

doi:10.15199/48.2022.09.51

## Organiczne diody elektroluminescencyjne na bazie pochodnych pirazolochinoksalin

**Streszczenie.** Pochodne pirazolochinoksalin (A-PQX) badano pod kątem zastosowań w organicznych diodach elektroluminescencyjnych (OLED). Wykonane zostały pomiary widm absorpcyjnych, fotoluminescencyjnych oraz elektroluminescencyjnych. Zbudowane zostały jednowarstwowe komórki o strukturze ITO/PEDOT:PSS/PVK+A-PQX/Ca/Al. Wyznaczone zostały parametry charakterystyczne dla OLED. Maksymalna luminescencja otrzymana dla tych struktur wynosiła 884 cd/m<sup>2</sup> dla diody na bazie 7-N,N-dietylo-1-fenyl-3-metylo-1H-pirazolo[3,4-b]chinoksaliny (7-PQX).

**Abstract.** Pyrazoloquinoxaline derivatives (A-PQX) have been studied for applications in organic light emitting diodes (OLEDs). Single-layer OLEDs with the structure: ITO/PEDOT:PSS/PVK+A-PQX/Ca/Al were built. Parameters characteristic for OLED were determined. The absorption, photoluminescent and electroluminescent spectra were measured. The maximum luminescence obtained for these structures was 884 cd/m<sup>2</sup> for a diode based on 7-N,N-diethyl-3-methyl-1-phenyl-1H-pyrazolo[3,4-b]quinoxaline (7A-PQX). (**Organic light-emitting diodes based on pyrazoloquinoxaline derivatives**).

**Słowa kluczowe:** organiczne diody elektroluminescencyjne, OLED, absorpcja, elektroluminescencja, fotoluminescencja.

**Keywords:** organic light emitting diodes, OLED, absorption, electroluminescence, photoluminescence.

### Wstęp

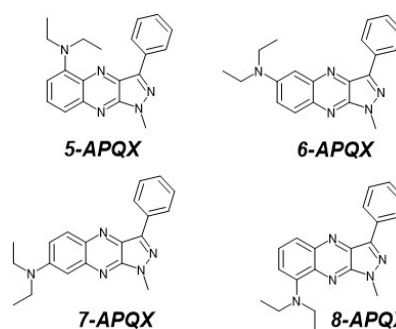
Organiczne urządzenia emitujące światło stanowią alternatywę dla konwencjonalnych półprzewodnikowych urządzeń ze względu na ich zalety oraz perspektywy aplikacyjne w wiodących technologiach [1]. OLED znalazły zastosowanie na przykład w wysokiej jakości ekranach TV, monitorach komputerowych, laptopach, wyświetlaczach smartfonów, w sensorach, urządzeniach oświetleniowych do użytku domowego, a także komercyjnego [2, 3]. W ciągu ostatnich 30 lat nastąpił dynamiczny rozwój technologii OLED [4-12] zapoczątkowany pracami Frienda i współpracowników [4]. Pierwsza organiczna dwuwarstwowa dioda świecąca została otrzymana w latach osiemdziesiątych zeszłego stulecia przez A. Van Slyke'a i C. W. Tanga [13]. Jednak zjawisko elektroluminescencji (EL) materiałów organicznych zaobserwowano już wcześniej, w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku [14,15], a w latach sześćdziesiątych W. G. Schneider i W. Helfrich opisali elektroluminescencję antracenu [16]. Wyróżniamy następujące struktury diod organicznych OLED: jednowarstwowe, dwuwarstwowe, trójwarstwowe oraz wielowarstwowe wyświetlacze OLED [17]. W pracy przedstawione zostaną badania dotyczące struktur jednowarstwowych ITO/PEDOT:PSS/PVK+A-PQX/Ca/Al, w których organiczną warstwą świecąca była mieszaniną PVK oraz pochodnych pirazolochinoksalin (A-PQX).

### Materiały

Do budowy diod elektroluminescencyjnych jako warstwy aktywnej użyto izomery położeniowe pochodnych 1-fenyl-3-metylo-1H-pirazolo[3,4-b]chinoksaliny (A-PQX), różniące się położeniem podstawnika N,N-dietyloaminowego w pierścieniu karbocyklicznym. Podstawnik ten ma charakter elektronodonorowy. Wzory strukturalne izomerów zaprezentowano na Rysunku 1.

