

Elektronika organiczna dla wybranych zastosowań w Internecie Rzeczy

Streszczenie. Artykuł przedstawia aspekty elektroniki organicznej w kontekście jej zastosowań w Internecie Rzeczy. Przedstawiono przegląd literaturowy najnowszych osiągnięć elektroniki organicznej z zakresu zastosowania w ogniwach słonecznych, wybranych detektorach, czujnikach chemicznych i biologicznych, oraz trendy rozwoju tych technologii. Analizie poddano możliwości do ich komercjalizacji oraz przedstawiono ich najsłabsze strony.

Abstract. The article presents aspects of organic electronics in the context of its applications in the Internet of Things. A literature review of the latest achievements of organic electronics in the field of application in solar cells, selected detectors, chemical and biological sensors, as well as trends in the development of these technologies are presented. Their potential for commercialization was analyzed and their weaknesses were presented. (**Organic electronics for selected applications in the Internet of Things**).

Słowa kluczowe: elektronika organiczna, Internet Rzeczy, czujniki, organiczne ogniwa słoneczne.

Keywords: organic electronics, Internet of Things, sensors, organic solar cells.

Wstęp

Elektronika organiczna jest stosunkowo młodą dziedziną zajmującą się aspektami materiałowymi, w tym projektowaniem, syntezą, charakteryzacją i zastosowaniem cząsteczek organicznych lub polimerów, które wykazują przewodnictwo elektryczne. Podstawa efektu przewodnictwa opiera się na występowaniu wiązań wielokrotnych, głównie węgiel-węgiel oraz innych atomów zawierających wolne pary elektronowe, które, oddziałując ze sobą, tworzą układy sprzężone. Ogromną zaletą małowcząsteczkowych i polimerowych układów organicznych jest ich rozpuszczalność w różnych rozpuszczalnikach, możliwość wytwarzania warstw w niskich temperaturach, wytwarzanie na dużych powierzchniach, z wykorzystaniem niedrogich procesów, np. druku typu „roll-to-roll”. Zalety te sprawiają, że przewodniki i półprzewodniki organiczne są idealnymi kandydatami do opracowania nowatorskich rozwiązań z zakresu opto- i mikroelektronicznych oraz systemów czujnikowych, których skalowalność z próbek laboratoryjnych do przemysłowych będzie ułatwiona [1].

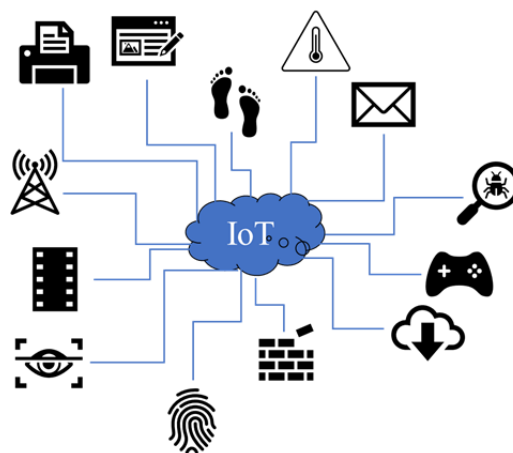
Pierwsze prace dotyczące sprzężonych układów aromatycznych opublikowano w 1862 roku, w którym Henry Letheby przeprowadził elektrochemiczną syntezę polianiliny. Dopiero w latach 60 XX wieku szczegółowo opisano efekt przewodnictwa elektrycznego w tego typu związkach [2]. Kolejnym istotnym odkryciem była synteza oraz zbadanie zdolności przewodzących poliacytenu opisanych przez Shirakawę, MacDiarmida i Heegera w 1977 roku, za co w 2000 roku odkrywcy otrzymali Nagrodę Nobla w dziedzinie chemia [3-5].

Obecny i przyszły trend rozwoju technologii elektroniki organicznej związany jest bezpośrednio z Internetem Rzeczy (ang. *Internet of Things*, *IoT*), a zatem z kompleksowymi rozwiązaniami (urządzeniami), które wyposażone są w szereg czujników, oraz elementami dającymi możliwość przetwarzania informacji, oprogramowaniem i innymi technologiami, zdolnych do tworzenia sieci i zdolnymi do wymiany danych z innymi urządzeniami i systemami przez Internet lub inne sieci komunikacyjne (Rys. 1). W niniejszym opracowaniu przedstawione zostaną najważniejsze zalety użycia elektroniki organicznej w ogniwach słonecznych, wybranych detektorach, czujnikach chemicznych i biologicznych, oraz trendy rozwoju tych technologii.

