所示。

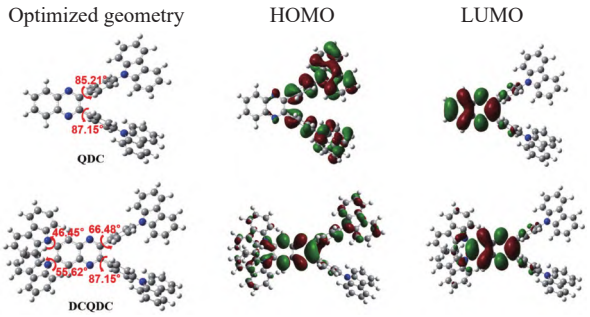

图 2　QDC 和 DCQDC 的优化结构和 HOMO/LUMO 的电子云密度分布图

Fig. 2　Optimized geometries and HOMO/LUMO electron cloud density distribution of QDC and DCQDC

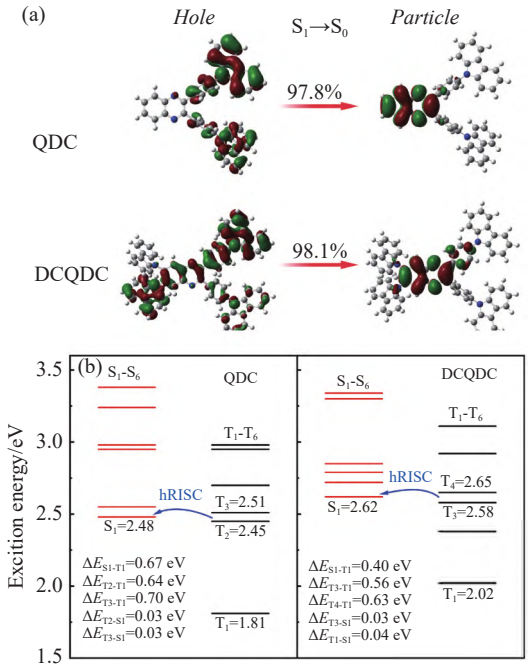

图 3　(a) QDC 和 DCQDC $S_1 \rightarrow S_0$ 的 NTOs 分布；(b) QDC 和 DCQDC 的激发态能级图

Fig. 3　(a) The NTOs of $S_1 \rightarrow S_0$ for QDC and DCQDC; (b) Energy levels of the singlet/triplet excited states for QDC and DCQDC

在 QDC 中，刚性平面受体喹喔啉与给体咔唑之间的空间位阻较大，导致分子结构高度扭曲，二

面角均大于 85°, HOMO 主要分布在苯基咔唑上, LUMO 主要分布在喹喔啉上, 少部分延伸到了咔唑和相邻的苯环上, 结构的扭曲导致了 HOMO 和 LUMO 的有效分离。DCQDC 中, 喹喔啉与 6-和 7-位连接咔唑的扭转角分别为 46°和 55°, 适中的扭转角造成分子的共轭长度略有增加, 导致 HOMO 和 LUMO 的重叠程度增加, 且 DCQDC 的发射峰发生红移。

从图 3 中可以看出, QDC 的空穴(hole)和粒子(particle)完全分离, 而 DCQDC 的 hole 和 particle 重叠部分明显增加, 这表明在喹喔啉的 6-, 7-位上引入咔唑使分子的激发态从 CT 态调控为局域杂化-电荷转移(HLCT)激发态, 有利于提高荧光量子效率。两个材料的 S_1 和 T_1 之间的能级差(ΔE_{ST})分别为 0.67 和 0.40 eV, 大的 ΔE_{ST} 排除了 TADF 的可能性。QDC 的 T_2/T_3 和 T_1 之间的能级差均为 0.03 eV, DCQDC 的 T_3/T_4 和 T_1 之间的能级差为 0.03/0.04 eV, 如此小的能级差有助于建立热激子通道, 通过高位反向隙间窜越过程实现高的激子利用率。