Badane struktury uzyskano na drodze trzy etapowej syntezy opisanej w pracach [18] i [19]. W pierwszym etapie na drodze sprzęgania Buchwalda-Hartwiga uzyskano pochodne chlorowe 5-(o-nitrofenyl)pirazolu. Związki te następnie poddano reduktywnej cyklizacji z zastosowaniem szczawianu żelaza (II) jako czynnika redukującego, uzyskując izomery położeniowe PQX z podstawnikiem chlorowym. Ostatnim etapem syntezy było zastąpienie podstawnika chlorowego w każdym z izomerów,

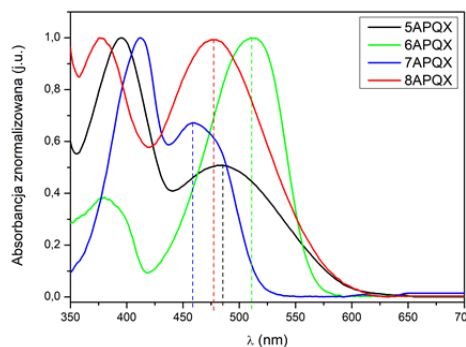
podstawnikiem N,N-dietyloaminowym. Reakcję tą przeprowadzono wg. aminowania chlorków arylowych opracowaną przez Buchwalda [20]. Szczegółowe informacje nt. warunków, przebiegu i wydajności prowadzonych syntez oraz charakterystyka spektroskopowa izomerów A-PQX są opisane w pracy [19].



Rys. 1 Wzory strukturalne aminowych pochodnych PQX (A-PQX) (5A-PQX – 5-N,N-dietylo-1-fenyl-3-metylo-1H-pirazolo[3,4-b]chinoksalina; 6A-PQX – 6-N,N-dietylo-1-fenyl-3-metylo-1H-pirazolo[3,4-b]chinoksalina; 7A-PQX – 7-N,N-dietylo-1-fenyl-3-metylo-1H-pirazolo[3,4-b]chinoksalina; 8A-PQX – 8-N,N-dietylo-1-fenyl-3-metylo-1H-pirazolo[3,4-b]chinoksalina).

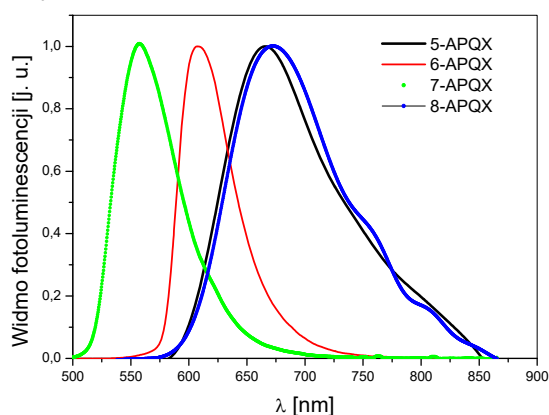
### Właściwości fotofizyczne

Wykonano pomiary absorpcji i fotoluminescencji izomerów położeniowych A-PQX w roztworze tetrahydrofuranu (THF).



Rys. 2 Znormalizowane widma absorpcyjne pochodnych A-PQX w THF z zaznaczonym położeniem pasma przejścia S<sub>0</sub>→S<sub>1</sub>.

Znormalizowane widma absorpcji uzyskane z pomiarów przedstawiono na Rysunku 2. Widma absorpcji każdego izomeru charakteryzują się dwoma intensywnymi pasmami, które obejmują niebieską, zieloną oraz częściowo żółtą część zakresu widzialnego promieniowania elektromagnetycznego. W widmach obserwuje się pasma przejścia pomiędzy stanem podstawowym S<sub>0</sub> a wzbudzonym S<sub>1</sub>, z maksimum leżącym w zakresie od 459 nm do 512 nm w zależności od izomeru w roztworach THF. Pasma absorpcji dla barwnika z podstawnikiem elektronodonorowym w pozycji 6 (6A-PQX) jest położone przy najdłuższych długościach fal w odniesieniu do pozostałych pasm ( $\lambda_{\max}=512$  nm). Natomiast pasmo absorpcji dla układu z podstawnikiem w pozycji 7 (7A-PQX) leży przy najkrótszych długościach fal ( $\lambda_{\max}=459$  nm). Izomer ten wykazał najwyższą wartość molowego współczynnika absorpcji ( $\epsilon = 10800$  M<sup>-1</sup>cm<sup>-1</sup>). Maksyma emisji położone są w zakresie od zielonego do czerwonego widma widzialnego promieniowania elektromagnetycznego (Tabela 1), w zależności od położenia podstawnika w pierścieniu karbocyklicznym. Dla izomeru 5A-PQX i 8A-PQX pasma absorpcji i emisji są podobne i leżą w zbliżonym zakresie długości fali. Prawdopodobnie jest to związane z położeniem podstawnika N,N-dietyloaminowego, który w tych ułożeniach ma mniej miejsca na rotację niż w położeniach 6 i 7. Na podstawie wyznaczonych maksimów pasm absorpcji i fotoluminescencji wyliczono wartości przesunięcia Stokesa (SS) (Tabela 1). Uzyskane wartości są wysokie (od 70 nm dla 6A-PQX do 176 nm dla 8A-PQX), co jest zjawiskiem korzystnym i może świadczyć o niskim prawdopodobieństwie reabsorpcji [21]. Na rysunku 3 zaprezentowano przykładowe widma fotoluminescencji badanych barwników w THF.