Elektronika organiczna w ogniwa słoneczne

Elektronika organiczna znalazła zastosowanie do budowy elementów ogniw słonecznych trzeciej i czwartej

generacji, a dzięki swojemu potencjałowi może zrewolucjonizować dziedzinę ogniw słonecznych wprowadzając ogniwa piątej generacji. W tradycyjnych ogniwach słonecznych nieorganiczne półprzewodniki, takie jak krzem, są wykorzystywane do pochłaniania światła słonecznego i przekształcania go w energię elektryczną. Jednak organiczne ogniwa słoneczne wykorzystują organiczne półprzewodniki wykonane z materiałów na bazie cząsteczek organicznych lub polimerów.



Rys. 1. Wizualizacja połączeń elementów w Internecie Rzeczy.

Organiczne ogniwa słoneczne działają na zasadzie dysocjacji ekscytonów. Kiedy światło jest pochłaniane przez materiał organiczny, powstaje ekscyton (związana para elektron-dziura). Ekscyton następnie dysocjuje na wolne ładunki, które można zebrać i przekształcić w energię elektryczną. Wydajność organicznych ogniw słonecznych stale się poprawia, a ostatnie postępy doprowadziły do sprawności konwersji energii na poziomie 21,2 % dla warstwy aktywnej zawierającej polimer D18 i pochodnej benzotiazolu CI-BTA5 przy intensywności światła 1000 lux [6].

Elektronika organiczna ma kilka zalet w porównaniu z tradycyjnymi półprzewodnikami nieorganicznymi stosowanymi w ogniwach słonecznych [7-9]. Niektóre z tych zalet obejmują (Rys. 2):

1. Tanią produkcję: Organiczne ogniwa słoneczne można wytwarzać przy użyciu technik opartych na rozwiązaniach, takich jak powlekanie obrotowe, drukowanie atramentowe i powlekanie natryskowe. Procesy te są tanie, skalowalne i mogą być wykorzystywane do produkcji

wielkopowierzchniowych ogniw słonecznych. Szacuje się, że koszt produkcji wielkopowierzchniowych organicznych ogniw słonecznych, przy założeniu sprawności ogniwa na poziomie 5%, będzie wynosił 50-141 \$/m², dając koszt mocy modułu na poziomie 1-2,83 \$/W_p. Niestety jest to nadal daleko od wartości osiągniętych przez konwencjonalne panele fotowoltaiczne, dla których koszt energii wynosi ok. 1,5-3 \$/kW_p [10].

2. **Elastyczność:** materiały organiczne są z natury elastyczne i można je osadzać na elastycznych podłożach, co czyni je bardzo atrakcyjnymi dla rozwoju lekkich, przenośnych ogniw słonecznych, które można zintegrować z urządzeniami do noszenia i innymi zastosowaniami. W przypadku niektórych elementów elektroniki organicznej możliwe jest uzyskanie wysokiej wytrzymałości na poziomie ±5% początkowych wartości przewodnictwa po 1000 cyklach zginania próbki.

3. **Wszechstronność:** Materiały organiczne można łatwo syntetyzować i modyfikować w celu spełnienia wymagań określonych zastosowań. Umożliwia to projektowanie ogniw słonecznych zoptymalizowanych pod kątem różnych długości fal światła, dzięki czemu są one bardziej wydajne.

4. **Zrównoważony rozwój:** Organiczne ogniwa słoneczne są wykonane z obfitych, nietoksycznych i przyjaznych dla środowiska materiałów, co czyni je bardziej zrównoważonymi niż nieorganiczne ogniwa słoneczne.



Rys.2. Główne zalety organicznych ogniw słonecznych.