2.2 光物理性能

图 4(a)为两种化合物在室温下浓度为 1×10^{-5} mol/L 甲苯溶液中测得的紫外可见吸收光谱和光致发光(PL)光谱, 主要光物理性能数据见表 1。QDC 和 DCQDC 在 300 nm 附近和 320-370 nm 处的吸收峰来自分子内的 π-π*跃迁, 400-450 nm 的吸收峰归因于咔唑给体到喹喔啉受体的分子内电荷转移过程。两个化合物均表现出蓝光发射, 最大发射波长分别为 435 和 480 nm。此外, 以硫酸奎宁为参比物质, 测得 QDC 和 DCQDC 的相对光致发光量子产率(η_{PL})值分别为 66% 和 93%, 说明在喹喔啉 6-和 7-位上引入咔唑有效地提高了 η_{PL}, 这有助于实现较优的器件性能[19]。

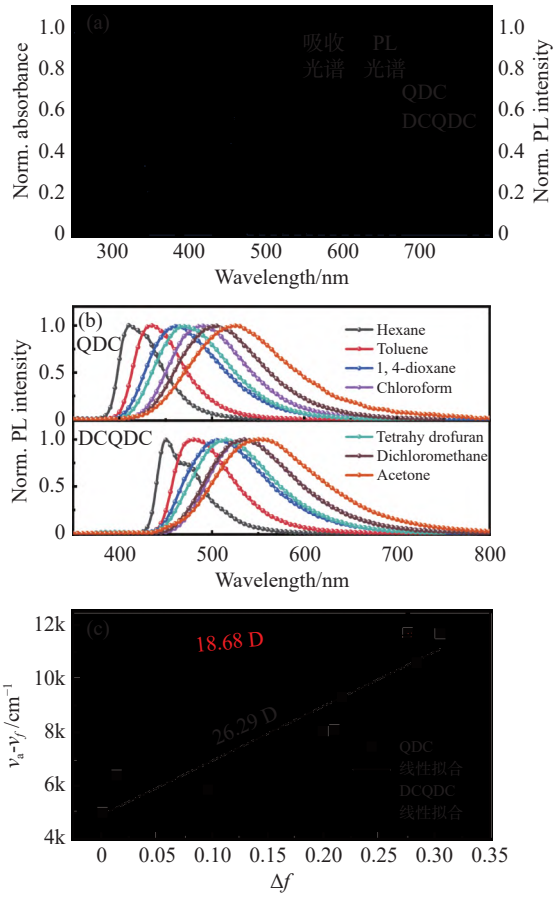

图 4 (a) QDC 和 DCQDC 在甲苯中的紫外可见吸收光谱和 PL 光谱; (b) QDC 和 DCQDC 在不同极性溶剂中的 PL 光谱; (c) QDC 和 DCQDC 的 Lippert-Mataga 模型的线性拟合

Fig. 4 (a) The UV-vis absorption and PL spectra of QDC and DCQDC in toluene; (b) PL spectra of QDC and DCQDC in different solvents; (c) Linear fitting of Lippert-Mataga models for QDC and DCQDC

表 1 QDC 和 DCQDC 的光物理、热力学和电化学性能数据

Table1 Photophysical, thermal and electrochemical performances of QDC and DCQDC

化合物	λ_{abs}/nm	λ_{em}/nm	η_{PL}/%	T_d/℃	T_g/℃	HOMO/eV	LUMO/eV	E_g/eV	λ/nm
QDC	292,340,370	435	66	428	—	−5.35	−2.37	2.98	416
DCQDC	292,336,418	480	93	479	217	−5.35	−2.64	2.71	458

