



Wrocław University
of Science and Technology

PODSUMOWANIE OSIĄGNIĘĆ ZAWODOWYCH

*(Sporządzone na potrzeby postępowania o nadanie stopnia naukowego doktora
habilitowanego)*

**Od inżynierii heterozłączy do elastycznych modułów i
architektur wielozłączywych: strategie rozwoju dla skalowalnej
fotowoltaiki perowskitowej**

Dr Konrad Wojciechowski

2026

Wydział Podstawowych
Problemów Techniki



Spis treści

1. DANE PERSONALNE	2
2. POSIADANE DYPLOMY I STOPNIE NAUKOWE	2
3. INFORMACJE O POPRZEDNIM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH	2
4. OMÓWIENIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO	3
4.1. TYTUŁ OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO	3
4.2. WYKAZ PUBLIKACJI WCHODZĄCYCH W SKŁAD OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO	3
4.3. SZCZEGÓŁOWY OPIS: CEL, NAJWAŻNIEJSZE WYNIKI I ZNACZENIE DLA DYSCYPLINY	5
4.3.1. Wprowadzenie	5
4.3.2. Niskotemperaturowe przetwarzanie i inżynieria interfejsów na heterozłączu n-typu	7
4.3.2.1. Przetwarzanie perowskitowych ogniw słonecznych poniżej 150 °C [H1]	7
4.3.2.2. Modyfikacja heterozłącza C60-SAM [H2]	8
4.3.3. Fulerenowe selektywne kontakty elektronowe dla ogniw słonecznych na bazie perowskitu	10
4.3.3.1. C60 przetwarzany z roztworu jako n-typowa warstwa zwarta [H3]	10
4.3.3.2. Usieciowalne pochodne fulerenów dla architektury n-i-p [H4]	12
4.3.3.3. PCBC6: Nowa pochodna fulerenu dla elastycznych urządzeń p-i-n [H5]	14
4.3.4. Inżynieria architektury urządzenia: elektrody węglowe, przezroczyste kontakty i skalowalne osadzanie16	16
4.3.4.1. Elektrody węglowe tylnego kontaktu dla stabilnych elastycznych ogniw [H6]	16
4.3.4.2. Przezroczyste elektrody przewodzące dla urządzeń półprzezroczystych [H7]	18
4.3.4.3. Drukowanie atramentowe z ekologicznymi rozpuszczalnikami dla skalowalnej produkcji [H8]	20
4.3.5. Inżynieria stabilności: modyfikacja interfejsu i hermetyzacja	23
4.3.5.1. Modyfikacja zakrytego interfejsu obszernymi kationami organicznymi [H9]	23
4.3.5.2. Protokół hermetyzacji elastycznych perowskitowych ogniw słonecznych [H10]	26
4.3.6. Elastyczna pełnoperowskitowa fotowoltaika tandemowa	28
4.3.6.1. Skalowanie cztero-terminalowego pełnoperowskitowego modułu tandemowego [H11]	28
4.3.6.2. Inżynieria składu i interfejsów elastycznych perowskitów o szerokiej przerwie energetycznej [H12]	30
4.3.7. Podsumowanie	33
4.3.8. Piśmiennictwo	34
5. INFORMACJE O ISTOTNEJ AKTYWNOŚCI NAUKOWEJ REALIZOWANEJ W WIĘCEJ NIŻ JEDNEJ UCZELNI LUB JEDNOSTCE NAUKOWEJ, W SZCZEGÓLNOŚCI ZAGRANICZNEJ	36
5.1. DŁUGOOKRESOWE POBYTY W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH	36
5.2. WSPÓŁPRACA MIĘDZYNARODOWA	36
6. INFORMACJE O OSIĄGNIĘCIACH DYDAKTYCZNYCH, ORGANIZACYJNYCH I POPULARYZATORSKICH ..	38
6.1. DZIAŁALNOŚĆ DYDAKTYCZNA	38
6.2. OPIEKA PROMOTORSKA NAD DOKTORANTAMI	39
6.3. DZIAŁALNOŚĆ ORGANIZACYJNA	39
7. INNE INFORMACJE	40
7.1. NAGRODY I WYRÓŻNIENIA PRZEMYSŁOWE	40
7.2. ROLE REDAKCYJNE I DORADCZE	40
7.3. ZAŁOŻENIE SPÓŁKI CHEMINI	41
7.4. TABELA PODSUMOWUJĄCA WKŁAD AUTORA	41

1. Dane personalne

Imię i Nazwisko: Konrad Wojciechowski
Data urodzenia: 11.12.1985
Kontakt: konrad.wojciechowski@pwr.edu.pl
Aktualna afiliacja: Politechnika Wrocławska,
Wydział Podstawowych Problemów Techniki

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

Paź 2012 – Lut 2016

Uniwersytet Oksfordzki, Oksford, Wielka Brytania
Doktorat z fizyki materii skondensowanej
Rozprawa doktorska: "Electron Selective Contact in Perovskite Solar Cells"
Promotor: Prof. Henry J. Snaith

Paź 2004 – Cze 2009

Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska
Magister chemii (specjalizacja: fotochemia i spektroskopia)
Praca magisterska: "Photosensitization of Wide Bandgap Semiconductors with π -Electron Compounds"
Promotor: Prof. Konrad Szaciłowski

Sty 2008 – Cze 2008

Uniwersytet Lund, Lund, Szwecja
Magister chemii
Praca magisterska: "Photoinduced Dynamics of Electron Injection and Charge Recombination in TiO₂ Nanocrystalline Films Sensitised by New Organic Sensitisers"
Promotor: Prof. Arkady Yartsev

3. Informacje o poprzednim zatrudnieniu w jednostkach naukowych

Lis 2025 – obecnie

Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska
Kierownik projektu / Adiunkt badawczy
Kierownik projektu grantu NCN (Narodowe Centrum Nauki).

Aug 2025 – obecnie

Chemini sp. z o.o., Wrocław, Polska
Współzałożyciel
Współzałożyciel firmy z obszaru deep-tech, która koncentruje się na opracowywaniu nanomateriałów dla fotowoltaiki nowej generacji.

Lut 2016 – Cze 2025

Saule Technologies, Wrocław, Polska
Dyrektor Naukowy
Opracowanie i realizacja długoterminowej strategii badawczo-rozwojowej dla technologii fotowoltaiki perowskitowej. Kierowanie wszystkimi działaniami w obszarze badań i rozwoju. Budowa i prowadzenie wielodyscyplinarnego zespołu liczącego ponad 30 badaczy i inżynierów. Bezpośredni nadzór nad 6 doktorantami, z czego 5 pomyślnie obroniło tytuł doktorski. Pozyskanie portfela finansowania badań o wartości przekraczającej 10 milionów euro z instytucji unijnych (Horizon Europe, H2020) oraz polskich (NCBR, NCN, FNP) i zarządzanie tymi grantami. Budowa i zarządzanie portfelem własności intelektualnej obejmującym ponad 50 zgłoszeń patentowych, będąc współtwórcą 9 międzynarodowych rodzin patentów. Opracowanie i wdrożenie naukowych fundamentów Fundacji Saule Research Institute.

Sie 2010 – Sie 2012

Conductive Inkjet Technology Ltd., Cambridge, Wielka Brytania

Naukowiec ds. materiałów

Badania i rozwój funkcjonalnych formułacji atramentowych do optoelektroniki i drukowanej elektroniki, w tym bezprądowego osadzania miedzi dla przezroczystych warstw przewodzących.

4. Omówienie osiągnięcia naukowego

(określonego w art. 219 ust. 1 pkt 2 Ustawy)

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Od inżynierii heterozłączy do elastycznych modułów i architektur wielozłączowych: strategie rozwoju dla skalowalnej fotowoltaiki perowskitowej

4.2. Wykaz publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

[H1] K. Wojciechowski, M. Saliba, T. Leijtens, A. Abate, H.J. Snaith. *Sub-150 °C Processed Meso-Structured Perovskite Solar Cells with Enhanced Efficiency*. Energy Environ. Sci. **2014**, 7, 1142.

Rola: Pierwszy autor

[H2] K. Wojciechowski, S.D. Stranks, A. Abate, G. Sadoughi, A. Sadhanala, N. Kopidakis, G. Rumbles, C.-Z. Li, R.H. Friend, A.K.-Y. Jen, H.J. Snaith. *Heterojunction Modification for Highly Efficient Organic-Inorganic Perovskite Solar Cells*. ACS Nano **2014**, 8 (12), 12701–12709.

Rola: Pierwszy autor

[H3] K. Wojciechowski, T. Leijtens, S. Siprova, C. Schlueter, M.T. Hörlantner, J.T.-W. Wang, C.-Z. Li, A.K.-Y. Jen, T.-L. Lee, H.J. Snaith. *C60 as an Efficient n-Type Compact Layer in Perovskite Solar Cells*. J. Phys. Chem. Lett. **2015**, 6 (12), 2399–2405.

Rola: Pierwszy autor

[H4] K. Wojciechowski, I. Ramirez, T. Gorisse, O. Dautel, R. Dasari, N. Sakai, J.M. Hardigree, S. Song, S. Marder, M. Riede, G. Wantz, H.J. Snaith. *Cross-Linkable Fullerene Derivatives for Solution-Processed n-i-p Perovskite Solar Cells*. ACS Energy Lett. **2016**, 1 (4), 648–653.

Rola: Pierwszy autor

[H5] T. Ahmad, B. Wilk, E. Radicchi, R. Fuentes Pineda, P. Spinelli, J. Herterich, L.A. Castriotta, S. Dasgupta, E. Mosconi, F. De Angelis, M. Kohlstädt, U. Würfel, A. Di Carlo, K. Wojciechowski. *New Fullerene Derivative as an n-Type Material for Highly Efficient, Flexible Perovskite Solar Cells of a p-i-n Configuration*. Adv. Funct. Mater. **2020**, 30, 2004357.

Rola: Kierownik projektu/autor korespondencyjny

[H6] V. Babu, R. Fuentes Pineda, T. Ahmad, A.O. Alvarez, L.A. Castriotta, A. Di Carlo, F. Fabregat-Santiago, K. Wojciechowski. *Improved Stability of Inverted and Flexible Perovskite Solar Cells with Carbon Electrode*. ACS Appl. Energy Mater. **2020**, 3 (6), 5126–5134.

Rola: Kierownik projektu/autor korespondencyjny

[H7] P. Spinelli, R. Fuentes Pineda, M. Ścigaj, T. Ahmad, K. Wojciechowski. *Transparent Conductive Electrodes Based on Co-Sputtered Ultra-Thin Metal Layers for Semi-Transparent Perovskite Solar Cells*. Appl. Phys. Lett. **2021**, 118 (24), 241110.

Rola: Kierownik projektu/autor korespondencyjny

- [H8] B. Wilk, S. Öz, E. Radicchi, F. Ünlü, T. Ahmad, A.P. Herman, F. Nunzi, S. Mathur, R. Kudrawiec, **K. Wojciechowski**. *Green Solvent-Based Perovskite Precursor Development for Ink-Jet Printed Flexible Solar Cells*. ACS Sustainable Chem. Eng. **2021**, 9 (10), 3920–3930.
Rola: Kierownik projektu/autor korespondencyjny
- [H9] S. Dasgupta, W. Żuraw, T. Ahmad, L.A. Castriotta, E. Radicchi, W. Mróz, M. Ścigaj, Ł. Pawlaczyk, M. Tamulewicz-Szwajkowska, M. Trzeciński, J. Serafińczuk, E. Mosconi, A. Di Carlo, F. De Angelis, A. Dudkowiak, **K. Wojciechowski**. *Modification of a Buried Interface with Bulky Organic Cations for Highly Stable Flexible Perovskite Solar Cells*. ACS Appl. Energy Mater. **2022**, 5 (12), 15114–15124.
Rola: Kierownik projektu/autor korespondencyjny
- [H10] T. Ahmad, S. Dasgupta, S. Almosni, A. Dudkowiak, **K. Wojciechowski**. *Encapsulation Protocol for Flexible Perovskite Solar Cells Enabling Stability in Accelerated Aging Tests*. Energy Environ. Mater. **2022**, 6 (5), e12434.
Rola: Kierownik projektu/autor korespondencyjny
- [H11] V. Babu, M.A. Mejía Escobar, R. Fuentes Pineda, M. Ścigaj, P. Spinelli, **K. Wojciechowski**. *Towards Up-Scaling the 4-Terminal All-Perovskite Tandem Solar Modules on Flexible Substrates*. Materials Energy Today **2022**, 28, 101073.
Rola: Kierownik projektu/autor korespondencyjny
- [H12] A. Wąsiak-Maciejak, Ł. Przypis, W. Żuraw, K. Rycek, P. Janicka, M. Ścigaj, K. Dyk, H. Lai, A. Piejko, D. Pucicki, F. Fu, V. Kinzhybalo, **K. Wojciechowski**. *Compositional and Interfacial Engineering for Improved Light Stability of Flexible Wide-Bandgap Perovskite Solar Cells*. J. Mater. Chem. A **2025**, 13, 7335–7346.
Rola: Kierownik projektu/autor korespondencyjny

4.3. Szczegółowy opis: cel, najważniejsze wyniki i znaczenie dla dyscypliny

4.3.1. Wprowadzenie

Globalna transformacja energetyczna w kierunku systemów energetycznych neutralnych pod względem emisji dwutlenku węgla wymaga technologii fotowoltaicznych (PV) łączących wysoką sprawność konwersji energii (PCE) z niskim kosztem produkcji, elastycznością mechaniczną i kompatybilnością z różnorodnymi formatami ogniw. Krystaliczny krzem (c-Si) dominuje na obecnym rynku PV ze sprawnościami modułów przekraczającymi 24%, jednak jego sztywna architektura oparta na płytkach krzemowych, wymagających energochłonnych procesów technologicznych w wysokich temperaturach ($>900\text{ }^{\circ}\text{C}$), oraz fundamentalne ograniczenie sprawności wynikające z konstrukcji jednozłączowej hamują przyszłe zastosowania w takich obszarach jak fotowoltaika zintegrowana z budownictwem (BIPV), elektronika przenośna, przemysł lotniczy i internet rzeczy (IoT).

Perowskity halogenkowo-metaliczne o ogólnym wzorze ABX_3 (gdzie A to jednowartościowy kation, taki jak CH_3NH_3^+ , $\text{HC}(\text{NH}_2)_2^+$ lub Cs^+ ; B to Pb^{2+} lub Sn^{2+} ; a X to I^- , Br^- lub Cl^-) stały się najbardziej obiecującą klasą materiałów PV nowej generacji. Od przełomowej pracy Kojimy i współpracowników, w której wykazano, że perowskity halogenkowo-metaliczne mogą pełnić funkcję sensybilizatorów światła widzialnego w ogniwach słonecznych ze sprawnością PCE na poziomie 3,8%,¹ dziedzina ta rozwinęła się w bezprecedensowym tempie. Lee i współpracownicy opisali pierwsze stałofazowe ogniwo perowskitowe o strukturze mezo-superstrukturalnej osiągające PCE na poziomie 10,9% w 2012 roku.² Certyfikowana sprawność ogniw jednozłączowych przekracza obecnie 27%,³ podczas gdy monolityczne ogniwa tandemowe perowskit/krzem osiągnęły 35,0%,³ oficjalnie przekraczając limit Shockleya-Queissera dla ogniw jednozłączowych i ustanawiając nowy punkt odniesienia dla fotowoltaiki dwuzłączowej.

U podstaw tego gwałtownego postępu leży kilka fundamentalnych właściwości. Perowskity wykazują bardzo wysoki współczynnik absorpcji optycznej ($>10^4\text{ cm}^{-1}$ w zakresie widzialnym), co umożliwia wydajne pochłanianie światła w warstwach o grubości poniżej 500 nm.⁴ Stranks i współpracownicy wykazali, że drogi dyfuzji elektronów i dziur przekraczają 1 μm w perowskitach o mieszanym składzie halogenkowym,⁵ a zrównoważony ambipolarny transport ładunku został niezależnie potwierdzony przez Xinga i współpracowników.⁶ Ostra krawędź absorpcji optycznej, wskazująca na niską energię Urbacha, w połączeniu z niezwykle dla półprzewodników osadzanych z roztworu tolerancją na defekty, przekładają się łącznie na wysokie napięcia obwodu otwartego, zbliżające się do radiacyjnego limitu Shockleya-Queissera.^{7,8} Co istotne, elastyczność składu pozwala na dostrajanie optycznej przerwy energetycznej od około 1,2 eV (kompozycje mieszane Sn-Pb) do ponad 2,3 eV (kompozycje bogate w Cl), dzięki czemu perowskity idealnie nadają się do architektur wielozłączowych, w których górne ogniwo perowskitowe o szerokiej przerwie energetycznej łączy się z dolnym ogniwem o wąskiej przerwie energetycznej (perowskit, krzem lub CIGS) w celu pełniejszego zagospodarowania widma słonecznego. Poza samą sprawnością, możliwość nanoszenia absorberów perowskitowych z roztworu w temperaturach poniżej 150 $^{\circ}\text{C}$ otwiera drogę do lekkich, elastycznych mechanicznie ogniw wytwarzanych na foliach polimerowych metodami o wysokiej wydajności, takimi jak powlekanie szczelinowe, powlekanie rakłowe czy drukowanie atramentowe – technikami niedostępnymi dla konwencjonalnych, nieorganicznych technologii PV.⁹

Pomimo tego niezwykłego potencjału, trajektorię rozwoju technologii od skali laboratoryjnej do niezawodnej, skalowalnej i elastycznej fotowoltaiki perowskitowej wyznaczały trzy wzajemnie

powiązane wyzwania techniczne. Po pierwsze, granice faz między absorberem perowskitowym a warstwami selektywnymi dla ładunków (warstwą transportującą elektrony – ETL i warstwą transportującą dziury – HTL) odgrywają decydującą rolę w określaniu sprawności, efektu histerezy i długoterminowej stabilności ogniwa. Wolff i współpracownicy szczegółowo omówili jak rekombinacja niepromienista na tych granicach faz, uwarunkowana obecnością licznych defektów krystalograficznych i niekorzystnym dopasowaniem poziomów energetycznych, stanowi dominujący mechanizm strat w ogniwach najnowszej generacji.¹⁰ Ta dynamika procesów powierzchniowych jest ściśle powiązana z migracją jonów i towarzyszącą jej anomalną histerezą charakterystyki prądowo-napięciowej (J–V), która po raz pierwszy została systematycznie scharakteryzowana przez Snaitha i współpracowników.¹¹ Zjawisko histerezy znacznie skomplikowało wczesną charakteryzację ogniw i uwypukliło potrzebę opracowania wiarygodnych protokołów pomiarowych. Drugim poważnym wyzwaniem był fakt, że standardowa architektura ogniwa n-i-p, dominująca we wczesnych badaniach nad perowskitami, opierała się na TiO₂ jako warstwie transportującej elektrony, co wymagało spiekania w temperaturze powyżej 450 °C. Temperatura ta jest niekompatybilna z podłożami polimerowymi, takimi jak poli(tereftalan etylenu) (PET) lub poli(naftalan etylenu) (PEN). Zastąpienie tego etapu wysokotemperaturowego alternatywami niskotemperaturowymi, przy jednoczesnym utrzymaniu lub poprawie sprawności ekstrakcji ładunku, było warunkiem koniecznym do uzyskania elastycznych ogniw perowskitowych. Po trzecie, przejście od ogniw o małej powierzchni (zwykle <0,1 cm²) nanoszonych metodą powlekania obrotowego (spin-coating) do modułów o dużej powierzchni wytwarzanych metodami skalowalnymi wymagało rozwiązania kolejnych problemów technologicznych, takich jak: jednolite formowanie warstwy na dużych podłożach, zapewnienie niezawodnych połączeń międzyogniwowych, opracowanie protokołów hermetyzacji zapewniających długoterminową stabilność w warunkach przyspieszonego starzenia oraz zaprojektowanie architektur elektrod kompatybilnych z konfiguracjami półprzezroczystymi i tandemowymi.