Rys. 3. Widma fotoluminescencji dla związków 5A-PQX, 6A-PQX, 7A-PQX, 8A-PQX zarejestrowane w THF.

W Tabeli 1 zebrano podstawowe parametry fotofizyczne badanych izomerów APQX zarejestrowane w THF. Wydajność kwantową fluorescencji wyznaczono metodą porównawczą korzystając z wykonanych pomiarów emisji i emisji dla roztworu wzorcowego (fluoresceina w 0,1 M roztworze NaOH,  $\Phi_f = 0,95$ ) [22]. Natomiast w Tabeli 2 zamieszczone zostały zoptymalizowane struktury izomerów A-PQX w programie HyperChem oraz wyliczone dla nich wartości poziomów HOMO, LUMO i momentu dipolowego (MD). Na podstawie zebranych wyników można stwierdzić, że położenie podstawnika elektronodonorowego, jakim jest podstawnik N,N-dietyloaminowy, ma wpływ na właściwości absorpcyjne i emisyjne pochodnych PQX. Izomer z podstawnikiem w pozycji 6 (6A-PQX) cechuje się absorpcją w najdalszym zakresie światła widzialnego o wysokiej intensywności ( $\epsilon=10155$  M<sup>-1</sup>cm<sup>-1</sup>). Związek ten wykazał też najwyższą wartość wydajności kwantowej fluorescencji

(86%), przy najniższym przesunięciu Stockesa spośród badanych. Z kolei izomer 8A-PQX wykazał w pomiarach największe przesunięcie Stockesa (176 nm) jednak jego absorpcja oraz kwantowa wydajność fluorescencji są na niskim poziomie (Tabela 1).

Tabela 1. Podstawowe parametry fotofizyczne dla izomerów APQX zmierzonych w tetrahydrofuranie (THF) ( $\lambda_{\max}$  – długość fali dla maksimum absorpcji,  $\epsilon$  – molowy współczynnik absorpcji w maksimum absorpcji,  $\lambda_{FL}$  – długość fali dla maksimum fotoluminescencji,  $\Phi_{FL}$  – wydajność kwantowa fluorescencji, SS – przesunięcie Stokesa).

Związek	$\lambda_{\max}$ [nm]	$\epsilon$ [M <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup> ]	$\lambda_{FL}$ [nm]	$\Phi_{FL}$	SS [nm]
5APQX	483	2620	665	0,26	167
6APQX	512	10155	607	0,86	70
7APQX	459	10800	556	0,53	80
8APQX	478	3645	672	0,03	176

Analizując położenie poziomów HOMO – LUMO w badanych strukturach, można zauważyć, że położenie poziomów we wszystkich czterech strukturach jest w podobnych zakresach. Największą przerwę energetyczną  $E_g$  uzyskano dla izomeru 8A-PQX (3,00 eV) a najmniejszą dla 7APQX (2,89 eV). Izomer 8A-PQX cechuje się też najwyższym momentem dipolowym. Niskie wartości przerwy energetycznej ( $E_g \leq 3,00$  eV) dają podstawę do dalszych badań związków jako elementy urządzeń optoelektronicznych [23].

Tabela 2. Zoptymalizowane struktury izomerów A-PQX oraz wartości poziomów HOMO i LUMO (MD – moment dipolowy,  $E_g$  – przerwa energetyczna).