Pomimo tych zalet, organiczne ogniwa słoneczne wciąż napotykać na szereg wyzwań, które ograniczają ich wydajność i opłacalność komercyjną. Niektóre z tych wyzwań obejmują:

1. **Niską wydajność:** Organiczne ogniwa słoneczne mają obecnie niższą wydajność konwersji energii niż tradycyjne nieorganiczne ogniwa słoneczne. Ogranicza to ich praktyczne zastosowanie w produkcji energii. Zmiana podłoża ze sztywnego na elastyczny sprawia, że najwyższa sprawność wynosi zaledwie 13,61%, dla ogniwa o powierzchni aktywnej 1 cm², natomiast zwiększenie powierzchni aktywnej powoduje gwałtowny spadek wydajności do 2,1%, przy powierzchni aktywnej równej 120 cm².

2. **Stabilność:** materiały organiczne mogą z czasem ulegać degradacji w wyniku narażenia na działanie wilgoci, tlenu i światła, co zmniejsza ich wydajność i żywotność. Utrudnia to opracowanie stabilnych, długotrwałych organicznych ogniw słonecznych. Aby zapobiec efektom degradacji stosuje się materiały do hermetyzacji, które powinny być tanie, stabilne i łatwe do osadzenia, a także charakteryzować się wysokim współczynnikiem rozpadu dielektrycznego, wysokim oporem objętościowym dla tlenu i wilgoci.

3. **Skalowalność:** nawet jeśli organiczne ogniwa słoneczne można produkować przy użyciu tanich technik opartych na szeroko stosowanych w przemyśle

rozwiązaniach, proces zwiększania skali produkcji do poziomu komercyjnego nadal stanowi wyzwanie. Dzieje się tak dlatego, że proces produkcyjny musi być zoptymalizowany pod kątem wielkopowierzchniowych ogniw słonecznych przy zachowaniu wysokiej wydajności. Stosowane są obecnie głównie cztery techniki nanoszenia warstw: wirowe (spin-coating), system dyszowy (slot die coating), listwy rozwijającej (blade coating) i druk międzywarstwowy (gravure printing). Otrzymano różne maksymalne sprawności ogniw w zależności od rozmiaru próbki: 2,52 % (P3HT:PCBM, 53 cm²), 4,2 % (PBTZT-stat-BDTP-8:PCBM, 35 cm²), 5,21 % (PTB7-Th:EH-IDTBR, 85 cm²) i 2,1% (P3HT:PCBM, 45 cm²), odpowiednio dla każdej z technik.

Pomimo tych wyzwań, trwające badania koncentrują się na rozwiązaniu tych problemów i poprawie wydajności organicznych ogniw słonecznych. Jeśli uda się przezwyciężyć te wyzwania, elektronika organiczna może zrewolucjonizować dziedzinę ogniw słonecznych i przyspieszyć przejście na bardziej zrównoważoną przyszłość energetyczną.

Elektronika organiczna w detektorach

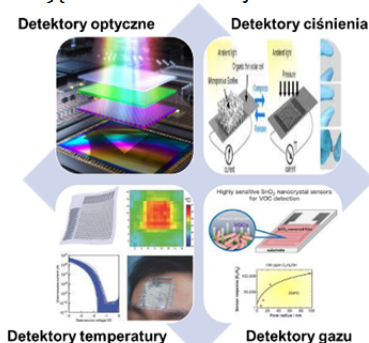
Elektronika organiczna ma również znaczny potencjał do zastosowania w detektorach. Detektory to urządzenia wykrywające i przetwarzające różnego rodzaju wielkości fizycznej (takie jak światło, temperatura, ciśnienie itp.) na sygnały elektryczne. Organiczne materiały elektroniczne są atrakcyjne do stosowania w detektorach, ponieważ oferują szereg zalet w porównaniu z tradycyjnymi materiałami nieorganicznymi, w tym [11-13]:

1. **Niski koszt:** Organiczne materiały elektroniczne można wytwarzać przy użyciu procesów opartych na rozwiązaniach, które są generalnie tańsze niż tradycyjne procesy wytwarzania półprzewodników.

2. **Elastyczność:** Materiały organiczne są zazwyczaj elastyczne i można je wytwarzać na różnych podłożach, w tym na tworzywach sztucznych i tekstyliach.

3. **Wszechstronność:** materiały organiczne można syntetyzować i modyfikować, aby reagowały na szeroki zakres bodźców, co czyni je bardzo uniwersalnymi do stosowania w różnych typach detektorów.