Dwanaście publikacji [H1–H12] wchodzących w skład przedkładanego osiągnięcia habilitacyjnego stanowi spójną odpowiedź na te wyzwania, podsumowując program badawczy obejmujący ponad dekadę pracy naukowej (2013–2025). Prace te zostały zapoczątkowane podczas studiów doktoranckich kandydata na Uniwersytecie Oksfordzkim (DPhil: „Electron Selective Contact in Perovskite Solar Cells”, 2016, pod kierunkiem prof. Henry’ego J. Snaitha), które ustanowiły naukowe podstawy w zakresie fizyki granic faz i rozwoju niskotemperaturowych warstw ETL. W rozprawie doktorskiej wykazano możliwość niskotemperaturowego (<150 °C) formowania warstw selektywnych dla elektronów z nanocząstek TiO₂ [H1], odkryto korzystną rolę modyfikacji heterozłącza TiO₂/perowskit za pomocą samoorganizujących się monowarstw fulerenowych [H2], wykazano, że fuleren C₆₀ może w pełni zastąpić TiO₂ w funkcji zwartej warstwy typu n [H3], a także opracowano usieciowalne pochodne fulerenów do zastosowania w stabilnych architekturach nanoszonych z roztworu [H4]. Wyniki te pozwoliły sformułować nadrzędny cel badawczy, jakim stało się wytworzenie stabilnych, wysokosprawnych elastycznych ogniw słonecznych na bazie perowskitów o udokumentowanej długoterminowej sprawności. Publikacje [H5–H12] stanowią systematyczną realizację tej wizji, prowadzoną przez kolejną dekadę w ramach niezależnej działalności naukowej kandydata jako dyrektora naukowego w Saule Technologies (2016–2025), dyrektora naukowego w Saule Research Institute (2017–2025) oraz kierownika projektu na Politechnice Wrocławskiej (2025–2026).

Wskazany cykl dwunastu publikacji porusza trzy główne wątki tematyczne organizujące narrację

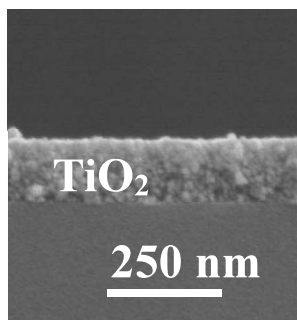
pracy. Inżynieria granic faz obejmuje postęp od wstępnego odkrycia, że modyfikacja złącza TiO_2 /perowskit za pomocą fulerenów znacząco poprawia ekstrakcję elektronów i redukuje straty wynikające z rekombinacji niepromienistej [H2], poprzez opracowanie platform ETL opartych na fulerenach dla architektur n-i-p i p-i-n [H3–H5], aż po strategię pasywacji ukrytych granic faz zwiększających stabilność elastycznych ogniw [H9] i inżynierię składu perowskitów o szerokiej przerwie energetycznej pod kątem integracji tandemowej [H12]. Drugi wątek, obejmujący technologie niskotemperaturowe, rozpoczyna się od eliminacji etapu wysokotemperaturowego spiekania TiO_2 [H1] i obejmuje rozwój materiałów ETL formowanych z roztworu w niskiej temperaturze [H3–H5], co umożliwiło przejście na elastyczne podłoża polimerowe. Trzeci wątek, dotyczący skalowalnego osadzania i inżynierii ogniw, obejmuje opracowanie alternatywnych architektur elektrod (węglowe kontakty tylne [H6], współrozpylane elektrody przezroczyste [H7]), skalowalne drukowanie atramentowe warstw perowskitowych [H8], protokoły hermetyzacji spełniające normy niezawodności IEC [H10], demonstrację elastycznego, monolitycznego ogniw tandemowego [H12] oraz integrację tych osiągnięć w czterokontaktowe moduły tandemowe (4T) pełnoperowskitowe na elastycznych podłożach [H11]. W dalszej części autoreferatu szczegółowo opisano realizację tego programu badawczego.

4.3.2. Niskotemperaturowe przetwarzanie i inżynieria interfejsów na heterozłaczach n-typu

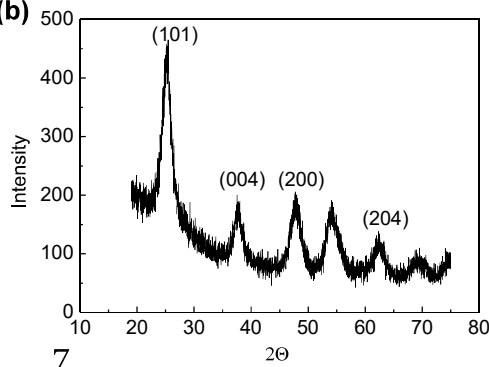
4.3.2.1. Wytwarzanie perowskitowych ogniw słonecznych poniżej 150 °C [H1]

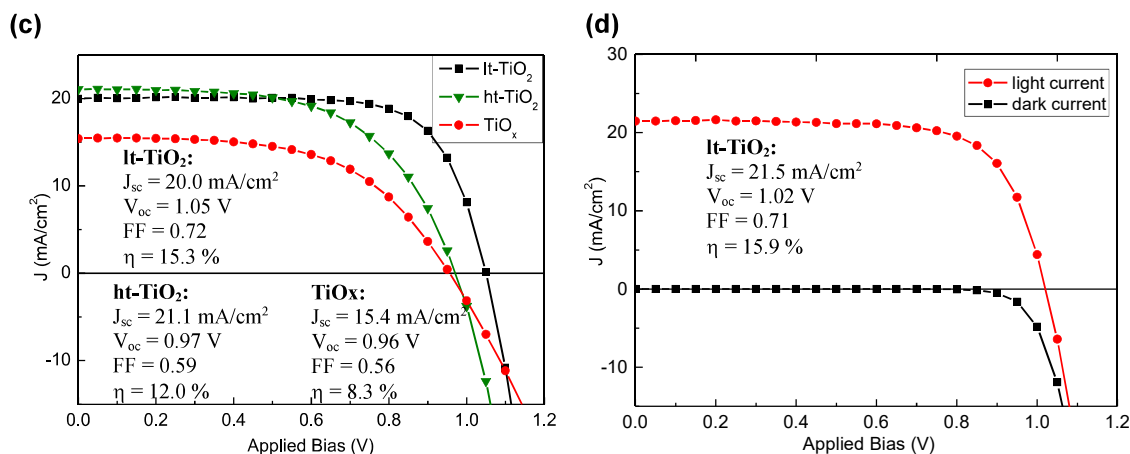
Standardowa architektura perowskitowego ogniw słonecznego, która wyłoniła się w latach 2012–2013, opierała się na zwartej warstwie selektywnej dla elektronów TiO_2 , osadzonej metodą pyrolizy natryskowej lub przez nanoszenie prekursora zol-żel techniką powlekania obrotowego, a następnie spiekaniu w temperaturze powyżej 450 °C.^{2,12} Ten etap obróbki termicznej był niezbędny do krystalizacji fazy anatazu TiO_2 i osiągnięcia odpowiedniej ruchliwości elektronów, ale fundamentalnie ograniczał stosowanie podłoży polimerowych, takich jak PET lub PEN, które ulegają degradacji w temperaturach powyżej około 150 °C. Wyeliminowanie tej bariery termicznej było warunkiem koniecznym do rozwoju elastycznych ogniw perowskitowych. W pracy [H1] konwencjonalną warstwę TiO_2 otrzymywaną metodą zol-żel zastąpiono wcześniej zsyntetyzowanymi nanocząstkami anatazu TiO_2 , nanoszonymi z dyspersji koloidalnej i przetwarzanymi w całości w temperaturze poniżej 150 °C. Dyfrakcja rentgenowska potwierdziła obecność fazy anatazu, a rozmiar kryształitów wyznaczony z równania Scherrera wynosił około 4,5 nm. Nanocząstki zdyspergowano w alkoholu zawierającym bis(acetyloacetonian) diizopropoksydu tytanu jako środek kompleksujący, a następnie naniesiono metodą powlekania obrotowego bezpośrednio jako warstwę selektywną dla elektronów, z pominięciem wysokotemperaturowego spiekania (Rysunek 1).

(a)



(b)



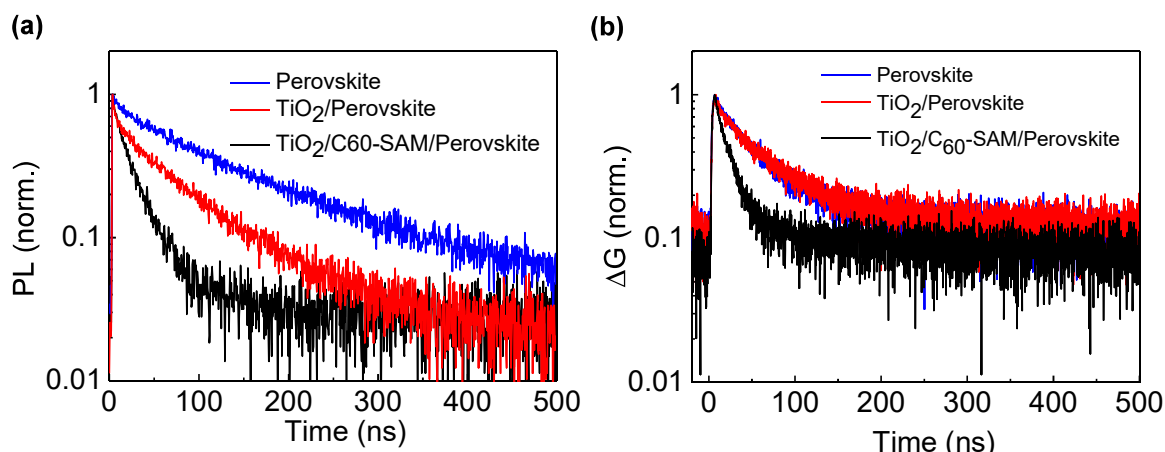


Rysunek 1. (a) Obraz SEM przekroju niskotemperaturowej, zwartej warstwy nanocząstek TiO_2 ; (b) dyfraktogram rentgenowski proszku nanocząstek TiO_2 potwierdzający obecność fazy anatazu przy rozmiarze kryształitów $\sim 4,5$ nm; (c) charakterystyki prądowo-napięciowe (J - V) mezo-superstrukturalnych perowskitowych ogniw słonecznych z niskotemperaturową (lt-TiO_2), wysokotemperaturową (ht-TiO_2) i amorficzną (TiO_x) warstwą kompaktową; d) rekordowa sprawność ogniwa z warstwą lt-TiO_2 uzyskana poprzez zwiększenie grubości warstwy absorbera perowskitowego. Zaadaptowano z [H1] za zgodą The Royal Society of Chemistry.

Zoptymalizowane w ten sposób ogniwa osiągnęły sprawność PCE na poziomie 15,9%, porównywalną z najlepszymi ogniwami mezostrukturalnymi wytworzonymi z wykorzystaniem warstwy TiO_2 spiekanej w wysokiej temperaturze. Stanowiło to jeden z pierwszych dowodów na to, że kompletny układ warstw perowskitowego ogniwa słonecznego może być wytworzony w niskiej temperaturze bez utraty sprawności. Wyniki te bezpośrednio otworzyły drogę do stosowania elastycznych podłoży polimerowych oraz rozwoju wielozłączowych architektur tandemowych, wymagających niskotemperaturowego osadzania górnego ogniwa.

4.3.2.2. Modyfikacja heterozłącza C_{60} -SAM [H2]

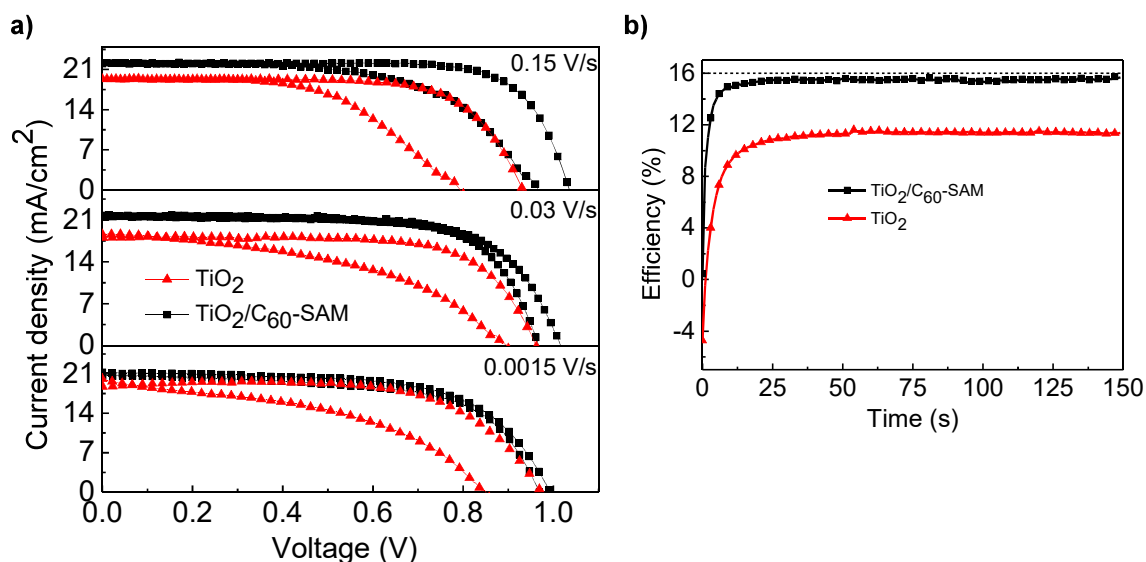
Niskotemperaturowe nanocząstki TiO_2 zapewniały satysfakcjonującą sprawność ogniw, jednak skuteczność sprzężenia elektronowego na granicy faz TiO_2 /perowskit pozostawała niewyjaśniona. W pracy [H2] systematyczne badania tego heterozłącza wykazały, że modyfikacja powierzchni TiO_2 za pomocą samoorganizującej się monowarstwy z grupą terminalną C_{60} (C_{60} -SAM) istotnie wpływa na ekstrakcję ładunku i parametry pracy ogniwa. Pomiary wydajności kwantowej fotoluminescencji (PLQE) wykazały, że osadzenie perowskitu na niemodyfikowanej warstwie TiO_2 zmniejszyło wartość PLQE z zaledwie 7,6% (dla perowskitu na podłożu szklanym) do 3,8%, podczas gdy zarejestrowane krzywe czasowo-rozdzielczej przewodności mikrofalowej (TRMC) były nieodróżnialne od wyników uzyskanych dla czystych warstw perowskitu, pozbawionych warstwy selektywnej dla elektronów. Po wprowadzeniu modyfikacji C_{60} -SAM wartość PLQE spadła do 0,5%, a kinetyka zaniku sygnału TRMC przyspieszyła o około rząd wielkości (Rysunek 2), co potwierdza wydajną ekstrakcję elektronów przez monowarstwę fullerenu.



Rysunek 2. (a) Znormalizowane krzywe zaniku fotoluminescencji oraz (b) przewodności mikrofalowej (TRMC) warstw perowskitu osadzonych na szkle, zwartej warstwie TiO_2 i TiO_2 zmodyfikowanym za pomocą $\text{C}_{60}\text{-SAM}$. Modyfikacja $\text{C}_{60}\text{-SAM}$ przyspiesza zarówno wygaszanie PL, jak i zanik sygnału TRMC, co wskazuje na wydajną ekstrakcję elektronów przez monowarstwę fulerenową. Przedrukowano (zaadaptowano) za zgodą z [H2]. Copyright 2014, American Chemical Society.

W celu wyjaśnienia tego mechanizmu zastosowano kilka komplementarnych technik badawczych. Pomiary spektroskopii odchylenia fototermicznego (PDS) wykazały zmniejszoną absorpcję poniżej przerwy energetycznej w warstwach TiO_2 po modyfikacji SAM, co wskazuje na pasywację pułpkowych stanów na granicy faz. Obserwację tę dodatkowo potwierdziła spektroskopia impedancyjna – redukcja pojemności podprzerwowej przy niskich częstotliwościach sugerowała skuteczne ograniczenie akumulacji ładunku w zwartej warstwie. Aby jednoznacznie określić rolę fulerenu, przeprowadzono eksperyment kontrolny z użyciem kwasu benzoowego, wykorzystując grupę kotwiczącą SAM pozbawioną fragmentu fulerenowego. Potwierdziło to, że podstawową funkcją $\text{C}_{60}\text{-SAM}$ jest aktywna ekstrakcja elektronów przez klatkę fulerenową, a nie jedynie pasywacja stanów pułpkowych na powierzchni TiO_2 . Pomiary elektroluminescencji wykazały 5–10-krotny wzrost intensywności emisji po modyfikacji $\text{C}_{60}\text{-SAM}$, co jest spójne z ograniczeniem rekombinacji niepromienistej na tym heterozłączu.