图 4(b)为 QDC 和 DCQDC 在不同极性溶剂下的发射光谱, 可以看出两种化合物都具有明显的溶剂化效应。为了更好地理解激发态性质, 根据 Lippert-Mataga 模型进一步拟合了两种化合物的 Stokes 位移与取向极化率的关系, 如图 4(c)所示。计算出化合物 QDC 和 DCQDC 的激发态偶极矩 μ_e 分别为 26.29 D 和 18.68 D, 表明 DCQ 和 DCQDC 的激发态分别为 CT 态和 HLCT 态[20], 与理论计算的结果吻合。

2.3 热力学性能和电化学性能

OLED 器件要求有机发光材料具有优异的热

力学性能。从图 5(a)可知, QDC 和 DCQDC 失重 5% 的分解温度(T_d)分别为 428 ℃ 和 479 ℃, DCQDC 的玻璃化转变温度(T_g)为 217 ℃, QDC 没有表现出明显的 T_g。上述结果表明两种化合物都具有较好的热稳定, 可以在器件蒸镀过程中保持化学稳定性并形成无定型的薄膜, 这有利于提高器件的寿命和稳定性。

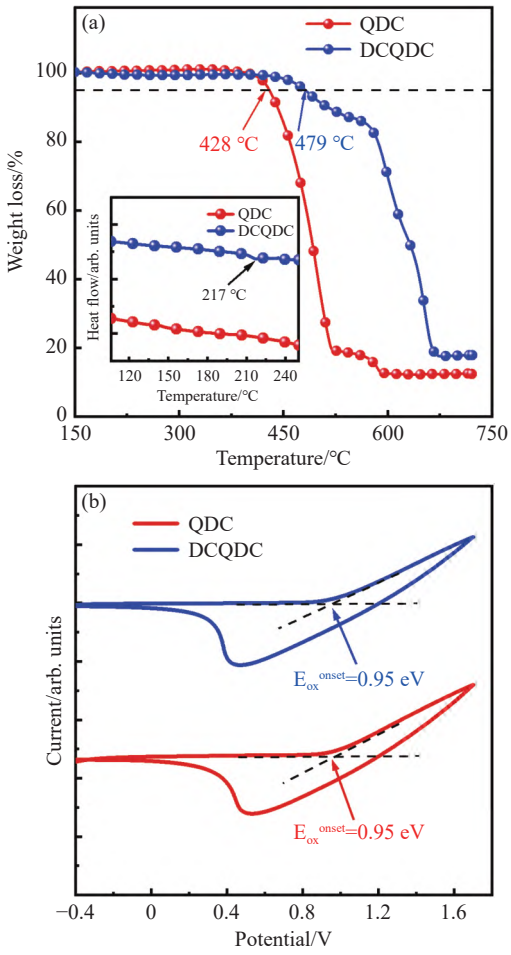

图 5　(a) QDC 和 DCQDC 的 TGA 曲线和第二次 DSC 扫描曲线 (内插); (b) QDC 和 DCQDC 的循环伏安曲线

Fig. 5　(a) The TGA curves and the second DSC scan curves of QDC and DCQDC (inset); (b) The curren-potential curves of QDC and DCQDC

QDC 和 DCQDC 在二氯甲烷溶液(10^{-2} M)中, 以铂碳电极为工作电极, 铂电极为对电极, 饱和甘汞电极作为参比电极, 使用四丁基六氟磷酸铵作为电解质, 二茂铁作为内标物, 在扫描速率为 50 mV·s^{-1} 的条件下进行循环伏安测试, 结果如图 5(b)所示。从图中能够看出, 化合物 QDC 和 DCQDC 均表现出不可逆的氧化峰。根据化合物的起始氧化电位公式:

$$E_{HOMO} = -(E_{ox}^{onset} + 4.4) \quad (1)$$

可计算出化合物 QDC 和 DCQDC 的 HOMO 能级均为−5.35 eV。上式中的 E_{HOMO} 为 HOMO 能级, E_{ox}^{onset} 为起始氧化电位。然后通过紫外吸收光谱和公式:

$$E_g = hc/\lambda \quad (2)$$

计算出的光学能隙 E_g 值分别为 2.98 和 2.71 eV。式中的 h 为普朗克常数, ν 为光子频率, λ 为紫外吸收光谱的起始吸收阈值。最后结合公式:

$$E_{LUMO} = E_g + E_{HOMO} \quad (3)$$

计算得到化合物的 LUMO 能级分别为−2.37 和−2.64 eV。式中的 E_{LUMO} 为 LUMO 能级。这些数值对于设计器件结构具有重要的参考价值。

2.4　电致发光性能

鉴于 DCQDC 具有更高的发光效率, 采用真空热沉积的方法, 选择其作为发光层材料制备了掺杂器件。在真空度小于 5×10^{-4} Pa 的条件下, 在经过预处理过的氧化铟锡 (ITO) 玻璃上依次沉积各功能层, 有机材料、8-羟基喹啉锂(Liq)和铝(Al)的沉积速度分别为 1~2 Å s^{-1}、0.1 Å s^{-1} 和 3~5 Å s^{-1}。器件结构为: ITO/m-MTDATA(10 nm)/TAPC(15 nm)/CBP: 10% DCQDC (25 nm)/TPBi (20 nm)/Liq (2 nm)/Al, 其中, 4,4-二 (9-咔唑) 联苯(CBP)作为主体材料, 4,4′-环己基二 [N,N-二 (4-甲基苯基) 苯胺](TAPC)和 1,3,5-三 (1-苯基-1H-苯并咪唑-2-基)(TPBi)分别作为空穴传输层和电子传输层, 4,4′,4″-三 (N-3-甲基苯基-N-苯基氨基) 三苯胺(m-MTDATA)和 Liq 分别作为空穴注入层和电子注入层。

如图 6(a)所示, OLED 在电场驱动下, 电子和空穴分别经阴极和阳极, 通过电子/空穴注入层被注入到载流子传输层, 最终在 CBP 中复合形成激子, 激子通过能量转移至 DCQDC 退激发光。如图 6(a-d)所示, 基于 DCQDC 掺杂的器件表现出蓝光发射, 最大发射波长为 474 nm, 在器件电压为 10 V 的条件下的色坐标为(0.16, 0.30)。EL 光谱表现出单峰发射, 说明器件的功能层匹配良好, 器件的蓝光发射来源于 DCQDC。此外, 器件表现出良好的电致发光性能, 最大亮度 (L_{max})、最大电流效率 (CE_{max})、最大功率效率(PE_{max})和最大外量子效率