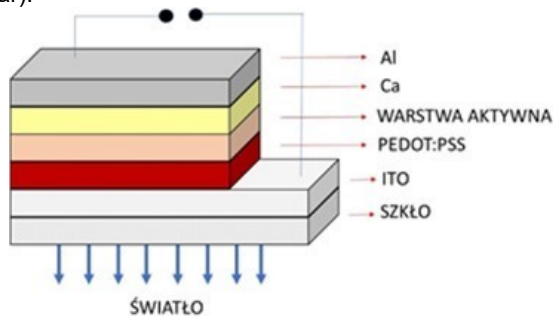
Związek	Struktura	HOMO [eV]	LUMO [eV]	MD [Debyes]	$E_g$ [eV]
5APQX		-0,20	-3,17	0,46	2,97
6APQX		-0,27	-3,18	0,26	2,91
7APQX		-0,29	-3,18	1,04	2,89
8APQX		-0,18	-3,18	2,54	3,00

## Technologia OLED

Na bazie pochodnych pirazolochinoksalin (A-PQX) wykonane zostały cztery jednowarstwowe organiczne komórki świecące o strukturze ITO/PEDOT:PSS/ PVK+A-PQX/Ca/Al przedstawionej na Rysunku 4.

Jako podkład do budowy komórek świecących zastosowano szkło pokryte warstwą tlenku cynowo-indowego ITO (rezystancja 15 $\Omega$ /sq). Podłoże szkło/ITO o powierzchni 15×15 mm<sup>2</sup> oczyszczone zostało w myjce ultradźwiękowej przy użyciu izopropanolu, acetonu, detergentu i wody destylowanej. Na tak przygotowany podkład metodą spin-coatingu naniesiona została organiczna warstwa PEDOT:PSS (poli(3,4-etylenodioksytyfen): kwas polistyrenosulfonowy). Cienka warstwa PEDOT:PSS (1,3% wag. dyspersja w H<sub>2</sub>O, klasa przewodząca) wygrzana została w suszarce próżniowej w 100°C przez 30 min. W kolejnym etapie przy użyciu spin-coatera naniesiona została organiczna warstwa aktywna, która była mieszaniną poli(N-winylokarbazolu) – PVK oraz

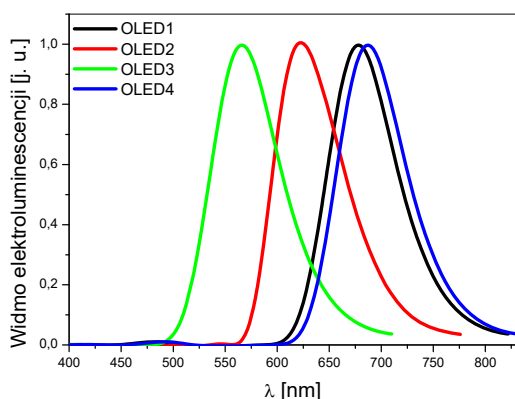
odpowiedniego luminoforu A-PQX. Na koniec na organiczną warstwę aktywną napylona została anoda wapniowo (Ca) aluminiowa (Al) w napyłarce próżniowej ( $10^{-6}$  bar).



Rys.4. Struktura organicznej diody elektroluminescencyjnej.

### Pomiary eksperymentalne zbudowanych OLED

W ramach pracy wykonane zostały pomiary widm elektroluminescencji (Rysunek 5) przy użyciu spektrofotometru skaningowego Shimadzu UVVIS 2101. Wyniki maksimum elektroluminescencji dla badanych związków zestawiono w Tabeli 3. Przy pomocy źródła prądowego KEITHLEY 2400 SourceMeter oraz pikoamperomierza KEITHLEY 2400 zostały zmierzone charakterystyki prądowo-napięciowo-elektroluminescencyjne zbudowanych organicznych diod OLED.



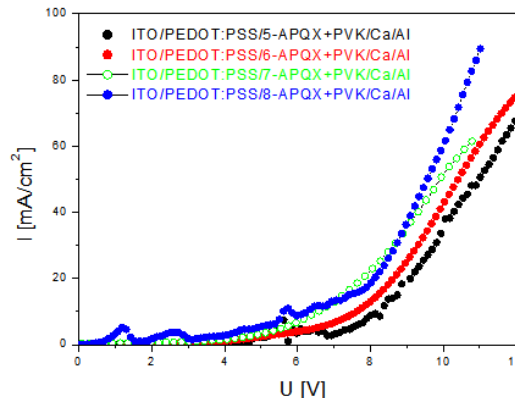
Rys. 5. Znormalizowane widma elektroluminescencji EL dla organicznych diod elektroluminescencyjnych OLED1-ITO/PEDOT:PSS/PVK+5A-PQX/Ca/Al, OLED2-ITO/PEDOT:PSS/PVK+6A-PQX/Ca/Al, OLED3-ITO/PEDOT:PSS/PVK+7A-PQX/Ca/Al, OLED4-ITO/PEDOT:PSS/PVK+8A-PQX/Ca/Al.