Ogniwa zmodyfikowane za pomocą $\text{C}_{60}\text{-SAM}$ osiągnęły PCE na poziomie 17,3% (wyznaczone z krzywej J–V), V_{OC} równe 1,04 V oraz ustabilizowaną sprawność (SPO) wynoszącą 15,7% (Rysunek 3), przy znacznie zmniejszonej histerezie prądowo-napięciowej w porównaniu z ogniwami niemodyfikowanymi. Protokół pomiaru SPO, opracowany przez kandydata w ramach tego badania, stał się standardowym narzędziem charakteryzacji przyjętym w całej dziedzinie w celu weryfikacji efektu histerezy J–V.¹¹ Praca [H2] była jednym z pierwszych doniesień demonstrujących możliwość użycia samoorganizujących się monowarstw jako wydajnych kontaktów selektywnych dla ładunków w perowskitowych ogniwach słonecznych – koncepcja ta stała się od tamtej pory jednym z najbardziej aktywnych kierunków badań w fotowoltaice perowskitowej, szczególnie w odniesieniu do materiałów SAM typu p stosowanych w architekturach odwróconych.¹³



Rysunek 3. (a) Krzywe J–V planarnych heterozłączowych ogniw perowskitowych z modyfikacją C₆₀-SAM i bez niej, mierzone przy malejących prędkościach skanowania; (b) ustabilizowana sprawność w punkcie maksymalnej mocy. Ogniw z modyfikowaną za pomocą C₆₀-SAM osiągają ustabilizowaną sprawność na poziomie 15,7% przy pomijalnej histerезie, podczas gdy referencyjne ogniw z czystym TiO₂ wykazują wyraźną histerезę nawet przy bardzo niskich prędkościach skanowania. Przedrukowano (zaadaptowano) za zgodą z [H2]. Copyright 2014, American Chemical Society.

Wkład autora:

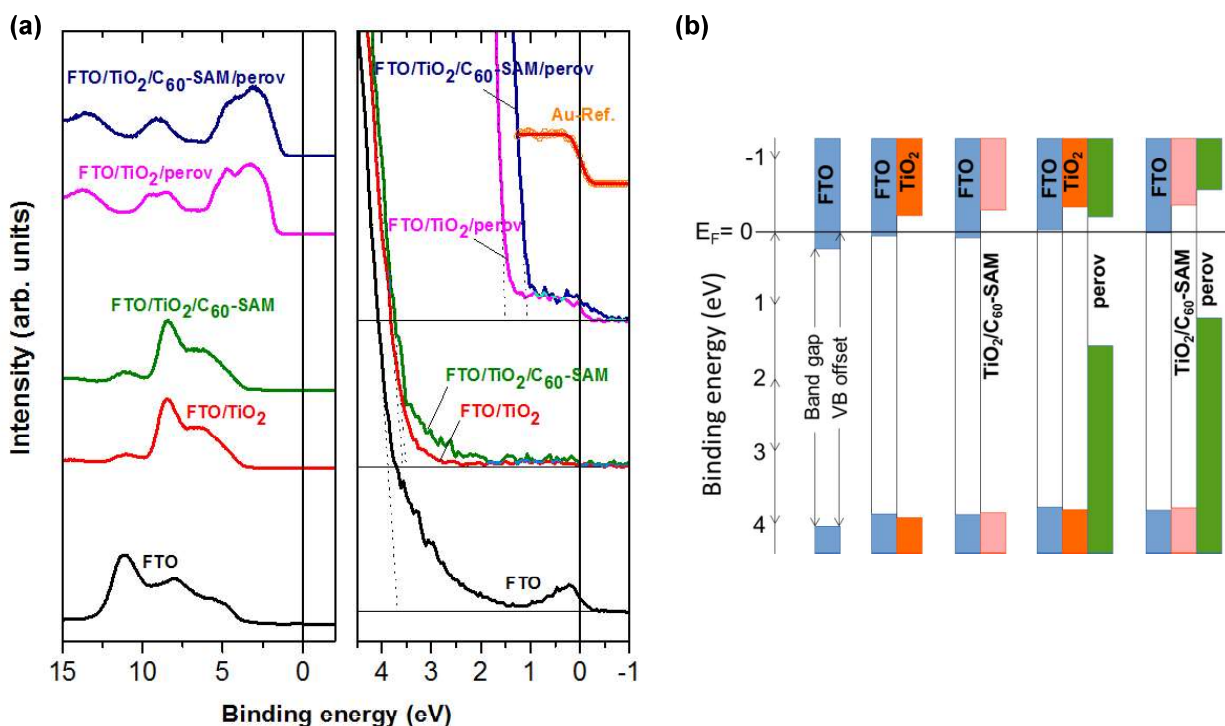
Kandydat był pierwszym autorem publikacji [H1] oraz [H2]. Zaprojektował i zaplanował eksperymenty, wytworzył ogniw perowskitowe, przeprowadził charakteryzację J–V, spektroskopię impedancyjną oraz pomiary czasowo-rozdzielczej fotoluminescencji, a także dokonał analizy uzyskanych danych i przygotował teksty publikacji. Oba cykle badań zostały zrealizowane na Uniwersytecie Oksfordzkim pod kierunkiem prof. Snaitha.

4.3.3. Fulerenowe kontakty elektronoselektywne dla perowskitowych ogniw słonecznych

Wyniki przedstawione w [H2] wykazały, że cząsteczki oparte na fulerenach tworzą znacznie skuteczniejsze kontakty elektronowe z absorberem perowskitowym niż TiO₂. Jednakże zastosowana w tych badaniach leżąca poniżej zwarta warstwa TiO₂ wciąż wymagała krystalicznego podłoża. Publikacje [H3], [H4] i [H5] ilustrują logiczną kolejność badań: od formowanego z roztworu C₆₀ całkowicie zastępującego TiO₂ [H3], przez sieciowalne pochodne fulerenu rozwiązujące problem ortogonalności rozpuszczalników w architekturach n-i-p [H4], aż po nową pochodną fulerenu zoptymalizowaną do elastycznych ogniw p-i-n [H5].

4.3.3.1. C₆₀ przetwarzany z roztworu jako warstwa kompaktowa typu n [H3]

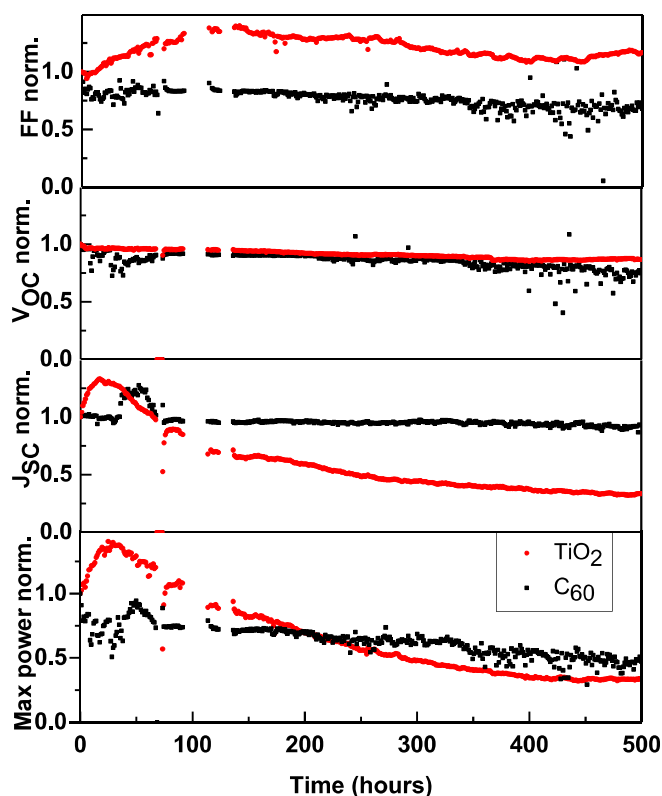
W pracy wykazano, że cienkie warstwy C₆₀ formowane z roztworu, naniesione techniką powlekania obrotowego z roztworu w dichlorobenzenie, mogą w pełni zastąpić TiO₂ w funkcji zwartej warstwy o przewodnictwie typu n, przy czym istotną zaletą jest to, że proces nanoszenia prowadzony jest w temperaturze pokojowej. Co ważne, twarda rentgenowska spektroskopia fotoelektronów (HAXPES), przeprowadzona w synchrotronie Diamond Light Source przy energii fotonów 8 keV, wykazała korzystne dopasowanie poziomów energetycznych na granicy faz C₆₀/perowskit (Rysunek 4). W szczególności odpowiednie przesunięcie krawędzi pasma przewodnictwa umożliwia wydajną ekstrakcję elektronów, zachowując jednocześnie wysoką barierę blokującą wstrzykiwanie dziur.



Rysunek 4. (a) Widma pasma walencyjnego w twardej rentgenowskiej spektroskopii fotoelektronów (HAXPES) zarejestrowane przy energii fotonów rzędu 8 keV dla wybranych układów warstw; (b) diagram energetyczny skonstruowany w oparciu o wyniki pomiarów HAXPES uwiadamiający korzystne położenie krawędzi pasma przewodnictwa dla złącza C₆₀/perowskit umożliwiające sprawną ekstrakcję elektronów. Przedrukowano (zaadaptowano) za zgodą z [H3]. Copyright 2015, American Chemical Society.

W architekturze mezo-superstrukturalnej ogniwa z warstwą C₆₀ osiągnęły sprawność (PCE) na poziomie 13,5% (z krzywej J-V) i 12,7% (w stanie ustalonym); w architekturze heterozłącza planarnego, gdzie w celu uniknięcia rozpuszczenia warstwy C₆₀ perowskit osadzano w dwuetapowym procesie z fazy gazowej, PCE wyniosło 14,5% (J-V) i 13,9% (w stanie ustalonym). Stosunek ustabilizowanej sprawności do sprawności z krzywej J-V (SPO/PCE) wyniósł 0,94–0,96 dla ogniów z warstwą C₆₀ w porównaniu z wartościami rzędu 0,45–0,78 dla ogniów opartych na TiO₂, co stanowi ilościową miarę redukcji efektu histerezy. Granica faz C₆₀/perowskit wykazuje zatem z definicji wyższą odporność na elektro-jonowe procesy odpowiedzialne za zjawisko histerezy.

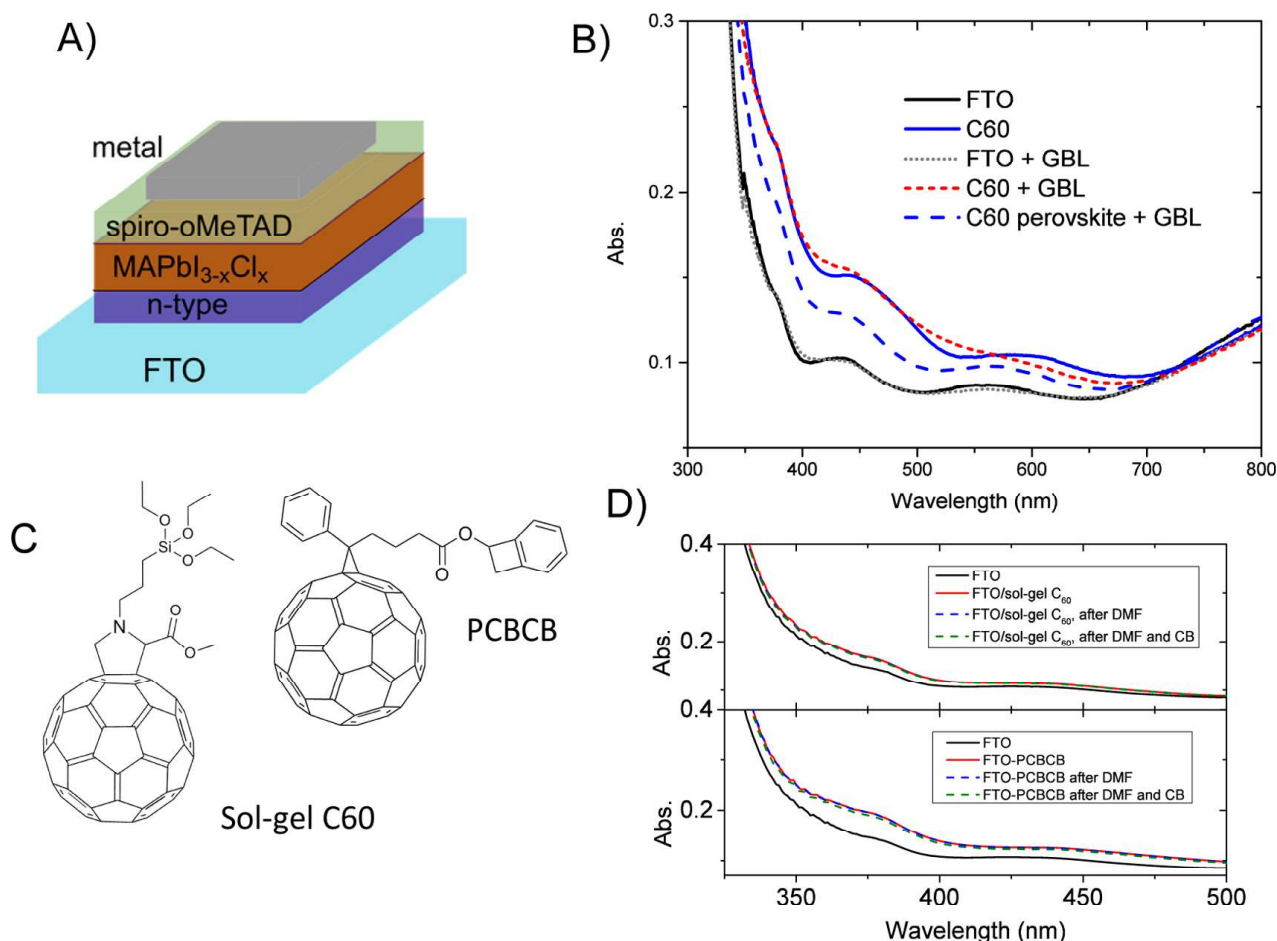
Testy stabilności przez 500 godzin ciągłego obciążenia w temperaturze 60 °C wykazały, że ogniwa oparte na C₆₀ utrzymywały wartość fotoprądu przez cały okres pomiarowy (Rysunek 5), podczas gdy w ogniwach opartych na TiO₂ zaobserwowano spadek tego parametru o blisko 50% jego wartości początkowej w ciągu pierwszych 300 godzin pracy. Degradację tę przypisano aktywacji głębokich stanów pułapkowych w TiO₂ indukowanej promieniowaniem UV, co zostało już wcześniej opisane przez Leijtens i współpracowników.¹⁴ Komplementarne badania fotoluminescencji przeprowadzone w warunkach impulsowania napięcia powiązały zjawisko fotoluminescencji przejściowej z migracją jonów i dynamiką ekstrakcji ładunków na granicach faz, pogłębiając w ten sposób mechanistyczne zrozumienie wyższej skuteczności kontaktów z C₆₀.



Rysunek 5. Zmiany w czasie znormalizowanych parametrów fotowoltaicznych w ciągu 500 h ciągłego obciążenia pod wpływem symulowanego promieniowania słonecznego i wymuszenia elektrycznego w temperaturze 60 °C. Ogniwa oparte na C₆₀ zachowują ponad 90% początkowego prądu zwarciovego, podczas gdy dla ogniwa opartych na TiO₂ obserwuje się spadek tego parametru o blisko 50% w ciągu 300 h spowodowany degradacją indukowaną promieniowaniem UV. Przedrukowano (zaadaptowano) za zgodą z [H3]. Copyright 2015, American Chemical Society.

4.3.3.2. Sieciowalne pochodne fulerenów dla architektury n-i-p [H4]

Warstwy ETL z fulerenów formowanych z roztworu w architekturze n-i-p napotykać problem ortogonalności rozpuszczalników. Warstwa ETL jest nanoszona jako pierwsza, a roztwór prekursorów perowskitu (zazwyczaj na bazie DMF lub DMSO) może częściowo rozpuścić leżącą poniżej powłokę fulerenową. Spektroskopia UV-Vis potwierdziła, że po naniesieniu perowskitu wypłukaniu ulegało około 50% grubości niezmodyfikowanej warstwy C₆₀. W pracy [H4] problem ten rozwiązano z wykorzystaniem dwóch sieciowalnych pochodnych fulerenu. Pierwsza, fuleropirolidyna zawierająca grupę trietoksylanową (określana jako sol-żel C₆₀), została zsyntetyzowana przez współpracowników z Institut Charles Gerhardt w Montpellier. Proces sieciowania inicjowano parami kwasu trifluorooctowego, co wywoływało hydrolizę i kondensację grup etoksylanowych, tworząc nierozpuszczalną sieć Si-O-Si. Drugą pochodną był PCBCB – wariant PCBM z boczną grupą benzocyklobutenową, zaprojektowany w Georgia Institute of Technology. Związek ten sieciowano termicznie w temperaturze 200 °C poprzez otwarcie pierścienia, a następnie cykloaddycję [4+2] Dielsa-Aldera. Pomiary UV-Vis potwierdziły, że obie usieciowane warstwy zachowały swoją gęstość optyczną po ekspozycji na DMF i chlorobenzen, podczas gdy nieusieciowany C₆₀ ulegał znacznemu pocienieniu po naniesieniu perowskitu (Rysunek 6). Mikroskopia sił atomowych wykazała, że usieciowane warstwy zachowały w dużej mierze gładką morfologię po działaniu rozpuszczalników, z zaobserwowanym jedynie niewielkim powstawaniem defektów punktowych w przypadku powłoki sol-żel C₆₀.