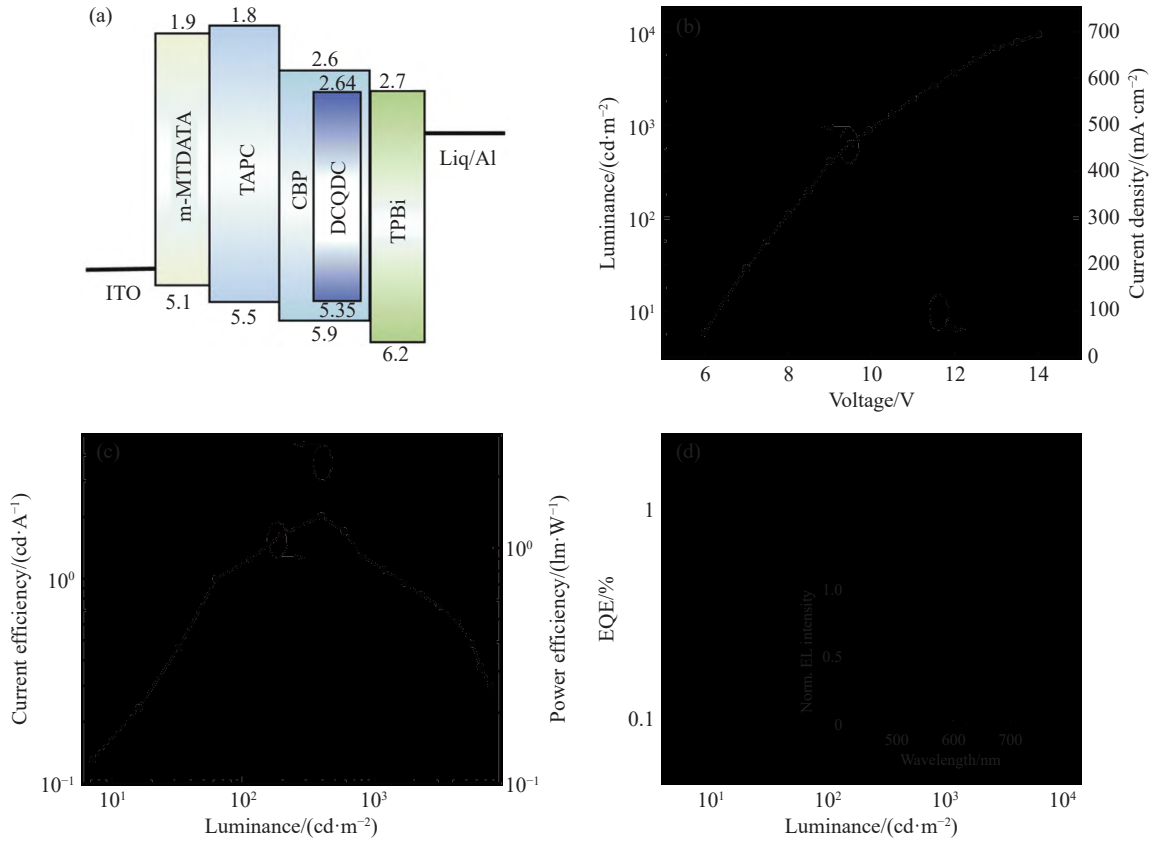

图 6 (a) 器件结构和材料能级图; (b) 亮度-电压-电流密度曲线; (c) 电流效率-亮度-功率效率曲线; (d) 外量子效率-亮度曲线和 EL 光谱(内插)

Fig. 6 (a) Device configuration diagram and energy level of the materials; (b) luminance-voltage-current density cueves; (c) current efficiency-luminance-power effciency curves; (d) extarnal quantum efficiency-luminance curve and EL spectra (inset)

(EQE_{max})分别为 7670 cd/m^2、3.6 cd/A、1.36 lm/W 和 1.81%。

3 结论

本文以喹喔啉为受体,通过在其 2-, 3-位或 2-, 3-, 6-, 7-位上连接两个或者四个咔唑弱给体单元,合成了两种新型的具有热激子通道的蓝色荧光材料 QDC 和 DCQDC。该分子设计策略有效地调节分子的激发态到从 CT 态到 HLCT 态。QDC 和 DCQDC在溶液中均表现出蓝光发射,最大发射峰分别位于 435 和 480 nm, η_{PL} 分别为 66% 和 93%,且均具有良好的热力学性能。同时,通过理论计算证明 QDC 和 DCQDC 分别具有 $T_2/T_3 \rightarrow S_1$ 和 $T_3/T_4 \rightarrow S_1$ 热激子通道。基于 DCQDC 的掺杂器件展现出天蓝光发射,最大发射波长为 474 nm, L_{max} 为 7670 cd/m^2, CE_{max} 和 PE_{max} 分别为 3.6 cd/A 和 1.36 lm/W, EQE_{max}为 1.81%。本工作对开发基于喹喔啉的蓝色热激子荧光材料具有重要的参考价值。

参考文献:

[1] Tang C W, VanSlyke S A. Organic electroluminescent diodes[J]. Applied Physics Letters, 1987, 51(12): 913-915.

[2] Zhang D D, Huang T Y, Duan L. Emerging self - emissive technologies for flexible displays[J]. Advanced Materials, 2020, 32(15): 1902391.