Napięcie oraz natężenie prądu przepływającego przez badaną komórkę zmierzono miernikiem KEITHLEY 2400. Pikoamperomierzem KEITHLEY 2400 podłączonym do fotodiody HAMAMATSU S1337-BQ wykonano pomiary prądu fotodiody, która umieszczona była bezpośrednio nad badaną diodą świecącą. Fotodiody HAMAMATSU S1337-BQ zbierała światło z diody EL.

### Wyniki eksperymentalne

Znormalizowane widma elektroluminescencji zbudowanych jednowarstwowych komórek OLED1-OLED4, dających światło od żółtego poprzez pomarańczowe do czerwonego, przedstawione zostały na Rysunku 5. Maksimum elektroluminescencji  $\lambda_{EL} = 686$  nm (Tabela 3) otrzymano dla komórki z aktywną warstwą (PVK+8A-PQX). Dla tej struktury widmo emisyjne jest najbardziej przesunięte w kierunku fal dłuższych. Dla diody OLED3 z warstwą aktywną (7A-PQX) otrzymane widmo elektroluminescencyjne jest przesunięte w kierunku fal

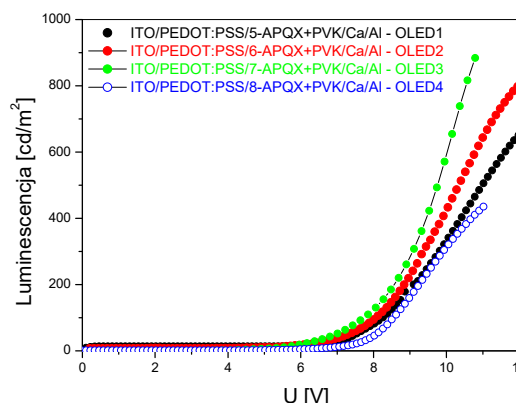
krótszych w porównaniu do pozostałych badanych komórek. Dla OLED3 maksimum EL  $\lambda_{EL} = 556$  nm. Dla OLED2 z warstwą aktywną (6A-PQX) maksimum EL  $\lambda_{EL} = 607$  nm, a dla OLED1 z warstwą aktywną 5A-PQX maksimum EL  $\lambda_{EL} = 665$  nm (Tabela 3). Otrzymane charakterystyki gęstości prądu-napięcia oraz elektroluminescencyjno-napięciowe przedstawione zostały odpowiednio na Rysunkach 6 i 7. Dla zbudowanych diod świecących wyznaczono napięcia zapłonu  $U_T$ , które zestawiono w Tabeli 4. Najlepszą luminancję  $884 \text{ cd/m}^2$  otrzymano dla diody o strukturze ITO/PEDOT:PSS/PVK+7A-PQX/Ca/Al (OLED3), dla której w skład organicznej warstwy aktywnej wchodziła 7-N,N-dietylo-1-fenyl-3-metylo-1H-pirazolo[3,4-b]chinoksolina oraz PVK.



Rys. 6. Charakterystyki gęstości prądu-napięcia dla zbudowanych diod OLED1-ITO/PEDOT:PSS/PVK+5A-PQX/Ca/Al, OLED2-ITO/PEDOT:PSS/PVK+6A-PQX/Ca/Al, OLED3-ITO/PEDOT:PSS/PVK+7A-PQX/Ca/Al, OLED4-ITO/PEDOT:PSS/PVK+8A-PQX/Ca/Al.

Tabela 3. Maksima elektroluminescencji  $\lambda_{EL}$  badanych związków A-PQX.