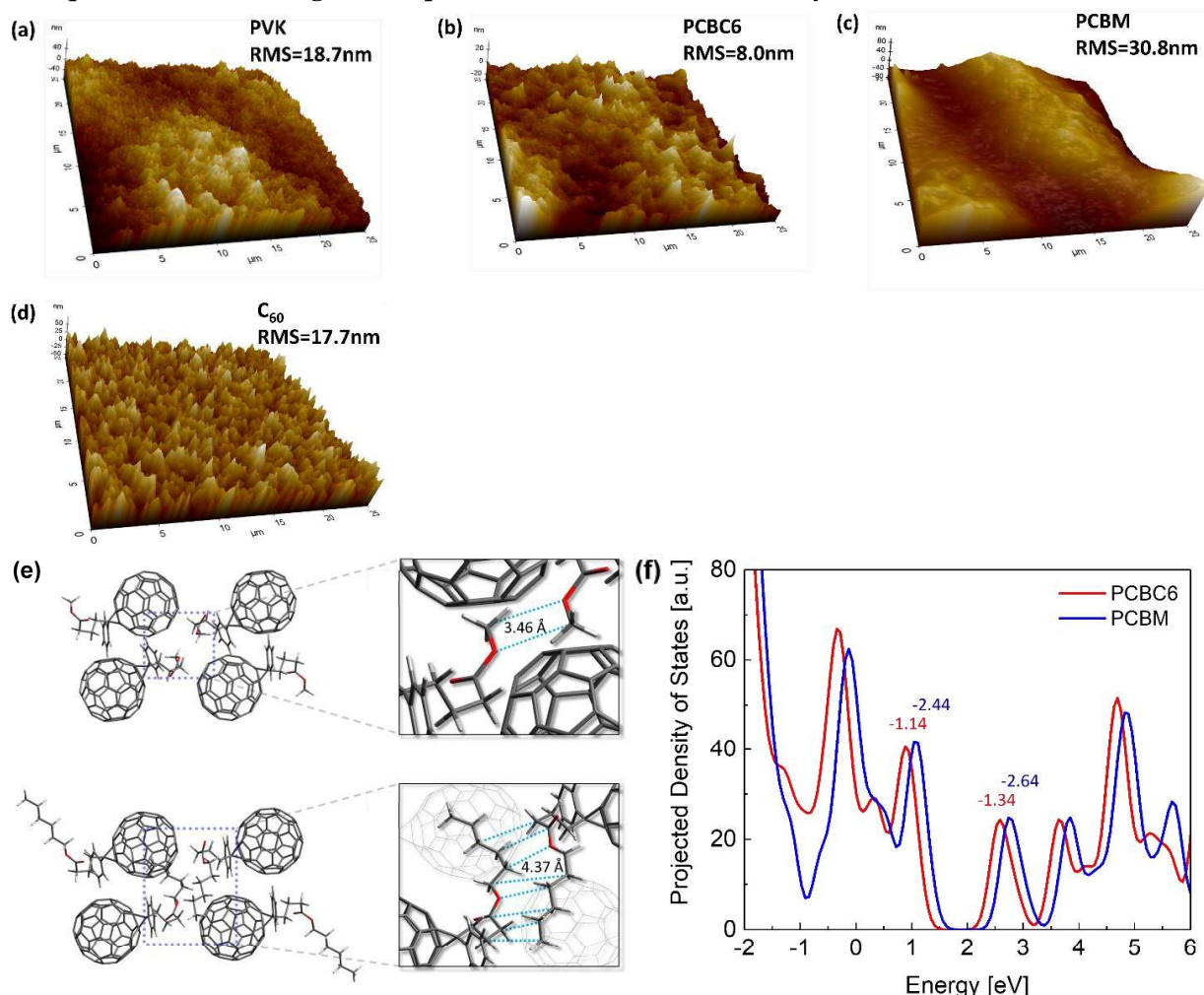
Rysunek 6. (A) Schemat architektury perowskitowego ogniwa słonecznego w konfiguracji n-i-p; (B) widma UV-Vis wykazujące częściowe rozpuszczenie niezmodyfikowanej warstwy C_{60} po naniesieniu perowskitu; (C) struktury chemiczne sieciowalnych pochodnych fulereny; (D) odporność usieciowanych warstw na rozpuszczalniki potwierdzona spektroskopią UV-Vis. Przedrukowano za zgodą z [H4]. Copyright 2016, American Chemical Society.

Pomiary zaniku fotoluminescencji z rozdzielczością czasową (TRPL) dla warstw perowskitu naniesionych na różne warstwy zbierające elektrony potwierdziły szybki transfer elektronów do obu usieciowanych pochodnych fulereny. Krótki komponent czasu życia fotoluminescencji uległ skróceniu z 12,8 ns na zwartej warstwie TiO_2 do 5,65 ns na powłoce sol-żel C_{60} oraz 7,89 ns na PCBCB. W rezultacie ogniwa z usieciowanymi warstwami wykazywały wyższe wartości V_{OC} (1,07 V dla sol-żel C_{60} ; 1,11 V dla PCBCB) i wyższe J_{SC} niż referencyjne ogniwa z nieusieciowanym C_{60} . Wzrost ten można przypisać wyeliminowaniu ścieżek zwarciovych i poprawie zdolności do blokowania dziur w wyniku zapobieżenia rozpuszczeniu warstwy ETL. Uzyskano sprawności PCE na poziomie 16,6% (sol-żel C_{60}) i 15,2% (PCBCB), znacznie przewyższając referencyjne ogniwa z nieusieciowanym C_{60} (13,9%). Stosunek SPO/PCE dla PCBCB (0,85) względem wariantu sol-żel C_{60} (0,93) wskazywał na bardziej wyraźną histerezę, co jest spójne z wolniejszą ekstrakcją ładunków widoczną w pomiarach TRPL oraz występowaniem drobnych defektów punktowych w cieńszych powłokach usieciowanych. Wyniki te potwierdziły wykonalność niezawodnego, niskotemperaturowego i formowanego z roztworu układu warstw perowskitowego ogniwa słonecznego, stanowiąc ważny krok w kierunku skalowalnej produkcji. W późniejszym czasie strategia sieciowania znalazła szerokie zastosowanie wśród innych grup badawczych dla fulerenowych i niefulerenowych materiałów ETL wymagających odporności na rozpuszczalniki.¹⁵

4.3.3.3. PCBC6: Nowa pochodna fulerenu dla elastycznych urządzeń p-i-n [H5]

Podczas gdy publikacje [H3] i [H4] opisały warstwy ETL oparte na fulerenach dla architektury n-i-p, praca [H5] rozszerzyła tę platformę na konfigurację odwróconą (p-i-n), gdzie ETL formowany jest na powierzchni warstwy perowskitu. Dzięki wykorzystaniu materiałów organicznych jako dolnej, zwartej warstwy o przewodnictwie typu p, taka architektura ogniwa z definicji eliminuje wysokotemperaturowe etapy przetwarzania i charakteryzuje się zmniejszoną histerezą. W badaniach zastosowano PCBC6 (ester n-heksylový kwasu [6,6]-fenylo-C61-masłowego) – komercyjnie dostępną pochodną fulerenu z łańcuchem bocznym estru heksylový, której dłuższa grupa alkilowa nadaje znacznie wyższą rozpuszczalność w rozpuszczalnikach niepolarnych niż powszechnie stosowanemu PCBM (ester metylový kwasu [6,6]-fenylo-C61-masłowego).

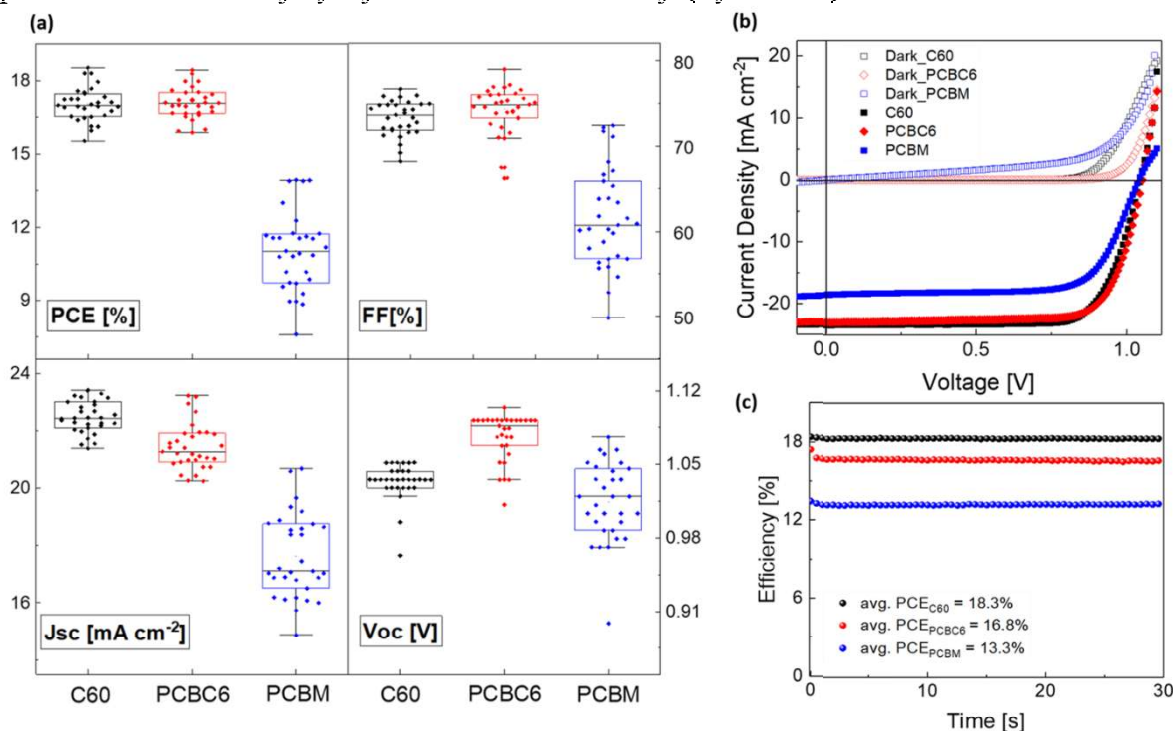
Mikroskopia sił atomowych wykazała, że PCBC6 tworzy znacznie gładziej warstwy (chropowatość RMS 8 nm) niż PCBM (RMS 30,8 nm) po naniesieniu techniką powlekania obrotowego na powierzchnię perowskitu. Obliczenia w ramach teorii funkcyjnego gęstości (DFT), przeprowadzone we współpracy z grupą Filippo De Angelisa (Perugia), wykazały, że łańcuchy heksylový PCBC6 wykazują silniejsze oddziaływania van der Waalsa niż grupy metylový PCBM, co przekłada się na korzystniejsze upakowanie cząsteczek i gęstsze warstwy (Rysunek 7). Poprawiona morfologia ułatwia transport elektronów i ogranicza powstawanie ścieżek zwarciových w warstwie ETL.



Rysunek 7. (a-d) Trójwymiarowe obrazy AFM topografii powierzchni perowskitu pokrytego różnymi związkami fulerenowymi: PCBC6 (RMS = 8 nm), PCBM (RMS = 30,8 nm) i naparowanym C₆₀ (RMS = 17,7 nm); (e) optymalizowane metodą DFT upakowanie cząsteczek PCBM i PCBC6 w fazie objętościowej, wskazujące na silniejsze międzycząsteczkowe oddziaływania van der Waalsa w przypadku PCBC6 dzięki obecności łańcucha heksylový; (f)

rzutowana gęstość stanów dla fazy objętościowej PCBM (linia niebieska) i PCBC6 (linia czerwona). Zaadaptowano za zgodą z [H5]. Copyright 2020, Wiley-VCH GmbH.

Na elastycznych podłożach PET o powierzchni 1 cm^2 ogniwa z PCBC6 osiągnęły PCE na poziomie 18,4%, co stanowi wartość o prawie 30% wyższą niż w przypadku najlepszych ogniw z PCBM (13,9%) wytworzonych w tych samych warunkach. Referencyjne ogniwa z naporowywanym C_{60} osiągnęły porównywalną sprawność (18,5%), ale z wyższym stosunkiem SPO/PCE ze względu na lepsze pokrycie konformalne warstw osadzanych metodą naporowywania termicznego. Średnia wartość V_{oc} dla ogniw z PCBC6 wyniosła 1,07 V i była najwyższą spośród trzech badanych związków fullerenowych, co jest spójne z ograniczoną rekombinacją niepromienistą na granicy faz PCBC6/perowskit, potwierdzoną pomiarami kwantowej wydajności fotoluminescencji (Rysunek 8).



Rysunek 8. (a) Statystyczny rozkład parametrów fotowoltaicznych elastycznych ogniw słonecznych p-i-n (1 cm^2 , podłoże PET) z różnymi warstwami ETL; (b) charakterystyki J-V i (c) ustabilizowana moc wyjściowa dla rekordowych urządzeń. W skanach J-V PCBC6 osiąga PCE 18,4%, porównywalną wartość sprawności z naporowanym C_{60} (18,5%) i zdecydowanie przewyższającą urządzenia z PCBM (13,9%). Zaadaptowano za zgodą z [H5]. Copyright 2020, Wiley-VCH GmbH.

Wkład autora:

W pracy [H3] kandydat był pierwszym autorem: zaprojektował eksperymenty, przeprowadził proces wytwarzania ogniw oraz ich charakteryzację spektroskopową (PL, TRPL, UV-Vis), zorganizował i koordynował pomiary HAXPES w synchrotronie Diamond Light Source, a także przygotował tekst publikacji. W [H4] kandydat współdzielił pierwsze autorstwo (równy wkład z I. Ramirezem); współtworzył koncepcję i koordynował realizację badań, wytwarzał ogniwa oraz zredagował tekst artykułu. Oba cykle eksperymentów przeprowadzono na Uniwersytecie Oksfordzkim. W publikacji [H5] kandydat był kierownikiem badań i autorem korespondencyjnym z ramienia Saule Technologies, gdzie zarządzał strategią badawczą, nadzorował pracę T. Ahmada i B. Wilk oraz koordynował międzynarodową współpracę z grupami badawczymi z Università degli Studi di Roma Tor Vergata (Di Carlo), Fraunhofer ISE (Würfel) i CNR-SCITEC (De Angelis). Badania opisane w [H5] były częściowo finansowane ze środków następujących grantów, w

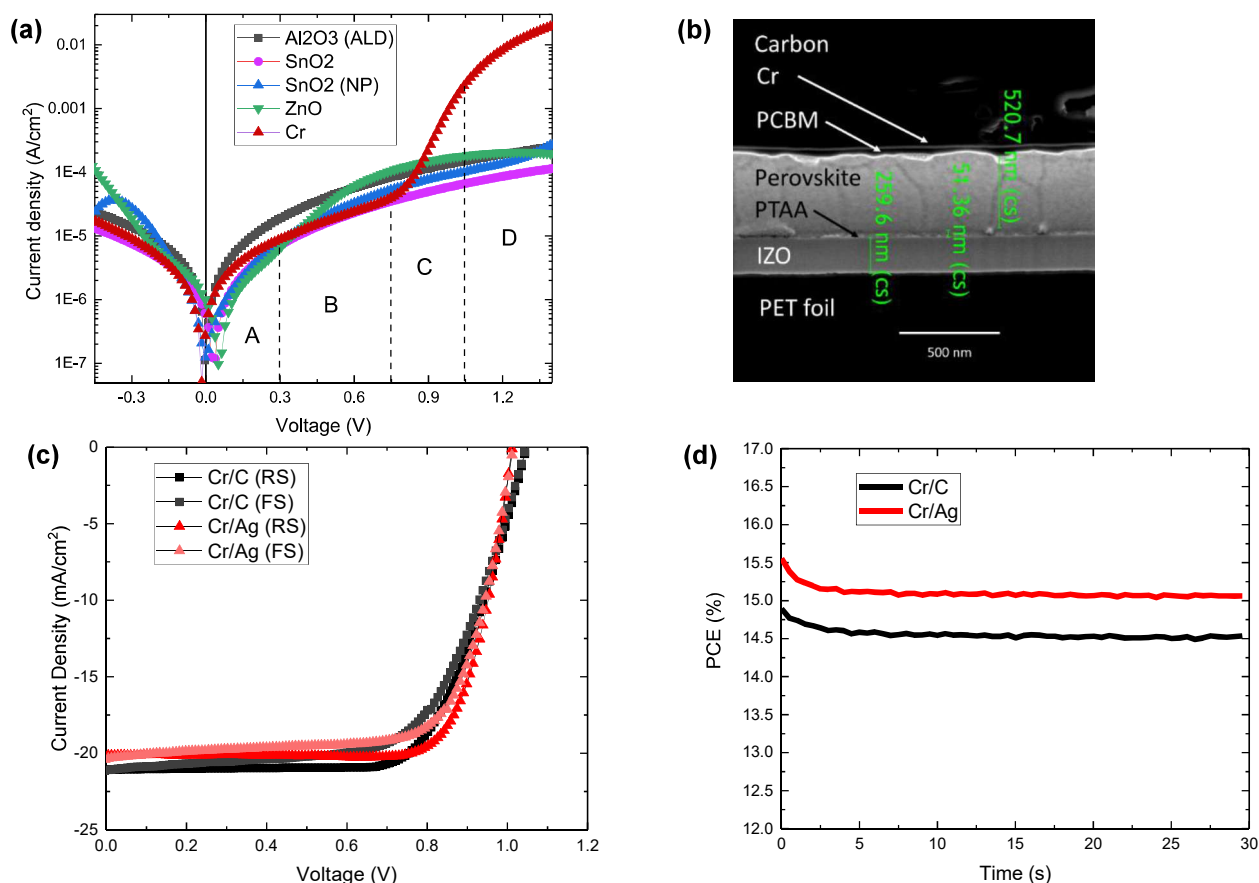
których kandydat pełnił funkcję Kierownika Projektu: Espresso (Horyzont 2020) oraz First Team (FNP).