[3] Siddiqui I, Kumar S, Tsai Y F, et al. Status and challenges of blue OLEDs: A review[J]. Nanomaterials, 2023, 13(18): 2521.

[4] Cai Z Y, Wu X, Liu H, et al. Realizing record - high electroluminescence efficiency of 31.5% for red thermally activated delayed fluorescence molecules[J]. Angewandte Chemie, 2021, 133(44): 23827-23832.

[5] 黄俊宇, 瞿小林, 秦源涛, 等. 常压下铌掺杂二氧化钛薄膜的制备与光学性能研究 [J]. 功能材料与器件学报, 2023, 29(04): 281-286.

[6] Huang F, Liu H L, Li X G, et al. Highly efficient hole injection/transport layer-free OLEDs based on self-assembled

monolayer modified ITO by solution-process[J]. Nano Energy, 2020, 78: 105399.

[7] Liu H, Liu F T, Lu P. Multiple strategies towards high-efficiency white organic light-emitting diodes by the vacuum deposition method[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2020, 8(17): 5636-5661.

[8] Yang G X, Tan H J, Zhao J W, et al. Structurally modified [1, 2, 4] triazolo [1, 5-a] pyridine derivatives as promising materials for highly efficient blue fluorescent organic light-emitting diodes[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 445: 136813.

[9] Hu Y X, Miao J S, Zhong C, et al. Peripherally Heavy - Atom - Decorated Strategy Towards High - Performance Pure Green Electroluminescence with External Quantum Efficiency over 40%[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2023, 62(19): e202302478.

[10] Jiang H, Tao P, Wong W Y. Recent advances in triplet–triplet annihilation-based materials and their applications in electroluminescence[J]. ACS Materials Letters, 2023, 5(3): 822-845.

[11] Endo A, Sato K, Yoshimura K, et al. Efficient up-conversion of triplet excitons into a singlet state and its application for organic light emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(8): 083302.

[12] Xie J H, Yao J W, Dai Y F, et al. Improvement of exciton utilization by suppressing exciton leakage for high efficiency blue and white organic light-emitting diodes[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2022, 10(21): 8349-8355.

[13] Liu M, Gao Y Y, Zhang Y, et al. Quinoxaline-based conjugated polymers for polymer solar cells[J]. Polymer Chemistry, 2017, 8(32): 4613-4636.

[14] 时建朝, 田雨蔓, 吴伟娜, 等. 一例喹喔啉酰腙荧光探针对锌离子的选择性高灵敏识别及细胞成像应用 [J]. 无机化学学报., 2023(7): 1295-1302.

[15] Li X N, Tu L J, Gao M X, et al. Highly Efficient Blue Organic Light Emitting Diodes Based on Cyclohexane-Fused Quinoxaline Acceptor[J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2023, 14(31): 6982-6989.

[16] 周路, 陈嘉雄, 籍少敏, 等. 喹喔啉类红光热活化延迟荧光材料研究进展 [J]. 化学学报, 2022, 80(03): 359-372.

[17] Gong X, Li P, Huang Y H, et al. A red thermally activated delayed fluorescence emitter simultaneously having high photoluminescence quantum efficiency and preferentially horizontal emitting dipole orientation[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(16): 1908839.

[18] Luo M, Li W, Du S Y, et al. Purely Nitrogen - Based Multi - Resonance Deep - Blue Emitter with an Ultralow y Color Coordinate of < 0.03 via Rationally Intramolecular Charge Transfer[J]. Advanced Optical Materials, 2023, 11(16): 2300491.

[19] Yang T, Cheng Z, Li Z Q, et al. Improving the efficiency of red thermally activated delayed fluorescence organic light - emitting diode by rational isomer engineering[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(34): 2002681.

[20] Zhang S T, Li W J, Yao L, et al. Enhanced proportion of radiative excitons in non-doped electro-fluorescence generated from an imidazole derivative with an orthogonal donor–acceptor structure[J]. Chemical communications, 2013, 49(96): 11302-11304.