4. **Przestrajalność:** Właściwości organicznych materiałów elektronicznych można dostroić, dostosowując strukturę chemiczną lub warunki przetwarzania. Umożliwia to optymalizację czułości i selektywności detektorów.



Rys.3. Główne zastosowania elektroniki organicznej w detektorach.

Organiczne materiały elektroniczne zostały wykorzystane w szerokim zakresie zastosowań detektorów, w tym (Rys. 3):

1. **Czujniki optyczne:** organiczne fotodetektory były używane do wykrywania światła w wielu zastosowaniach, w tym w obrazowaniu, wykrywaniu i komunikacji. Czujniki optoelektryczne bazujące na organicznych fotodetektorach zdolne są uzyskać dużą prędkość zmian, jako szybkie przełączniki, powyżej 1000 powtórzeń na sekundę i

wartości granicznej – 3 dB dla częstotliwości powyżej 100 kHz dla komunikacji dla dwóch kanałów [14].

2. Czujniki gazu: Materiały organiczne można opracować tak, aby selektywnie wykrywały gazy, takie jak CO₂, NO_x i lotne związki organiczne, dzięki czemu są przydatne do monitorowania jakości powietrza i kontroli zanieczyszczeń. Wysokiej jakości czujniki gazu bazujące na organicznym tranzystorze polowym (ang. *organic field-effect transistor*, OFET) wykorzystują efekt rozpoznania molekularnego. Wykorzystując unikalne zdolności inkluzyjne cząsteczek czujnika w zakresie rozpoznawania molekularnego typu gospodarz-gość, można skonstruować czujniki o wysokiej czułości, selektywności i szybkiej reakcji, a także zdolne do rozróżniania kształtu [15].

3. Czujniki ciśnienia: Materiały organiczne można zaprojektować tak, aby reagowały na bodźce mechaniczne, co czyni je przydatnymi do zastosowań związanych z wykrywaniem ciśnienia. Wysokowydajny czujnik bazujący na warstwie dielektrycznej gliceryny/chitozanu z mikrowypustkami oraz dwóch miedzianych elektrodach z nanodrutu/chitozanu, uzyskuje się doskonałą wydajność, z czułością 1,7 kPa⁻¹ oraz szybkim czasem reakcji (180 ms) i dobrą powtarzalnością [16].

4. Czujniki temperatury: Organiczne materiały termoelektryczne mogą być wykorzystywane do wykrywania zmian temperatury, dzięki czemu są przydatne do monitorowania i kontrolowania temperatury. Wykorzystać można zmianę właściwości emisyjnych dowolnego krysztalu, np. (E)-1-(3,5-bis(trifluoromethyl)phenyl)-3-(1-ethyl-1H-indol-3-yl)prop-2-en-1-one, którego widma fluorescencji pokazują zmianę koloru, spowodowaną przesunięciem maksimum emisji ku czerwieni po ochłodzeniu z 277K do 77 K przy zachowaniu liniowej charakterystyki podczas zmiany [17].

Istnieje jednak kilka wyzwań, które muszą zostać pokonane zanim będzie można wykorzystać w całości potencjał organicznej elektroniki w detektorach. Kluczowymi aspektami są: poprawa konstrukcji detektorów pod względem wydajności i stabilności stosowanych materiałów oraz ich integracji w celu wytworzenia optymalnej konstrukcji. Obecnie prowadzone prace skupiają się na znalezieniu rozwiązań dających możliwość komercjalizacji rozwiązań bazujących na elektronice organicznej.

Elektronika organiczna w czujnikach chemicznych i biologicznych

Elektronika organiczna ma znaczny potencjał do wykorzystania w czujnikach chemicznych i biologicznych. Czujniki te służą do wykrywania określonych cząsteczek lub gatunków biologicznych w różnych próbkach, w tym w powietrzu, wodzie i płynach biologicznych. Organiczne materiały elektroniczne mają kilka zalet w zastosowaniach w czujnikach chemicznych i biologicznych, w tym [18, 19]:

1. Selektywność: Materiały organiczne można tak zaprojektować, aby selektywnie wiązały się z określonymi cząsteczkami lub gatunkami biologicznymi, co czyni je wysoce selektywnymi do wykrywania.