4.3.4. Inżynieria architektury urządzenia: elektrody węglowe, przezroczyste kontakty i skalowalne osadzanie

Poza warstwami kontaktowymi do selektywnego zbierania ładunków opracowanymi w [H1]-[H5], w drodze do przemysłowej implementacji elastycznej fotowoltaiki perowskitowej pozostawały do rozwiązania kolejne wyzwania architektoniczne, w tym: zastąpienie podatnych na korozję metalowych kontaktów tylnych chemicznie obojętnymi alternatywami [H6], opracowanie przezroczystych górnych elektrod umożliwiających konfiguracje półprzezroczyste i tandemowe [H7] oraz przejście od laboratoryjnego powlekania obrotowego do przemysłowo skalowalnych metod osadzania [H8]. W niniejszym podrozdziale omówiono prace badawcze stanowiące odpowiedź na te wyzwania.

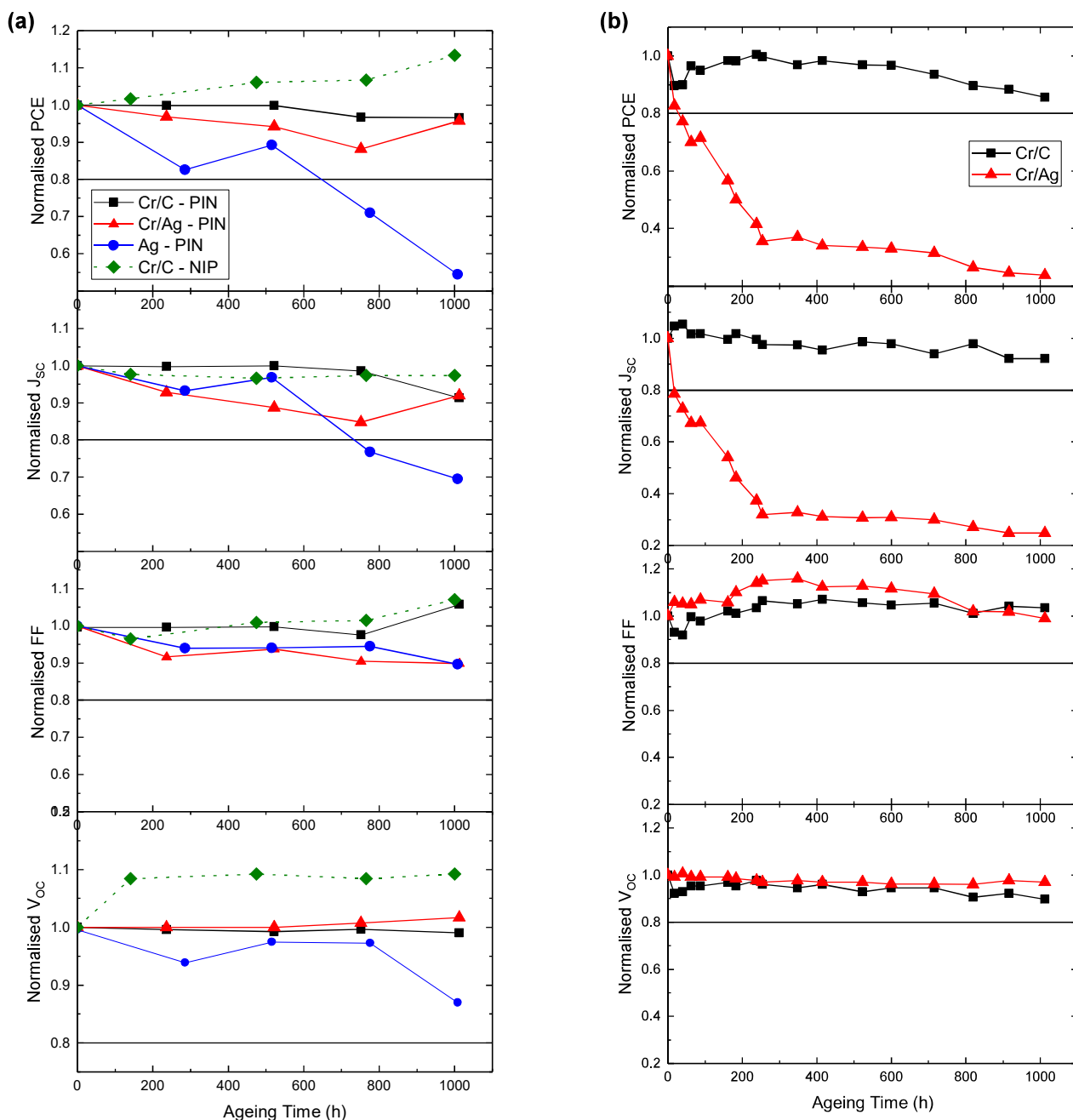
4.3.4.1. Tylne elektrody węglowe dla stabilnych elastycznych ogniw perowskitowych [H6]

Metalowe elektrody tylne (Au, Ag) pozostają powszechne w wysokosprawnych perowskitowych ogniwach słonecznych, jednak wprowadzają fundamentalne ograniczenia stabilności. Złoto może dyfundować przez warstwę transportującą dziury do absorbera perowskitowego, podczas gdy srebro reaguje z mobilnymi jonami halogenków, tworząc izolujący AgI; oba te procesy przyspieszają w podwyższonych temperaturach.¹⁶ Węgiel jest atrakcyjną alternatywą: jest chemicznie obojętny wobec halogenków, powszechnie dostępny i kompatybilny z niskokosztowymi technikami druku. Wcześniej perowskitowe ogniwa słoneczne z elektrodą węglową badano wyłącznie w architekturach n-i-p, gdzie węgiel pełnił funkcję warstwy zbierającej dziury i często wymagał wysokotemperaturowego spiekania. W [H6] węgiel zastosowano po raz pierwszy jako elektrodę tylną w architekturze odwróconej (p-i-n), ze zbieraniem elektronów na kontakcie węglowym. Struktura ogniwa składała się z układu: PET/IZO/PTAA/ $\text{Cs}_{0.04}(\text{MA}_{0.17}\text{FA}_{0.83})_{0.96}\text{Pb}(\text{I}_{0.83}\text{Br}_{0.17})_3$ /PCBM/Cr/C. Kluczową innowacją było wprowadzenie ultracienkiej (5 nm), naparowywanej warstwy buforowej chromu pomiędzy warstwę transportującą elektrony PCBM a elektrodę węglową nanoszoną techniką raklowania. Analiza charakterystyk prądowo-napięciowych w ciemności wykazała, że Cr, dzięki swojej wysokiej twardości, jednocześnie zapewnia mechaniczną ochronę leżących poniżej miękkich warstw organicznych podczas nanoszenia warstwy węglowej i umożliwia kontakt omiczy przy transferze elektronów do warstwy węglowej (Rysunek 9). Bez warstwy buforowej duże płatki węglowe (5–10 μm) przebiegały warstwę ETL, prowadząc do powstawania ścieżek zwarciovych.



Rysunek 9. (a) Ciemne charakterystyki prądowo-napięciowe elastycznych ogniw słonecznych p-i-n z różnymi warstwami buforowymi i węglowym tylnym kontaktem, pokazujące, że warstwa buforowa Cr umożliwia kontakt omiczny; (b) przekrojowy obraz FIB-SEM stosu urządzenia z warstwami Cr/C; (c) krzywe J-V rekordowych urządzeń Cr/C i Cr/Ag (1 cm², podłoże PET); (d) ustabilizowana moc wyjściowa w punkcie maksymalnej mocy. Przedrukowano (zaadaptowano) z [H6] na licencji ACS AuthorChoice.

Rekordowe elastyczne ogniwo Cr/C (o powierzchni 1 cm²) osiągnęło PCE na poziomie 15,18% i współczynnik wypełnienia (FF) 68,97%, zbliżając się do referencyjnego ogniwa Cr/Ag (PCE 15,71%, FF 77,09%). Spektroskopia impedancyjna wykazała, że różnica w FF wynika niemal wyłącznie z wyższej rezystancji szeregowej warstwy węglowej ($R_{\text{series}} = 8\text{--}9\ \Omega$) w porównaniu ze srebrem ($0,7\ \Omega$). Po matematycznym skorygowaniu wyników o wpływ rezystancji szeregowej, oba typy ogniw wykazały identyczne współczynniki wypełnienia ($\sim 77\%$), a przewidywane PCE ogniwa Cr/C wzrosło do 17,14%. Pomiary przejściowego fotoprądu i fotonapięcia potwierdziły porównywalną dynamikę ekstrakcji ładunków i rekombinacji dla obu typów elektrod. Decydująca przewaga elektrody węglowej uwidoczniła się w testach stabilności. Podczas ciągłej pracy w punkcie maksymalnej mocy (oświetlenie LED, 600 W/m², atmosfera N₂, 35–40 °C) ogniwa Cr/C wykazały pomijalny spadek sprawności w ciągu 1000 godzin, podczas gdy ogniwa z elektrodą Ag (bez Cr) straciły 20% swojej początkowej wartości PCE w ciągu pierwszych 600 godzin, głównie z powodu degradacji J_{sc} spowodowanej powstawaniem halogenków srebra (Rysunek 10). W teście starzenia termicznego w temperaturze 85 °C kontrast był jeszcze bardziej wyraźny: ogniwa Cr/C pozostały stabilne przez 1000 godzin, podczas gdy sprawność ogniw Cr/Ag spadła o 20% w ciągu pierwszych 30 godzin, czemu towarzyszyło widoczne przebarwienie warstwy srebrnej. Sama warstwa buforowa Cr okazała się niewystarczająca do powstrzymania dyfuzji halogenków w podwyższonych temperaturach, natomiast elektroda węglowa jest fundamentalnie odporna na efekty korozyjne indukowane przez halogenki.

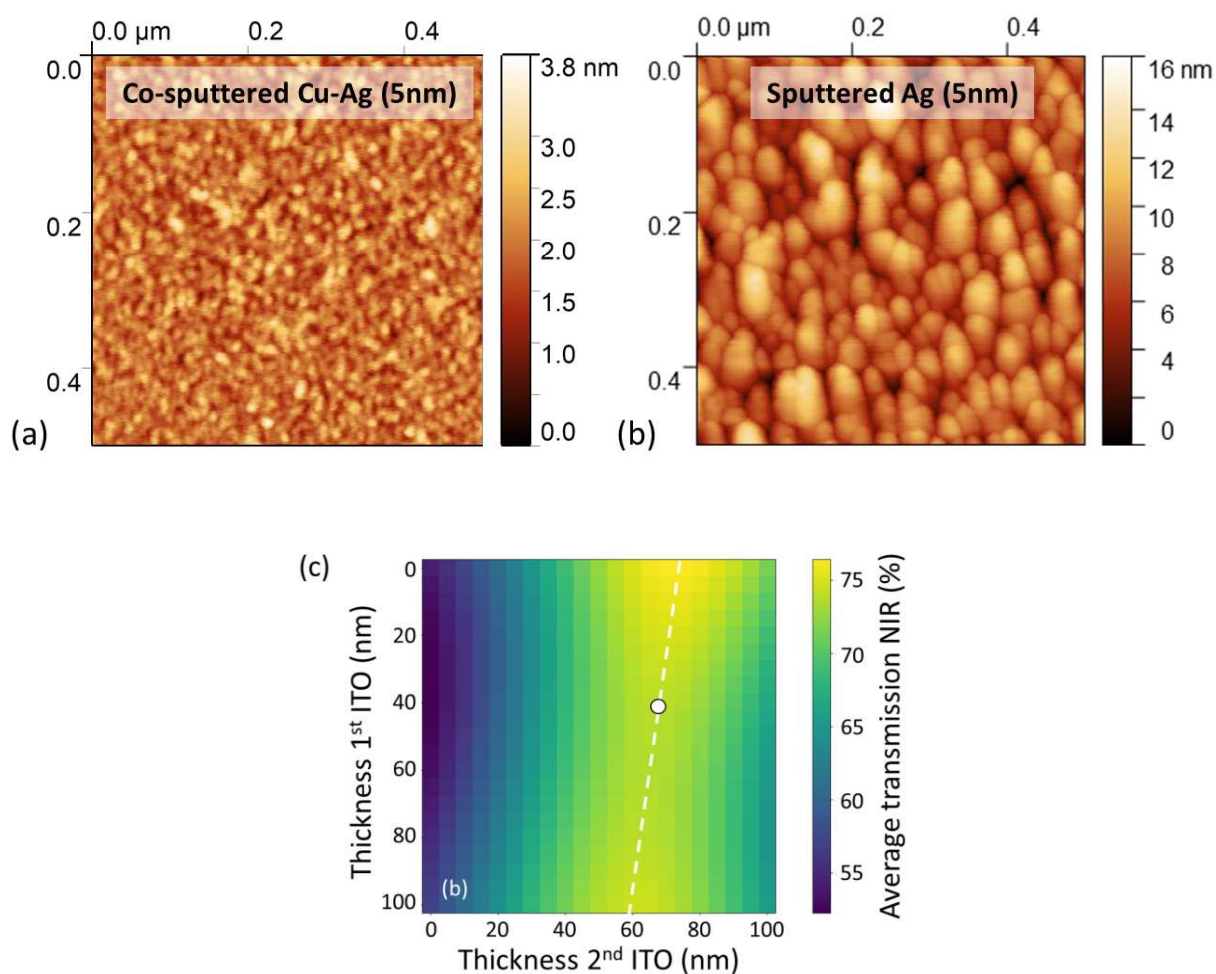


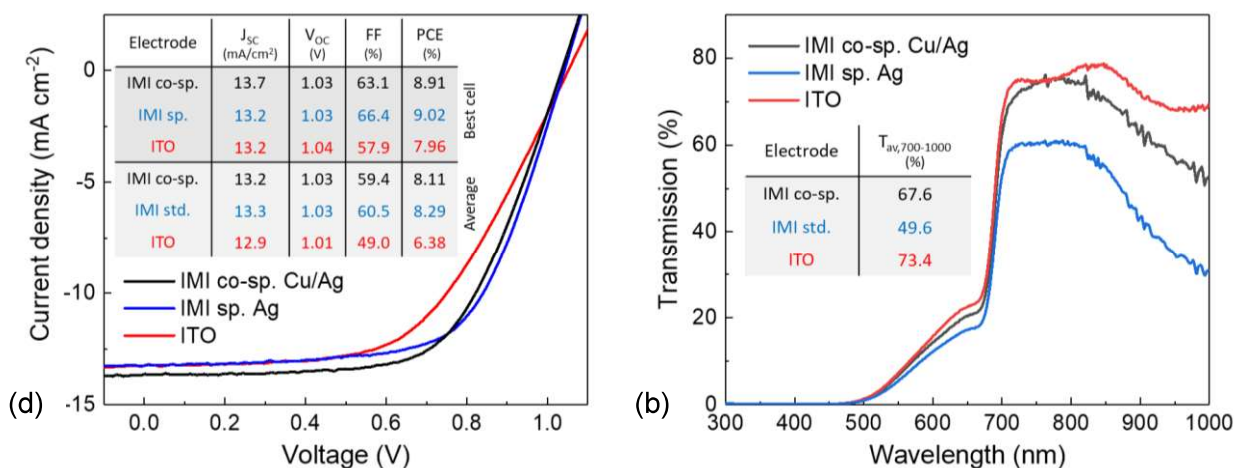
Rysunek 10. (a) Zmiany w czasie znormalizowanych parametrów fotowoltaicznych perowskitowych ogniw słonecznych z różnymi elektrodami tylnymi podczas pracy w punkcie maksymalnej mocy (oświetlenie LED, atmosfera N_2 , 35–40 °C); (b) starzenie termiczne w 85 °C porównujące urządzenia Cr/C i Cr/Ag. Kontakt oparty na węglu zapewnia wyższą stabilność w obu testach. Przedrukowano (zaadaptowano) z [H6] na licencji ACS AuthorChoice.

4.3.4.2. Przezroczyste elektrody przewodzące dla półprzezroczystych urządzeń fotowoltaicznych [H7]

Półprzezroczyste ogniwa słoneczne na bazie perowskitów stanowią atrakcyjny komponent architektur tandemowych, w których wysoka przepuszczalność górnego ogniwa w zakresie bliskiej podczerwieni (NIR) maksymalizuje generację fotoprądu w dolnym absorberze. Standardowe przezroczyste tlenki przewodzące (np. ITO) osadzone w niskiej temperaturze charakteryzują się ograniczoną przewodnością, a ich kruchość zawęża możliwości zastosowania na podłożach elastycznych. W rozprawie doktorskiej kandydata wykazano wcześniej chemiczną niekompatybilność między elektrodami z nanodrutów srebrnych a absorberem perowskitowym. W [H7] opracowano

alternatywne podejście oparte na współrozpylanych ultracienkich warstwach metalicznych Cu/Ag, zintegrowanych w dielektrycznej strukturze ITO-metal-ITO (IMI). Technika współrozpylania umożliwia osadzanie ciągłych, ultragładkich warstw metalicznych o grubościach do zaledwie 5 nm (chropowatość RMS 0,36 nm), co leży znacznie poniżej progu perkolacji dla konwencjonalnie napyłanego Ag (RMS 2,02 nm przy tej samej grubości). Zoptymalizowana elektroda IMI wytworzona metodą współrozpylania osiągnęła średnią przepuszczalność w paśmie NIR (700–1000 nm) na poziomie 78,5% przy rezystancji powierzchniowej 16 $\Omega/\square$, znacznie przewyższając referencyjne struktury IMI z napyłanym Ag (70,0% NIR, 11,3 $\Omega/\square$) pod względem kluczowego parametru przezroczystości. Elipsometria oraz spektroskopia promieniowania rentgenowskiego z dyspersją energii potwierdziły, że optymalna zawartość Cu w stopie Cu/Ag wynosi około 8,5% at. Współrozpylane elektrody IMI zintegrowano z perowskitowymi ogniwami słonecznymi p-i-n o szerokiej przerwie energetycznej (1,72 eV) na elastycznych podłożach PET, zaprojektowanymi do pracy w tandemowych konfiguracjach czterokontaktowych (4T). Te półprzezroczyste urządzenia osiągnęły PCE na poziomie około 9%, dorównując referencyjnym ogniwom z napyłanym IMI, zapewniając jednocześnie znacznie wyższą przepuszczalność NIR przez kompletną strukturę urządzenia (67,6% względem 49,6%). Symulacje optyczne z wykorzystaniem metody macierzy przejścia, potwierdzone danymi eksperymentalnymi, posłużyły do optymalizacji grubości warstw ITO w celu maksymalizacji transmisji w zakresie NIR (Rysunek 11).