Molekuła	$\lambda_{EL}$ [nm]
5-APQX	678
6-APQX	622
7-APQX	563
8-APQX	686



Rys. 7. Charakterystyki elektroluminescencyjno-napięciowe zbudowanych OLED. OLED1-ITO/PEDOT:PSS/PVK+5A-PQX/Ca/Al, OLED2-ITO/PEDOT:PSS/PVK+6A-PQX/Ca/Al, OLED3-ITO/PEDOT:PSS/PVK+7A-PQX/Ca/Al, OLED4-ITO/PEDOT:PSS/PVK+8A-PQX/Ca/Al.

Dioda, zawierająca związek 7A-PQX jako emiter, wykazała wydajność  $1,43 \text{ cd/A}$ . Natomiast dla OLED2 otrzymana luminancja to  $813 \text{ cd/m}^2$ . Dla tej komórki w warstwie aktywnej zastosowano mieszaninę PVK oraz 6A-

PQX. Najmniejszą luminescencję 435 cd/m<sup>2</sup> uzyskano dla diody o strukturze ITO/PEDT:PSS/PVK+8A-PQX/Ca/Al, w której jako luminoforu użyto 8-*N,N*-dietylo-1-fenyl-3-metylo-1*H*-pirazolo[3,4-*b*]chinoksalinę. OLED 4 wykazywała wydajność około 0,5 cd/A. Związek 5-*N,N*-dietylo-1-fenyl-3-metylo-1*H*-pirazolo[3,4-*b*]chinoksalina (5-APQX) został użyty jako emiter w strukturze OLED1 - ITO/PEDOT:PSS/+PVK+5A-PQX/ Ca/Al. Dioda OLED1 charakteryzowała się wydajnością rzędu 0,95 cd/A, przy luminancji 665 cd/m<sup>2</sup>. Wszystkie otrzymane wyniki parametrów zbudowanych organicznych diod świecących zestawiono w Tabeli 4.

Tabela 4. Parametry otrzymanych OLED.

Molekuła	U <sub>r</sub> [V]	Luminescencja [cd/m <sup>2</sup> ]	MAX CE [cd/A]
OLED1	6,98	663	0,95
OLED2	6,46	812	1,06
OLED3	6,23	884	1,43
OLED4	5,91	435	0,50

## Wnioski

Zsyntezowane pochodne pirazolochinoksalin A-PQX wykazują właściwości elektroluminescencyjne. Największą luminancję otrzymano dla OLED3 na bazie pochodnej 7-*N,N*-dietylo-1-fenyl-3-metylo-1*H*-pirazolo[3,4-*b*]chinoksaliny (7A-PQX). Pochodna 7A-PQX wykazała także najwyższą wartość molowego współczynnika absorpcji spośród badanych struktur i wysoką wydajność kwantową fluorescencji. Wskazuje to, że jest ona obiecującym materiałem do zastosowań w urządzeniach świecących. Dalsza optymalizacja struktur OLED może znacząco wpłynąć na poprawę parametrów komórek EL.

**Autorzy:** dr inż. Monika Pokładko-Kowar, Politechnika Krakowska, Katedra Fizyki ul. Podchorążych 1, 30-084 Kraków, Email: [mpokladkokowar@pk.edu.pl](mailto:mpokladkokowar@pk.edu.pl); dr Katarzyna Wojtasik, Politechnika Krakowska, Katedra Fizyki ul. Podchorążych 1, 30-084 Kraków, Email: [katarzyna.wojtasik@pk.edu.pl](mailto:katarzyna.wojtasik@pk.edu.pl)

## LITERATURA

[1] Sneha Kagatkar and Dhanya Sunil, *A systematic review on 1,8-naphthalimide derivatives as emissive materials in organic light-emitting diodes*, J. Mater. Sci., 57 (2022), 105–139.

[2] Yeh P., Yeh N., Lee CH., Ding T.J., *Applications of LEDs in optical sensors and chemical sensing devices to detect biochemicals, heavy metals, and environmental nutrients*. Renew Sustain Energy Rev 75, (2017), 461–468.

[3] Wang Y., Liu P., Wang H. et al., *Flexible organic light emitting devices with copper nanowire composite transparent conductive electrode*, J Mater Sci, 54, (2019), 2343–2350.

[4] Burroughes J., Bradley D., Brown A.R., Marks R.N., Mackay K., Friend R.H., Burn P.L., Holmes A., *Light-emitting diodes based on conjugated polymers*, Nature, 347, (1990), 539–541.

[5] S. Reineke, F. Lindner, G. Schwartz, N. Seidler, K. Walzer, B. Luessem, K. Leo, *White organic light-emitting diodes with fluorescent tube efficiency*, Nature 459 (2009) 234–238.