2. Czułość: Materiały organiczne można zaprojektować tak, aby wykazywały wysoką czułość na małe stężenia cząsteczek docelowych lub gatunków biologicznych, dzięki czemu nadają się do wykrywania w próbkach o niskim stężeniu.

3. Szybkość: Czujniki organiczne mogą zapewniać szybki czas reakcji, umożliwiając monitorowanie i analizę próbek chemicznych lub biologicznych w czasie rzeczywistym.

4. Elastyczność: czujniki organiczne można wytwarzać na elastycznych podłożach, co umożliwia im dostosowanie

się do różnych kształtów i rozmiarów w celu integracji z różnymi zastosowaniami.

5. Niski koszt: czujniki organiczne można wytwarzać przy użyciu procesów opartych na rozwiązaniach, które są zwykle tańsze niż tradycyjne procesy wytwarzania półprzewodników.

Organiczne materiały elektroniczne były wykorzystywane w różnych zastosowaniach czujników chemicznych i biologicznych, w tym (Rys. 4):

1. Biosensory: Materiały organiczne mogą być wykorzystywane jako elementy czujnikowe w biosensorych, które wykrywają cząsteczki biologiczne, takie jak białka, kwasy nukleinowe i enzymy, w próbkach biologicznych. Czujniki mogą wykorzystywać np. drobne zmiany naprężeń elektrod lub temperatury w urządzeniu przyklejonym do skóry człowieka. Naprężenia i zmiana temperatury wywołują efekt generowania energii elektrycznej z dużą czułością: (~3 μW/m² przy ΔT ~ 92 K) i sile mechanicznej (~31 μW/cm² przy 30N) [18].

2. Czujniki pH: Materiały organiczne można zaprojektować tak, aby reagowały na zmiany pH, dzięki czemu są przydatne do monitorowania kwasowości lub zasadowości roztworów. Urządzenie bazujące na poli(3-heksyltiofen-2,5-diyl) (P3HT) jako bramce dielektrycznej w organicznym cienkowarstwowym tranzystorze z konfiguracją typu bottom-contact top-gated wykazał pracę przy napięciu 1 V w zakresie pH 3-12 z czułością na zmianę natężenia prądu (1,2 μA/pH) i napięcia (53 mV/pH) z szybkością rzędu kilku milisekund [20].

3. Czujniki elektrochemiczne: Materiały organiczne mogą być stosowane w czujnikach elektrochemicznych, które wykrywają określone cząsteczki na podstawie ich właściwości elektrochemicznych. Kombinowany układ elektrod w układzie Au/(Ag/AgCl)/PEDOT:PSS, odpowiednio jako pracująca elektroda, elektroda referencyjna i przeciwelektroda w układzie organicznego tranzystora elektrochemicznego sensora typu electrochemical aptamer-based umożliwia wykonanie pomiarów elektrochemicznych dla próbek biologicznych zwiększając 3-4 krotnie czułość pomiarów z układem pomiarowym bez układu elektrod (292 μA/dec w porównaniu z 85 nA/dec) [21].

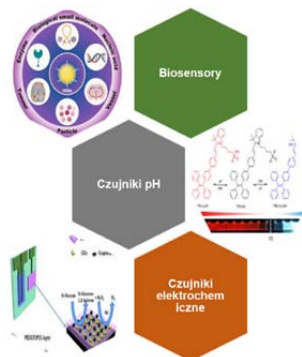
Chociaż organiczne materiały elektroniczne oferują znaczny potencjał do wykorzystania w czujnikach chemicznych i biologicznych, istnieje również kilka wyzwań, którymi należy się zająć. Wyzwania te obejmują poprawę stabilności i odtwarzalności czujników organicznych, optymalizację konstrukcji czujników organicznych oraz poprawę ich wydajności w złożonych matrycach próbek. Niemniej jednak trwające badania koncentrują się na sprostaniu tym wyzwaniom i uwolnieniu pełnego potencjału elektroniki organicznej w zastosowaniach związanych z czujnikami chemicznymi i biologicznymi.