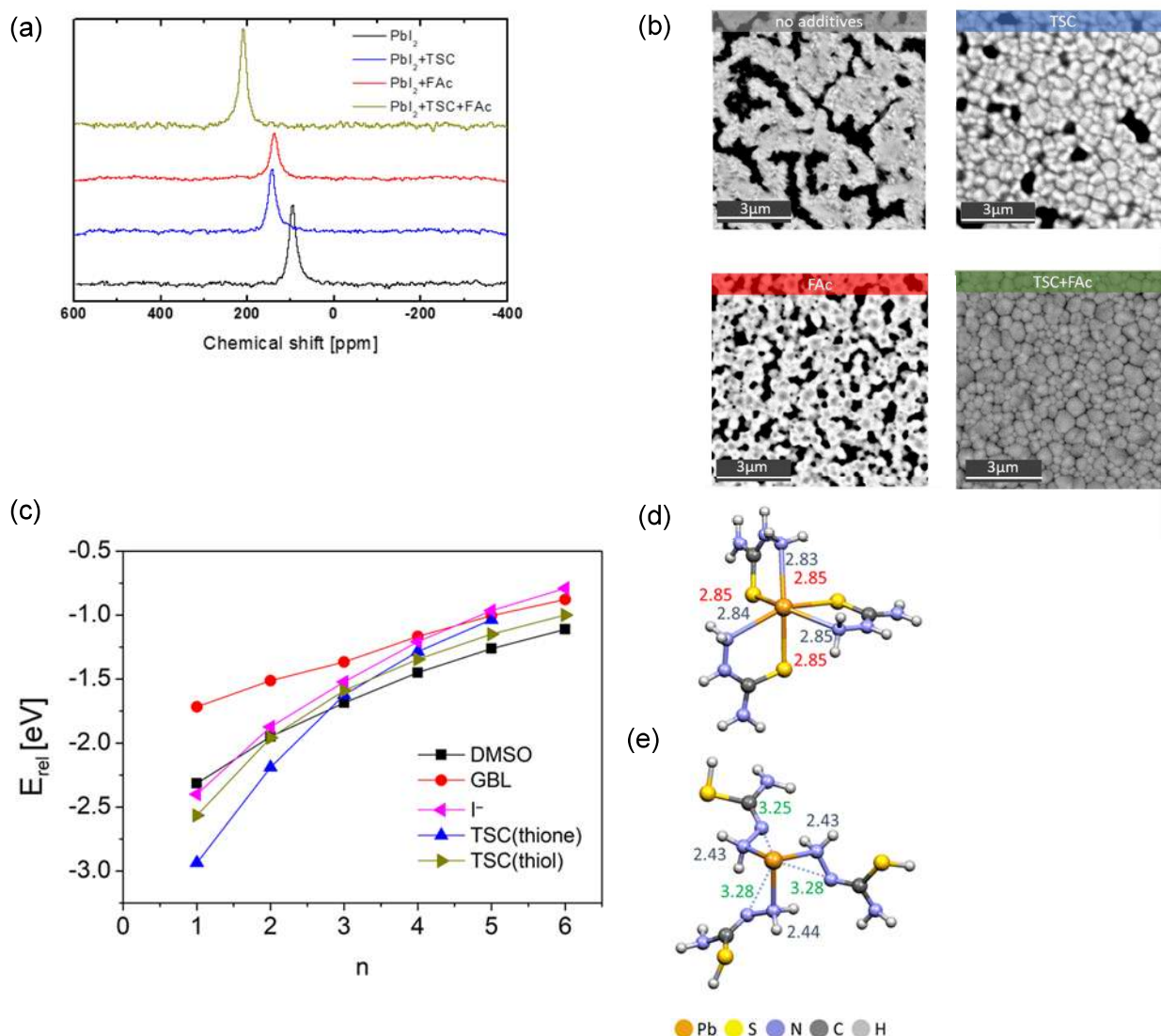


Rysunek 11. (a-b) Topografia AFM 5 nm współrozpylanej warstwy Cu/Ag ($RMS = 0,36$ nm) i rozpylonego Ag ($RMS = 2,02$ nm); (c) średnia transmisja NIR (skala kolorów) jako funkcja grubości 1. i 2. warstwy ITO w strukturze IMI; (d) krzywe J-V i (e) widma transmisji urządzeń z różnymi przezroczystymi elektrodami. Przedrukowano (zaadaptowano) za zgodą z [H7]. Copyright 2021, AIP Publishing LLC.

Testy zginania (1000 cykli, promień gięcia 1 cm) wykazały, że oba typy elektrod IMI zachowały początkową rezystancję powierzchniową, podczas gdy w przypadku referencyjnej warstwy ITO parametr ten wzrósł dwukrotnie. Połączenie wysokiej przezroczystości, niskiej rezystancji powierzchniowej, elastyczności mechanicznej i przemysłowej skalowalności procesu współrozpylania sprawia, że ta technologia elektrod może być bezpośrednio zastosowana w elastycznych modułach tandemowych, co zostało następnie wykazane w [H11].

4.3.4.3. Drukowanie atramentowe z wykorzystaniem bezpiecznych dla środowiska rozpuszczalników na potrzeby skalowalnej produkcji [H8]

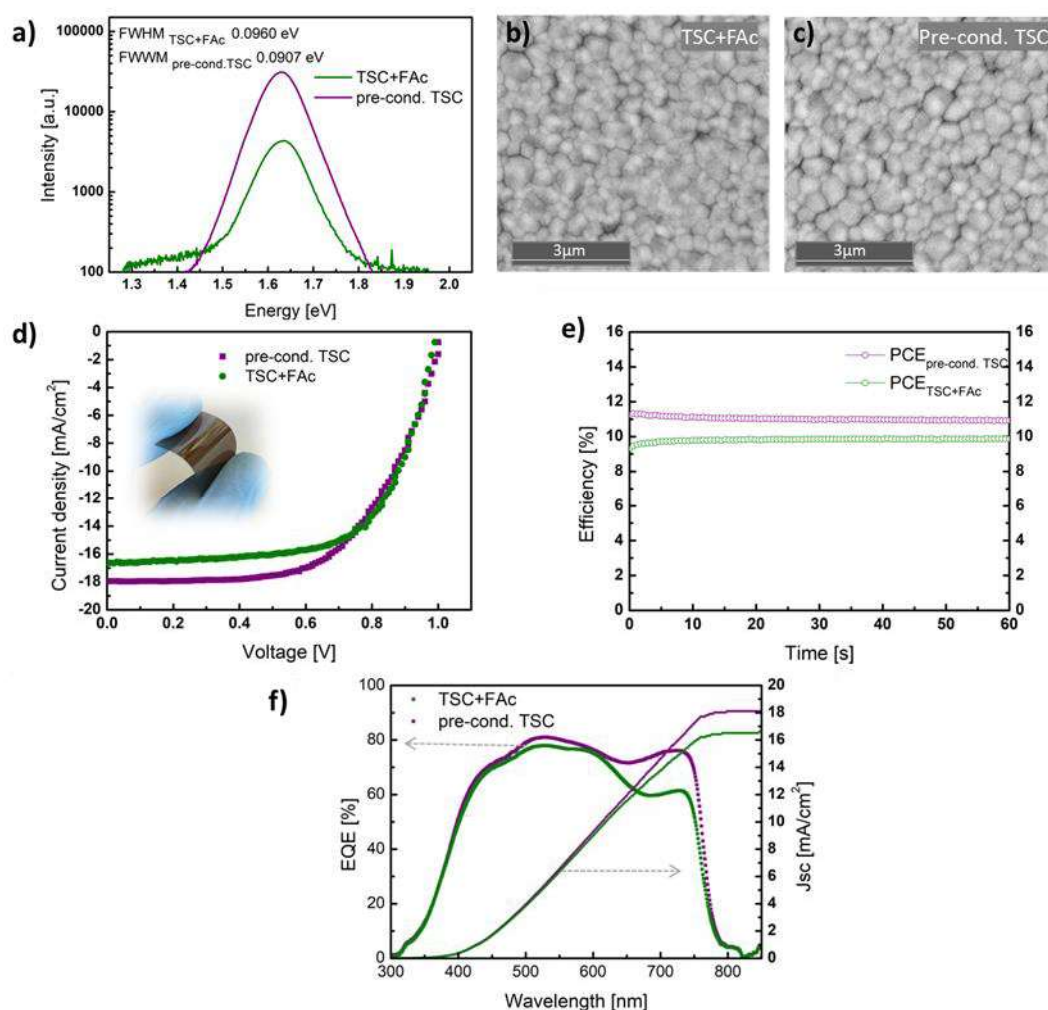
Podczas gdy we wcześniejszych badaniach do osadzania warstw perowskitu wykorzystywano technikę powlekania obrotowego, produkcja przemysłowa wymaga skalowalnych i wysokowydajnych metod. Drukowanie atramentowe oferuje precyzyjną kontrolę grubości, minimalne marnotrawstwo materiału oraz kompatybilność z przetwarzaniem w systemie z rolki na rolkę (roll-to-roll), jednak wymaga jednocześnie atramentów o specyficznych właściwościach reologicznych i zastosowania nietoksycznych rozpuszczalników. W pracy [H8] opracowano kompletną recepturę atramentu do drukowania warstw perowskitu o mieszanym składzie kationowym ($CS_{0.1}[(FA)_{0.83}(MA)_{0.17}]_{0.9}Pb(I_{0.83}Br_{0.17})_3$) w warunkach otoczenia. Zastosowano trójskładnikowy układ rozpuszczalników obejmujący γ -butyrolakton (GBL), 2-metylopirazyna (2MP) i DMSO, z których wszystkie są klasyfikowane jako bezpieczne dla środowiska. Kluczowym wyzwaniem było kontrolowanie krystalizacji perowskitu w warunkach otoczenia poprzez precyzyjne dostrojenie chemii koordynacyjnej w roztworze prekursorowym. Problem ten rozwiązano za pomocą inżynierii dodatków: do układu wprowadzono tiosemikarbazyd (TSC) – dwufunkcyjną zasadę Lewisa zawierającą grupy C=S i N-H – w celu utworzenia stabilnych kompleksów pośrednich z ołowiem, które opóźniają krystalizację. Spektroskopia magnetycznego rezonansu jądrowego ^{207}Pb NMR (zrealizowana we współpracy z grupą S. Mathura z Uniwersytetu w Kolonii) wykazała, że dodatek TSC i kwasu mrówkowego (FAC) przesunął sygnał rezonansowy ołowiu z 96,4 ppm (dla czystego PbI_2 do 210,1 ppm. Świadczy to o istotnej zmianie otoczenia koordynacyjnego jonów Pb^{2+} (Rysunek 12). Ponadto obliczenia DFT, przeprowadzone we współpracy z CNR-SCITEC w Perugii, wykazały, że dodatek kwasu stabilizuje TSC w jego tautomerycznej formie tionowej. Tautomer ten skutecznie chelatuje jony Pb^{2+} poprzez oddziaływania S-Pb i N-Pb, tworząc stabilny produkt pośredni niezbędny do właściwej regulacji procesu krystalizacji.



Rysunek 12. (a) Widma ^{207}Pb NMR PbI_2 w DMSO-d_6 przy różnych kombinacjach dodatków, wykazujące stopniowe przesunięcie sygnału w kierunku niższych pól po wprowadzeniu TSC i kwasu mrówkowego; (b) obrazy SEM drukowanych atramentowo warstw perowskitu uzyskanych z receptury bez dodatków, z samym TSC, z samym FAC oraz z oboma dodatkami; (c) względna energia tworzenia wyznaczona metodą DFT, E_{rel} , w funkcji liczby cząsteczek koordynujących; (d) graficzna symulacja kompleksu ołów-tion (wartości czerwone/niebieskie odnoszą się do długości wiązań Pb-S / Pb-N), (e) kompleksu ołów-tiol (wartości niebieskie/zielone odnoszą się do długości wiązań Pb-N z grupy NH_2 / Pb-N atomu związanego z NH_2). Przedrukowano z [H8] za zgodą. Copyright 2021, American Chemical Society.

Zoptymalizowany protokół wstępnego kondycjonowania, w którym TSC rozpuszczano wstępnie ze zredukowaną ilością FAC i podgrzewano w temperaturze $80\text{ }^\circ\text{C}$ przez 1 h przed wprowadzeniem do roztworu prekursorowego, przyspieszył konwersję formy tiolowej do tionowej i wyeliminował potrzebę długotrwałego starzenia atramentu. Dynamiczne rozpraszanie światła (DLS) potwierdziło, że podejście to ograniczyło niekontrolowany wzrost koloidów, który w przeciwnym razie powodowałby degradację jakości warstwy w czasie. Otrzymane drukowane warstwy charakteryzowały się gładką morfologią pozbawioną defektów punktowych (typu pinhole) o chropowatości $R_a = 5,8\text{ nm}$ oraz wysoką krystalicznością fazy α perowskitu. Elastyczne ogniwa p-i-n (architektura: PET/IZO/PEDOT:PSS/perowskit/ C_{60} /BCP/Ag) zawierające drukowane atramentowo warstwy perowskitu osiągnęły sprawność PCE na poziomie 11,4% oraz ustabilizowaną sprawność wynoszącą 10,9% na powierzchni aktywnej 1 cm^2 (Rysunek 13). Wynik ten stanowił demonstrację pełnego procesu technologicznego – od syntezy atramentu do gotowego ogniwa – z wykorzystaniem

kompatybilnego przemysłowo, bezpiecznego przetwarzania w warunkach otoczenia, skutecznie łącząc chemię roztworów w skali laboratoryjnej ze skalowalną produkcją elastycznych ogniw fotowoltaicznych.



Rysunek 13. (a) Widma fotoluminescencji stacjonarnej oraz (b, c) obrazy SEM drukowanych atramentowo warstw perowskitu dla dwóch zoptymalizowanych formułacji; (d) charakterystyki J-V i (e) ustabilizowana sprawność rekordowych elastycznych ogniw (1 cm^2 , podłoże PET); (f) widma zewnętrznej wydajności kwantowej (EQE). Przedrukowano za zgodą z [H8]. Copyright 2021, American Chemical Society.

Wkład autora:

Kandydat był kierownikiem badań i autorem korespondencyjnym wszystkich trzech publikacji: [H6], [H7] i [H8]. Jako dyrektor naukowy Saule Technologies oraz kierownik projektu w Saule Research Institute inicjował i kierował strategią badawczą każdego z tych projektów. Jego wkład obejmował kompleksowe zarządzanie naukowe i bezpośredni nadzór nad zespołem badawczym (w tym nad pierwszymi autorami prac: V. Babu, P. Spinellim i B. Wilk). Aktywnie kierował kluczowymi etapami rozwoju technologicznego w poszczególnych badaniach. Ponadto nawiązał i koordynował specjalistyczną współpracę zewnętrzną niezbędną do realizacji tych prac. Obejmowało to integrację pomiarów przejściowych charakterystyk fotoelektrycznych realizowanych przez grupę prof. A. Di Carlo (Università degli Studi di Roma Tor Vergata) oraz spektroskopii impedancyjnej z grupy prof. F. Fabregat-Santiago (Universitat Jaume I) w pracy [H6], a także wdrożenie modelowania DFT i analizy NMR we współpracy odpowiednio z grupami dr F. Nunzi (CNR-SCITEC) i prof. S. Mathura (Universität Köln) w publikacji [H8].

Badania opisane we wszystkich trzech publikacjach realizowane były w laboratoriach Saule Technologies i Saule Research Institute we Wrocławiu. Prace były finansowane ze środków następujących grantów, w których kandydat pełnił funkcję kierownika projektu: dla [H6] – First Team (FNP) oraz Maestro (Horizon 2020 MSCA-ITN); dla [H7] – First Team (FNP), Barrier Foil (NCBR) oraz Stratos (NCBR); dla [H8] – First Team (FNP), Opus12 (NCN) oraz Espresso (Horizon 2020)

Po opracowaniu zróżnicowanych architektur ogniw, rozwiązań elektrodowych oraz skalowalnych metod osadzania warstw, kluczową barierą stojącą na drodze do komercjalizacji pozostała długoterminowa stabilność operacyjna. W kolejnym rozdziale podjęto to wyzwanie poprzez realizację dwóch komplementarnych strategii: wewnętrznej stabilizacji materiału perowskitowego za pomocą modyfikacji ukrytej granicy faz [H9] oraz ochrony zewnętrznej z wykorzystaniem zaawansowanego protokołu hermetyzacji [H10].