[6] Nan-Chieh Chiu, Kyle Smith T., Stylianou Kyriakos C, *Metal-organic frameworks for white light emission: From synthesis to device fabrication*, Coordination Chemistry Reviews, 459, (2022), 214441.

[7] Qian-Chong Zhang, Hui Xiao, Xu Zhang, Liang-Jin Xu, Zhong-Ning Chen, *Luminescent oligonuclear metal complexes and the use in organic light-emitting diodes*, Coordination Chemistry Reviews, 378, (2019), 121–133.

[8] Yuan Q., Wang T., Panlong Y., Zhang H., Han Zhang, Ji W., *A review on the electroluminescence properties of quantum-dot light-emitting diodes*, Organic Electronics, 90, (2021) 106086.

[9] Luo X.F., Qu Z.Z., Han H.B., Su J., Yan Z., Zhang X.M., Tong J.J., Zheng Y.X., Zuo J.L., *Carbazole-based Iridium(III) complexes for electrophosphorescence with EQE of 32.2% and low efficiency roll-off*, Adv. Opt. Mater. 9, (2020), 2001390.

[10] Wan S.P., Lu H. Y., Li M., Chen C.Feng., *Advances in circularly polarized luminescent materials based on axially chiral compounds*, Journal of Photochemistry & Photobiology, C: Photochemistry Reviews, 50, (2022) 100500.

[11] Z. Chen, C.-L. Ho, L. Wang, W.-Y. Wong, *Single-molecular white-light emitters and their potential WOLED applications*, Adv. Mater., 32, (2020), 1903269.

[12] Chen D., Wei Li, Lin Gan, Mengke Z. W., Li, Shi-Jian Su *Non-noble-metal-based organic emitters for OLED applications*, Materials Science & Engineering R, 142, (2020), 100581.

[13] Tang C.W., VanSlyke S.A., *Organic electroluminescent diodes* Appl. Phys. Lett. 51 (1987) 913.

[14] Bernanose A., Vouaux P., Chim J., *Électroluminescence organique : étude du mode d'émission*, Phys., 50, (1953), 261.

[15] Bernanose A., Comte M., Vouaux P., Chim J., *Sur un nouveau mode d'émission lumineuse chez certains composés organiques*, Phys. 50 (1953) 64.

[16] Helfrich W., Schneider W.G., *Recombination Radiation in Anthracene Crystals*, Phys. Rev. Lett., 14, (1965) 229.

[17] Jayanta Bauri, Ram Bilash Choudhary and Gobind Mandal, *Recent advances in efficient emissive materials-based OLED applications: a review*, J. Mater. Sci., 56, (2021), 18837–18866.

[18] Danel, A.; Wojtasik, K.; Szlachcic, P.; Gryl, M.; Stadnicka, K., *A new regioselective synthesis method of 1*H*-pyrazolo[3,4-*b*]quinoxalines – Potential materials for organic optoelectronic devices, and a revision of an old scheme*. Tetrahedron, 73, nr 34, (2017), 5072–5081, DOI: 10.1016/j.tet.2017.06.061.

[19] Wojtasik, K.; Danel, A., *The Synthesis of 1*H*-Pyrazolo[3,4-*b*]quinoxaline Derivatives Oriented towards Modification of Carbocyclic Ring in the Parent Skeleton*. ChemistrySelect, 5, (2020), 5521–5525, DOI: 10.1002/slct.202000418 Table.

[20] J.P. Wolfe, H. Tomori, J.P. Sadighi, J. Yin, S.L. Buchwald, *Simple, Efficient Catalyst System for the Palladium-Catalyzed Amination of Aryl Chlorides, Bromides, and Triflates*, The Journal of Organic Chemistry, 65, nr. 4, (2000), 1158-1174.

[21] Yang, C., Zhang, J., Peng, WT. et al. *Impact of Stokes Shift on the Performance of Near-Infrared Harvesting Transparent Luminescent Solar Concentrators*. Sci Rep 8, (2018), 16359.

[22] M. Brouwer Albert, *Standards for photoluminescence quantum yield measurements in solution (IUPAC Technical Report)*, Pure and Applied Chemistry, (2011), p. 2213.

[23] Kotowicz S., Kula S., Filapek M., et al. *2,2-Dicyanovinyl derivatives - Thermal, photophysical, electrochemical and electroluminescence investigations*, Mater. Chem. Phys. 209, (2018), 249.