Trendy rozwoju elektroniki organicznej w kontekście Internetu Rzeczy

Elektronika organiczna ma potencjał, aby umożliwić szeroki zakres nowych zastosowań IoT, w tym inteligentne budynki, inteligentne miasta i połączoną opiekę zdrowotną. Jedną z kluczowych zalet elektroniki organicznej jest ich elastyczność, która pozwala na integrację z szeroką gamą obudów i aplikacji. Na przykład czujniki organiczne można zintegrować z odzieżą lub innymi urządzeniami do noszenia w celu monitorowania różnych parametrów zdrowotnych, takich jak tętno i ciśnienie krwi, oraz wysyłania danych do smartfonu lub innego urządzenia IoT.

Innym potencjalnym zastosowaniem elektroniki organicznej w IoT są inteligentne urządzenia domowe. Czujniki organiczne mogą być używane do wykrywania

zmian temperatury, wilgotności i innych parametrów środowiskowych, umożliwiając automatyczną regulację systemów ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji (HVAC). Organiczne diody elektroluminescencyjne (OLED) mogą być również wykorzystywane do produkcji elastycznych wyświetlaczy o niskim poborze mocy do inteligentnych urządzeń domowych, takich jak termostaty i elementy sterujące oświetleniem.



Rys.4. Główne zastosowania elektroniki organicznej w czujnikach biologicznych i chemicznych.

Oprócz niskich kosztów i elastyczności, organiczna elektronika może również oferować możliwości o wysokiej wydajności. Na przykład organiczne ogniwa fotowoltaiczne (OPV) mogą oferować wysoką wydajność konwersji energii i mogą być produkowane przy użyciu tanich technik przetwarzania typu „roll-to-roll”. To czyni je obiecującym kandydatem do zastosowania w urządzeniach IoT o niskim poborze mocy, które wykorzystują energię słoneczną do zasilania.

Podobnie jak w przypadku każdej nowej technologii, istnieją również wyzwania, którym należy sprostać, aby w pełni wykorzystać potencjał elektroniki organicznej w IoT. Jednym z głównych wyzwań jest stabilność i niezawodność materiałów organicznych, na które mogą wpływać czynniki środowiskowe, takie jak wilgotność i temperatura. Bieżące badania koncentrują się na poprawie stabilności i niezawodności materiałów organicznych, a także opracowywaniu nowych materiałów o ulepszonych właściwościach użytkowych.

Ogólnie oczekuje się, że elektronika organiczna będzie odgrywać znaczącą rolę w rozwoju IoT w nadchodzących latach. Oczekuje się, że postępy w syntezie materiałów, wytwarzaniu urządzeń i technikach integracji doprowadzą do rozwoju bardziej zaawansowanych i wydajnych urządzeń IoT opartych na produktach organicznych, otwierając nowe możliwości dla połączonych urządzeń i aplikacji.

Autorzy: dr Krzysztof A. BOGDANOWICZ, Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, e-mail: bogdanowicz@witi.wroc.pl, prof. dr hab. Agnieszka IWAN, Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, e-mail: iwan@witi.wroc.pl, mgr inż. Wojciech PRZYBYŁ, Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, e-mail: przybyl@witi.wroc.pl; mgr inż. Cezary ŚLIWIŃSKI, Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, e-mail: sliwinski.c@witi.wroc.pl.

LITERATURA

[1] Basiricò L., Mattana G., Mas-Torrent M. Editorial: Organic Electronics: Future Trends in Materials, Fabrication Techniques and Applications. *Front. Phys.* 2022, 10, 888155. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.888155>

[2] Rasmussen, S.C. The Early History of Polyaniline: Discovery and Origins. *Substantia*. 2017, 1 (2). <https://doi.org/10.13128/Substantia-30>

[3] Chiang C.K., Fincher C.R., Park Y.W., Heeger A.J., Shirakawa H., Louis E.J., et al. Electrical Conductivity in Doped Polyacetylene. *Phys Rev Lett*, 1977, 39 (17), 1098–101. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.39.1098>

[4] Chiang C.K., Park Y.W., Heeger A.J., Shirakawa H., Louis E.J., MacDiarmid A.G. Conducting Polymers: Halogen Doped Polyacetylene. *J Chem Phys*, 1978, 69 (11), 5098–104. <https://doi.org/10.1063/1.436503>