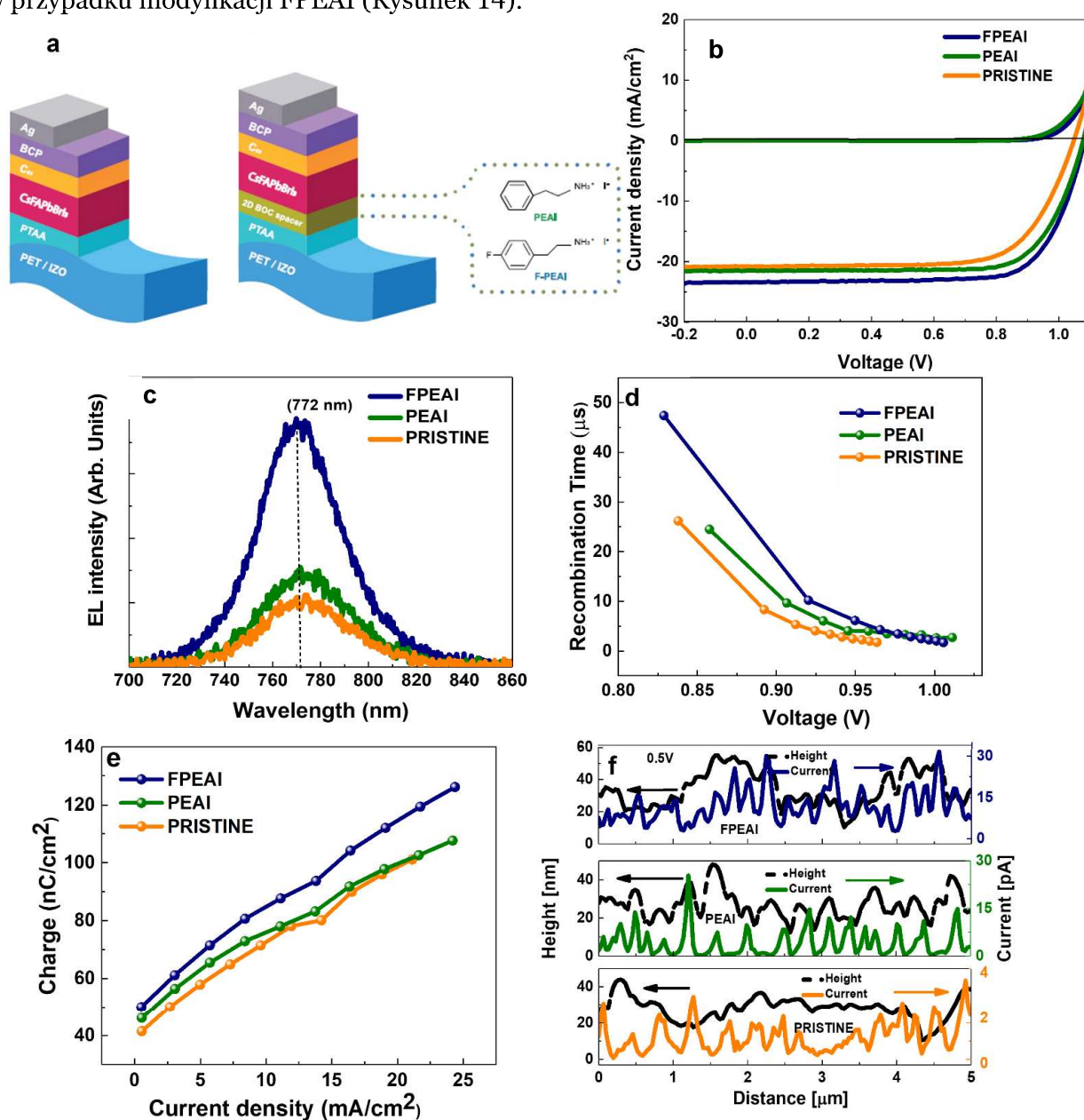
4.3.5. Inżynieria stabilności: modyfikacja interfejsu i hermetyzacja

W niniejszym rozdziale omówiono dwie komplementarne strategie poprawy stabilności ogniw. Pierwsza z nich, przedstawiona w publikacji [H9], dotyczy wewnętrznych przyczyn degradacji zachodzącej na ukrytej granicy faz perowskit/warstwa transportująca dziury. W publikacji [H10] wprowadzono dedykowaną strukturę hermetyzacji elastycznych ogniw oraz zweryfikowano odporność kompletnego układu w warunkach przyspieszonych testów starzeniowych zgodnych z normą IEC 61215.

4.3.5.1. Modyfikacja ukrytej granicy faz wielkogabarytowymi kationami organicznymi [H9]

Rekombinacja niepromienista na granicach faz między absorberem perowskitowym a warstwami selektywnymi dla ładunków pozostaje jednym z głównych mechanizmów strat ograniczających zarówno sprawność, jak i stabilność ogniw. Ukryta granica faz między warstwą transportującą a perowskitem jest szczególnie problematyczna, ponieważ formuje się podczas krystalizacji perowskitu i pozostaje niedostępna dla poosadzeniowej modyfikacji powierzchni. W pracy [H9] granicę tę zmodyfikowano poprzez naniesienie cienkiej warstwy wielkogabarytowych kationów organicznych (BOC). Osadzono cienką warstwę jodku fenyloetyloamoniowego (PEAI) lub jodku 4-fluorofenyloetyloamoniowego (FPEAI) na powierzchnię PTAA (poli(triaryloaminy), będącej powszechnie stosowaną warstwą HTL w architekturach p-i-n, przed wzrostem warstwy perowskitu. Symulacje w ramach teorii funkcjonalu gęstości (DFT), przeprowadzone we współpracy z grupą F. De Angelisa (CNR-SCITEC), wykazały, że zarówno PEAi, jak i FPEAI pasywują nieskoordynowane centra Pb i I na powierzchni perowskitu, wykazując korzystne energie pasywacji. Co istotne, obliczenia struktury elektronowej wykazały znaczące obniżenie poziomu Fermiego ($\sim 0,5$ eV) dla układu pasywowanego FPEAI, co zapewnia większą siłę napędową dla wstrzykiwania dziur do warstwy PTAA. Dyfrakcja rentgenowska (XRD) próbek perowskitu z odsłoniętą ukrytą granicą faz wykazała wyraźne refleksy przy małych kątach ($5-6^\circ$), przypisane do płaszczyzn krystalograficznych (002) warstwowej fazy perowskitu 2D. Potwierdza to, że wielkogabarytowe kationy wbudowują się w sieć perowskitu na granicy z PTAA, a nie jedynie tworzą amorficzną warstwę pośrednią. Analiza Williamsona-Halla wykazała ponadto, że warstwy zmodyfikowane za pomocą FPEAI charakteryzują się większymi rozmiarami krystalitów i mniejszymi naprężeniami sieciowymi, co w obu przypadkach wskazuje na poprawę jakości krystalograficznej.^{17,18}

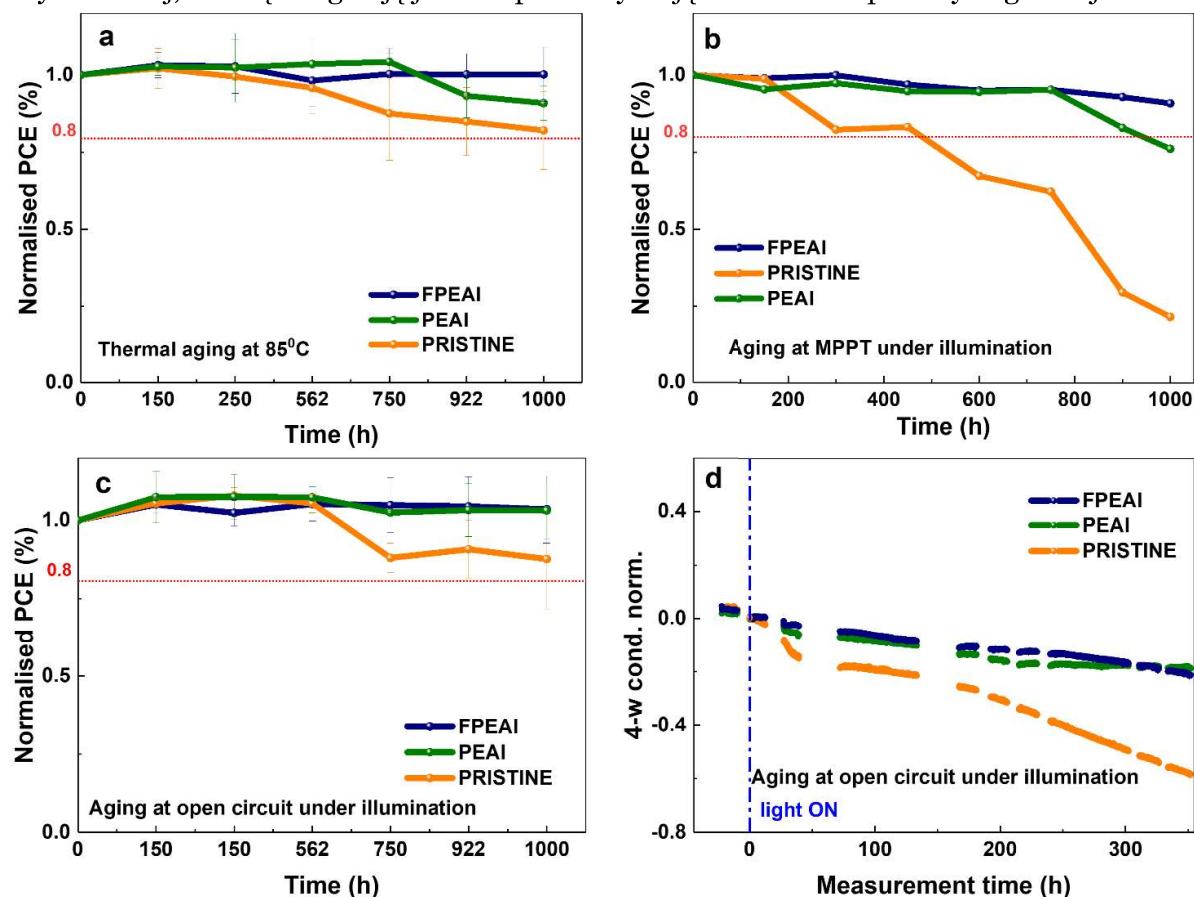
Optoelektroniczne skutki modyfikacji granicy faz okazały się znaczące. Pomiary zaniku fotoluminescencji z rozdzielczością czasową (TRPL) na próbkach z odsłoniętą granicą faz wykazały trzykrotny wzrost czasu życia nośników ładunku w warstwach zmodyfikowanych, co bezpośrednio dowodzi ograniczenia rekombinacji niepromienistej na ukrytej granicy faz. Intensywność elektroluminescencji w warunkach polaryzacji w kierunku przewodzenia była ponad dwukrotnie wyższa dla ogniw zmodyfikowanych FPEAI. Pomiary fotonapięcia przejściowego (TPV) potwierdziły wydłużenie czasu życia nośników, natomiast pomiary fotoprądu przejściowego (TPC) oraz mikroskopia sił atomowych w trybie przewodzącym (c-AFM) wykazały efektywniejszą ekstrakcję dziur w przypadku modyfikacji FPEAI (Rysunek 14).



Rysunek 14. (a) Schemat urządzenia p-i-n z modyfikacją obszernymi kationami organicznymi na zakrytym interfejsie; (b) krzywe J-V rekordowych urządzeń z modyfikacją i bez (1 cm², PET); (c) widma elektroluminescencji przy polaryzacji 2 V w kierunku przewodzenia; (d) czasy życia rekombinacji z przejściowego fotoapięcia; (e) wyekstrahowana gęstość ładunku z pomiarów przejściowego fotopadu; (f) wartości fotopadu i profile morfologiczne wprowadzone z pomiarów c-AFM warstw perowskitu hodowanych na różnych modyfikacjach powierzchni. Przedrukowano (zaadaptowano) za zgodą z [H9]. Copyright 2022, American Chemical Society.

Elastyczne ogniwa (PET/IZO/PTAA/Cs_{0.17}FA_{0.83}Pb(I_{0.9}Br_{0.1})₃/C₆₀/BCP/Ag, o powierzchni 1 cm²) z modyfikacją FPEAI osiągnęły rekordową sprawność PCE na poziomie 18,66%, co stanowi istotny wzrost w porównaniu z ogniwami referencyjnymi (PCE 16,03%). Najbardziej uderzający wpływ modyfikacji odnotowano w obszarze długoterminowej stabilności. Podczas starzenia termicznego w temperaturze 85 °C (w atmosferze N₂) ogniwa zmodyfikowane FPEAI zachowały niemal 100% swojej początkowej sprawności PCE po 1000 godzinach, podczas gdy ogniwa referencyjne utrzymały jedynie 80%. W trakcie ciągłej pracy w punkcie maksymalnej mocy ogniwa z FPEAI zachowały ponad 90% początkowej sprawności po 1000 godzinach, podczas gdy sprawność ogniw niemodyfikowanych spadła poniżej 30%. Podczas naświetlania w stanie obwodu otwartego, ogniwa z FPEAI nie wykazały mierzalnej degradacji przez 1000 godzin (Rysunek 15).

W celu wyjaśnienia mechanizmu wzrostu stabilności opracowano test uwalniania jodu, w którym monitorowano przewodność warstwy srebra zalaminowanej w pobliżu powierzchni perowskitu podczas naświetlania. W próbkach referencyjnych zaobserwowano szybki spadek przewodności Ag (co wskazuje na intensywne wydzielanie I₂), podczas gdy w strukturach zmodyfikowanych FPEAI zmiany przewodności zachodziły znacznie wolniej (Rysunek 15d). Rentgenowska spektroskopia fotoelektronów (XPS) potwierdziła, że stosunek atomowy I/Pb w warstwach referencyjnych zmniejszył się z 2,55 do 1,64 po 1000 godzinach naświetlania (co jest spójne ze stratą jodu), podczas gdy warstwy zmodyfikowane FPEAI zachowały wyjściową stechiometrię. Wyniki te dowodzą, że heterozłącze 2D/3D na ukrytej granicy faz skutecznie blokuje jony halogenkowe w węzłach sieci krystalicznej, tłumiąc migrację jonów i powstrzymując kaskadowe procesy degradacji.



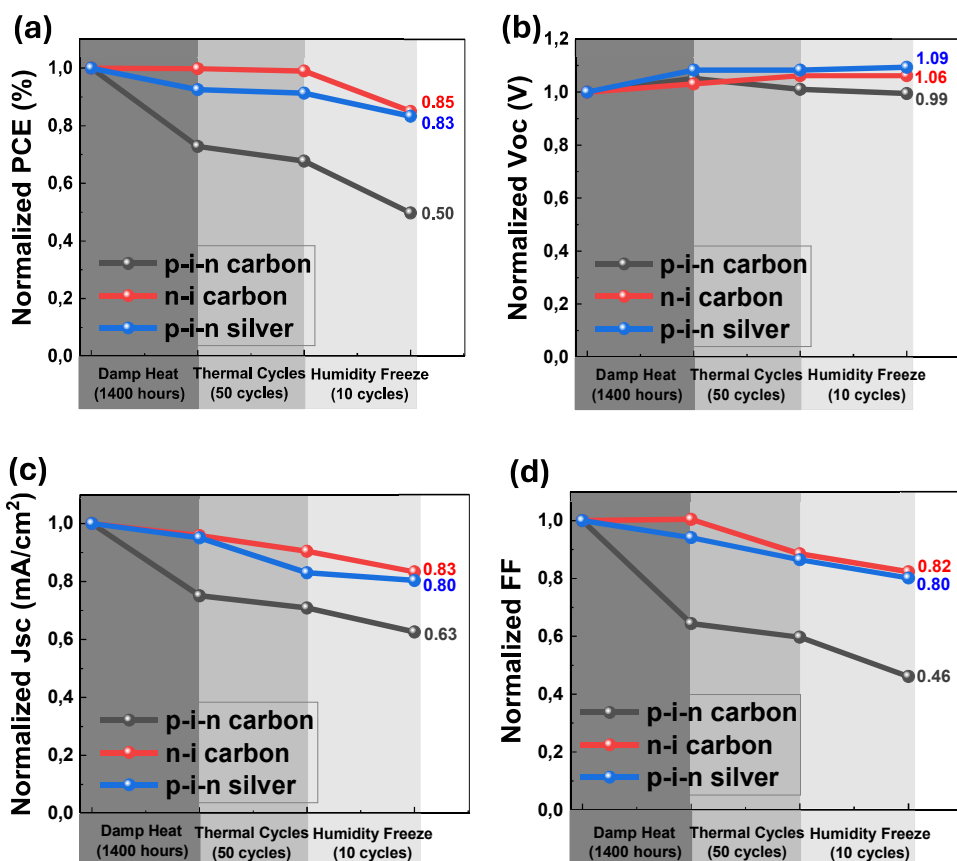
Rysunek 15. Zmiany w czasie znormalizowanej sprawności konwersji energii dla trzech wariantów ogniw podczas: (a) starzenia termicznego w temperaturze 85 °C, (b) ciągłej pracy w punkcie maksymalnej mocy oraz (c) naświetlania w stanie obwodu otwartego. (d) Znormalizowana przewodność Ag w funkcji czasu naświetlania, wskazująca na szybkość

4.3.5.2. Protokół hermetyzacji elastycznych perowskitowych ogniw słonecznych [H10]

Wewnętrzna inżynieria granic faz poprawia odporność ogniwa, jednak praktyczne wdrożenie elastycznej fotowoltaiki perowskitowej wymaga dodatkowo skutecznej ochrony przed czynnikami środowiskowymi, w szczególności przed wilgocią i tlenem. W pracy [H10] opracowano kompleksowy protokół hermetyzacji dla elastycznych perowskitowych ogniw słonecznych o dużej powierzchni (1 cm^2) i poddano go weryfikacji w standardowych przemysłowych testach przyspieszonego starzenia. W badaniach najpierw określono bazową, wewnętrzną stabilność termiczną różnych architektur ogniw. Wybrano perowskit o składzie dwukationowym, wolny od kationów metyloamoniowych (MA) ($\text{Cs}_{0.1}\text{FA}_{0.9}\text{Pb}(\text{I}_{0.94}\text{Br}_{0.06})_3$), ze względu na jego wyższą stabilność termiczną w porównaniu z powszechnie stosowanymi recepturami trójkationowymi. Analiza XRD potwierdziła, że podczas starzenia w temperaturze $85\text{ }^\circ\text{C}$ skład bez MA w znacznie mniejszym stopniu ulega degradacji do PbI_2 . Wytworzono trzy konfiguracje ogniw: p-i-n z elektrodą Ag (PCE 14,24%), p-i-n z elektrodą węglową (PCE 10,51%) oraz n-i bez HTM (materiał transportujący dziury) z elektrodą węglową (PCE 9,80%). Należy podkreślić, że we wszystkich konfiguracjach zastosowano modyfikację ukrytej granicy faz za pomocą FPEAI, opisaną wcześniej w pracy [H9].