[5] Shirakawa H., Louis E.J., MacDiarmid A.G., Chiang C.K., Heeger A.J. Synthesis of Electrically Conducting Organic Polymers: Halogen Derivatives of Polyacetylene, (CH) X. *J Chem Soc Chem Commun*, 1977, 16, 578–80. <https://doi.org/10.1039/c39770000578>

[6] Wang Z., Tang A., Wang H., Guo Q., Guo Q., Sun X., Xiao., Ding L., Zhou E. Organic photovoltaic cells offer ultrahigh VOC of ~ 1.2 V under AM 1.5G light and a high efficiency of 21.2 % under indoor light. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 451 (4), 139080. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139080>

[7] Yang, F., Huang, Y., Li, Y. et al. Large-area flexible organic solar cells. *npj Flex Electron*, 2021, 5, 30. <https://doi.org/10.1038/s41528-021-00128-6>

[8] Choi, H.W., Shin, D.W., Yang, J. et al. Smart textile lighting/display system with multifunctional fibre devices for large scale smart home and IoT applications. *Nat Commun*, 2022, 13, 814. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28459-6>

[9] Kalowekamo J., Baker E. Estimating the manufacturing cost of purely organic solar cells. *Solar Energy*, 2009, 83 (8), 1224–1231. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.02.003>

[10] Bartnik R., Hnydiuk-Stefan A. Analiza ekonomiczna jednostkowych kosztów produkcji elektryczności w różnych technologiach jej wytwarzania. *Energetyka*, 2016, 5, 257–263.

[11] Forrest, Stephen R., 'Introduction to organic electronics', *Organic Electronics: Foundations to Applications* (Oxford, 2020; online edn, Oxford Academic, 22 Oct. 2020), <https://doi.org/10.1093/oso/9780198529729.003.0001>,

[12] Calvi, S., Basiricò, L., Carturan, S.M. et al. Flexible fully organic indirect detector for megaelectronvolts proton beams. *npj Flex Electron*, 2023, 7, 5. <https://doi.org/10.1038/s41528-022-00229-w>

[13] Song M., Seo J., Kim H., Kim Y. Flexible Thermal Sensors Based on Organic Field-Effect Transistors with Polymeric Channel/Gate-Insulating and Light-Blocking Layers. *ACS Omega*, 2017, 2 (7), 4065–4070. <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b00494>

[14] Lan, Z., Lau, Y. S., Cai, L., Han, J., Suen, C. W., Zhu, F., Dual-Band Organic Photodetectors for Dual-Channel Optical Communications. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16, 2100602. <https://doi.org/10.1002/lpor.202100602>

[15] Zhang C., Chen P., Hu, W. Organic field-effect transistor-based gas sensors. *Chem. Soc. Rev.*, 2015, 44, 2087–2107. <https://doi.org/10.1039/C4CS00326H>

[16] Song Z., Liu Z., Zhao L., Chang C., An W., Zheng H., Yu S. Biodegradable and flexible capacitive pressure sensor for electronic skins. *Organic Electronics*, 2022, 106, 106539, <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2022.106539>

[17] Di, Q., Li, L., Miao, X. et al. Fluorescence-based thermal sensing with elastic organic crystals. *Nat Commun*, 2022, 13, 5280. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32894-w>

[18] Ghosh S.K., Sinha T.K., Xie M., Bowen C.R., Garain S., Mahanty B., Roy K., Henkel K., Dieter Schmeißer, Jin Kuk Kim, and Dipankar Mandal. Temperature-Pressure Hybrid Sensing All-Organic Stretchable Energy Harvester. *ACS Appl. Electron. Mater.* 2021, 3, 248–259. <https://dx.doi.org/10.1021/acsaelm.0c00816>

[19] Tamura, T., Maeda, Y., Sekine, M., Yoshida, M. Wearable Photoplethysmographic Sensors—Past and Present. *Electronics* 2014, 3, 282–302. <https://doi.org/10.3390/electronics3020282>

[20] Sagar S., Das B.C. Highly-sensitive full-scale organic pH sensor using thin-film transistor topology. *Organic Electronics*, 2022, 111, 106654. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2022.106654>

[21] Ji, X., Lin, X. & Rivnay, J. Organic electrochemical transistors as on-site signal amplifiers for electrochemical aptamer-based sensing. *Nat Commun*, 2023, 14, 1665. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37402-2>