Układ warstw hermetyzujących był optymalizowany iteracyjnie. Klej utwardzany promieniowaniem UV zapewniał połączenie między ogniwem a komercyjnie dostępnymi foliami barierowymi (o współczynniku przenikania pary wodnej, WVTR, rzędu $5,5 \times 10^{-3}\text{ g m}^{-2}\text{ dzień}^{-1}$). Bezpośrednia laminacja kontaktu węglowego była problematyczna, ponieważ porowata warstwa węglowa wchłaniała płynny klej, co prowadziło do izolacji elektrycznej kontaktu. Problem ten rozwiązano poprzez wprowadzenie przed aplikacją kleju hydrofobowej warstwy buforowej na bazie PDMS, pokrytej cienką folią PET. Krytyczne okazało się również uszczelnienie krawędzi: pasta silikonowa wykazała wyższą skuteczność w blokowaniu bocznego przenikania wilgoci niż taśmy z poliizobutylenem (PIB), co potwierdzono za pomocą dokumentacji fotograficznej i badań XRD hermetyzowanych warstw perowskitu poddanych działaniu wilgotnego ciepła (damp-heat).

Zoptymalizowaną strukturę hermetyzacji zastosowano do wszystkich trzech architektur ogniw, które następnie poddano sekwencji testów przyspieszonego starzenia zgodnie z normą niezawodnościową IEC 61215:2016. Przyjęty protokół obejmował trzy następujące po sobie testy: test wilgotnego ciepła przez 1400 godzin ($85\text{ }^\circ\text{C}$, 85% RH), 50 cykli termicznych (od $-40\text{ }^\circ\text{C}$ do $85\text{ }^\circ\text{C}$) oraz 10 cykli zamrażania w obecności wilgoci (humidity-freeze) (Rysunek 16). Ogniwa węglowe n-i (bez HTM) nie wykazały spadku sprawności w trakcie całego testu wilgotnego ciepła, odnotowując wręcz nieznaczny wzrost PCE, który przypisano poprawie rezystancji kontaktu węgiel/perowskit pod wpływem długotrwałego ogrzewania. Ogniwa p-i-n z elektrodami Ag w dużej mierze zachowały swoją początkową sprawność. Najlepsze ogniwa (węglowe w konfiguracji n-i) zachowały ponad 85% początkowego PCE po pełnej sekwencji starzenia.



Rysunek 16. Zmiany w czasie znormalizowanych parametrów fotowoltaicznych hermetyzowanych, elastycznych perowskitowych ogniw słonecznych o trzech różnych konfiguracjach podczas sekwencyjnych testów starzeniowych, zgodnych z normą IEC 61215:2016: test wilgotnego ciepła (damp-heat, 85 °C / 85% RH, 1400 h), cykle termiczne (thermal-cycling, od -40 do 85 °C, 50 cykli) oraz test zamrażania w obecności wilgoci (humidity-freeze, 10 cykli). Zaadaptowano za zgodą z [H10]. Copyright 2020, Wiley-VCH GmbH.

Test zamrażania w obecności wilgoci okazał się najbardziej agresywny, powodując degradację sprawności o około 14% nawet w przypadku najbardziej stabilnej architektury węglowej n-i. Straty te wynikały głównie z obniżenia wartości FF i J_{sc} , co wskazuje na naprężeniowe rozwarstwienie (delaminację) na granicach faz wewnątrz układu hermetyzującego. Wyniki te wskazują, że termomechaniczna integralność granic faz stanowi krytyczny czynnik w rozwoju elastycznych ogniw nowej generacji.

Wkład autora:

Kandydat był kierownikiem badań i autorem korespondencyjnym publikacji [H9] i [H10]. Zaprojektował program badań nad stabilnością wewnętrzną i zewnętrzną, kierował całym procesem rozwoju technologicznego, bezpośrednio nadzorował prace S. Dasgupty i T. Ahmada w Saule Technologies oraz Saule Research Institute, a także koordynował współpracę z grupami prof. A. Di Carlo (Università degli Studi di Roma Tor Vergata), prof. F. De Angelisa (CNR-SCITEC), prof. J. Serafińczuka (Politechnika Wrocławska), dr. M. Trzcińskiego (Politechnika Bydgoska) i prof. A. Dudkowiak (Politechnika Poznańska).

Oba cykle badań były finansowane ze środków następujących grantów, w których kandydat pełnił funkcję kierownika projektu: First Team (FNP) oraz Espresso (Horyzont 2020).

Wyniki zaprezentowane w pracach [H9] i [H10] wyznaczają ważny krok w kierunku poprawy niezawodności elastycznych perowskitowych ogniw słonecznych. Wzmocnienie ukrytej granicy faz perowskit/HTM poprzez uformowanie heterozłącza 2D/3D skutecznie tłumi migrację jonów i zapobiega ubytkowi halogenków [H9]. Zewnętrzna hermetyzacja z wykorzystaniem zoptymalizowanych folii barierowych, hydrofobowych warstw buforowych oraz silikonowych uszczelnień krawędzi zapewnia skuteczną ochronę przed czynnikami środowiskowymi [H10]. Połączenie tych dwóch podejść pozwoliło po raz pierwszy na wytworzenie elastycznych perowskitowych ogniw słonecznych o dużej powierzchni, zdolnych do pomyślnego przejścia testów przyspieszonego starzenia zgodnie ze standardami przemysłowymi.

4.3.6. Elastyczna pełnoperowskitowa fotowoltaika tandemowa

Jednozłączowe ogniwa perowskitowe, nawet przy najwyższym poziomie rozwoju technologicznego, są ostatecznie ograniczone przez limit Shockleya–Queissera wynoszący około 33%.¹⁹ Architektury wielozłączowe, w których perowskit o szerokiej przerwie energetycznej (WBG) jest łączony z perowskitem Sn-Pb o wąskiej przerwie energetycznej (NBG), oferują teoretyczny limit sprawności przekraczający 40% dla dwóch złączy i stanowią praktyczną drogę do przewyższenia technologii krzemowej zarówno pod względem sprawności, jak i formatu ogniwa.²⁰ Przeniesienie tej koncepcji na skalę elastycznych modułów o znaczeniu przemysłowym wymaga jednoczesnego opanowania skalowalnych metod nanoszenia warstw, odpowiedniego łączenia szeregowego ogniw w module, hermetyzacji, fotostabilnych kompozycji perowskitów WBG oraz stabilności operacyjnej absorbera NBG. Chociaż powstrzymanie wewnętrznej degradacji perowskitów NBG pozostaje otwartym wyzwaniem badawczym dla całej dziedziny, w pracach [H11] i [H12] rozwiązano cztery pierwsze problemy. Wykazano to początkowo na poziomie czterokontaktowego (4T) modułu z układem tandemowym o powierzchni 50 cm² złożonym w stos, a następnie na poziomie dwukontaktowego (2T) ogniwa z absorberem WBG poddanym inżynierii składu i modyfikacji granic faz, co umożliwiło osiągnięcie sprawności PCE na poziomie 22,5% w elastycznym układzie monolitycznym.

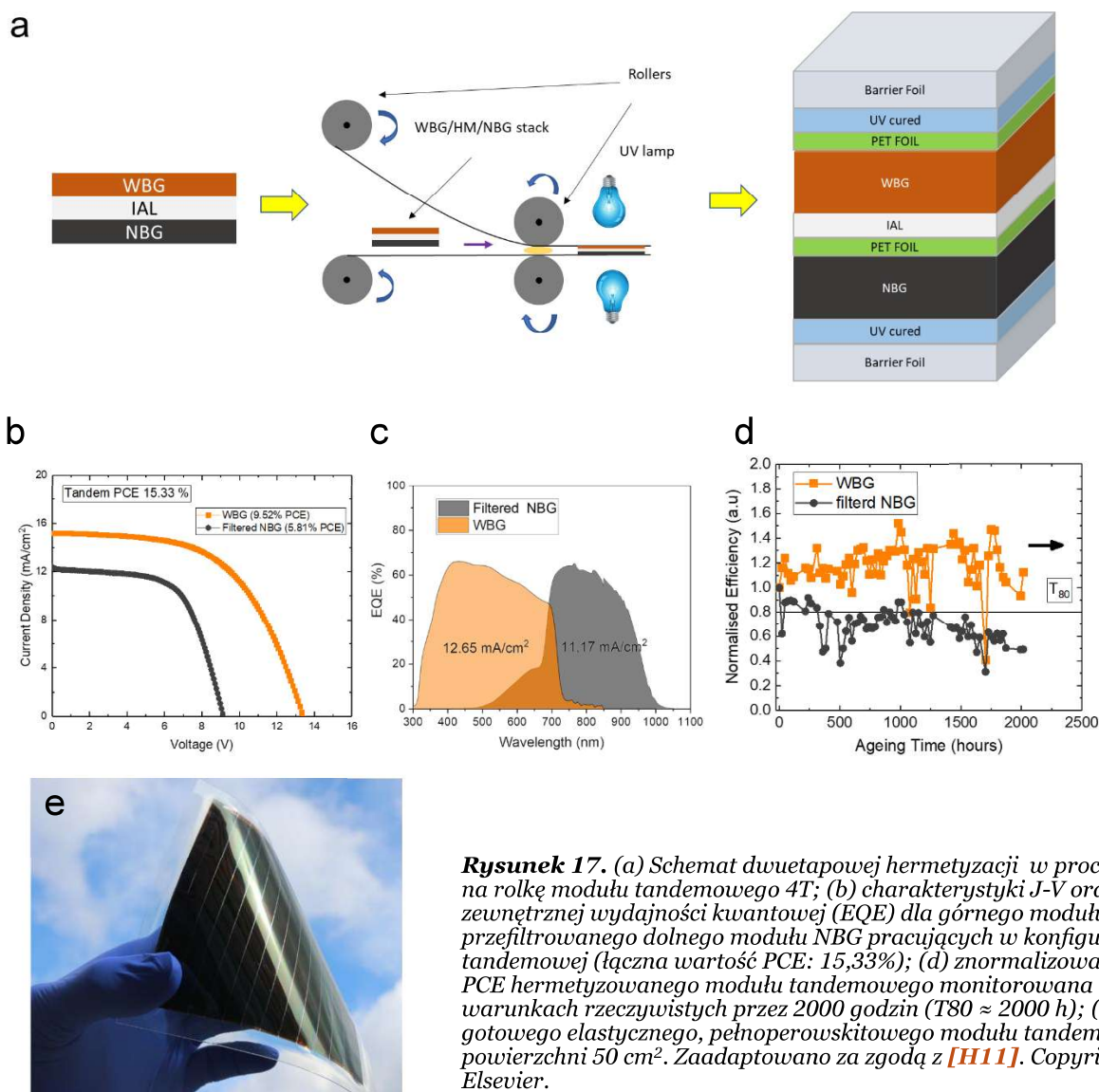
4.3.6.1. Skalowanie czterokontaktowego pełnoperowskitowego modułu tandemowego [H11]

W pracy [H11] zaprezentowano pierwszy czterokontaktowy (4T) pełnoperowskitowy moduł tandemowy na podłożu elastycznym. W górnym sub-module WBG zastosowano perowskit o składzie $\text{Cs}_{0.17}\text{FA}_{0.83}\text{Pb}(\text{I}_{0.7}\text{Br}_{0.3})_3$ ($E_g = 1,72 \text{ eV}$) w układzie warstw n-i-p PET/ITO/SnO₂/perowskit/spiro-OMeTAD/VO_x/IMI, powtórnie wykorzystując przezroczystą elektrodę tylną ITO-metal-ITO opracowaną w [H7]. W dolnym sub-module NBG zastosowano perowskit $\text{FA}_{0.75}\text{Cs}_{0.25}\text{Pb}_{0.6}\text{Sn}_{0.4}\text{I}_3$ ($E_g = 1,25 \text{ eV}$) w układzie p-i-n PET/ITO/PEDOT:PSS/perowskit/C₆₀/BCP/Cu z zastosowaniem dodatków przeciwutleniających. Obie warstwy perowskitu naniesiono na podłoża elastyczne techniką raklowania, co pozwoliło na osiągnięcie rekordowych sprawności PCE na poziomie 10,23% (WBG) i 12,39% (NBG) dla ogniw o powierzchni 1 cm².

Minimoduły uformowano wykorzystując sekwencję trasowania laserowego (P1-P2) oraz przy użyciu maski cieniowej do depozycji tylnej elektrody (P3), uzyskując geometryczny współczynnik wypełnienia na poziomie 60% dla podłoży o powierzchni 54 cm². Elastyczne moduły WBG i NBG osiągnęły PCE rzędu odpowiednio 9,69% i 9,28%, z pomijalną utratą sprawności w stosunku do parametrów pojedynczych ogniw. Oba moduły załaminowano mechanicznie w układ tandemowy 4T, wprowadzając warstwę polimeru dopasowującego współczynnik załamania światła. Układ

tandemowy zabezpieczono dwuetapowym procesem hermetyzacji typu z rolki na rolkę (roll-to-roll), nakładając na obie zewnętrzne powierzchnie optycznie przezroczyste folie barierowe o niskim współczynniku WVTR. Ukończony elastyczny pełnoperowskitowy moduł tandemowy o powierzchni 50 cm² osiągnął rekordowe PCE wynoszące 15,33% (Rysunek 17).

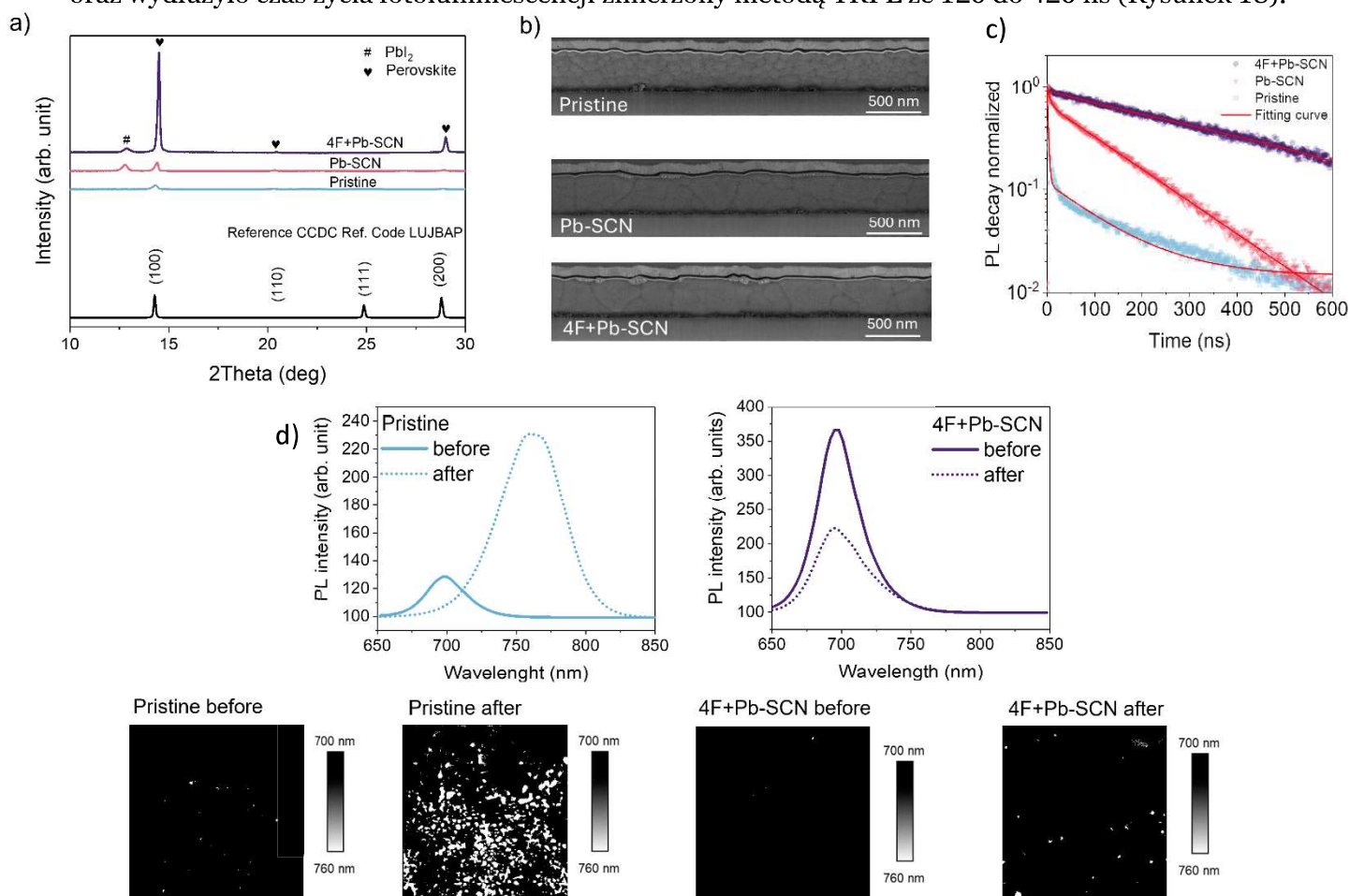
W końcowym etapie badań zoptymalizowany układ modułu tandemowego poddano starzeniu termicznemu (70 °C przez 650 godzin) oraz testom niezawodności operacyjnej w warunkach zewnętrznych (2000 godzin ze śledzeniem punktu maksymalnej mocy, w połączeniu ze stacją meteorologiczną monitorującą w sposób ciągły natężenie światła, temperaturę i wilgotność). Podczas testu termicznego ogniwo WBG zachowało 90% początkowej sprawności i nie uległo mierzalnej degradacji podczas testu w warunkach rzeczywistych. Z kolei sub-moduł NBG zachował 80% początkowej sprawności po starzeniu termicznym i 60% po testach na zewnątrz. Choć wyniki te stanowią bardzo obiecujące potwierdzenie użyteczności badanej koncepcji, podkreślają jednocześnie konieczność dalszej optymalizacji pod kątem wewnętrznej stabilności perowskitów NBG.



Rysunek 17. (a) Schemat dwuetapowej hermetyzacji w procesie z rolki na rolkę modułu tandemowego 4T; (b) charakterystyki J-V oraz (c) widma zewnętrznej wydajności kwantowej (EQE) dla górnego modułu WBG i przefiltrowanego dolnego modułu NBG pracujących w konfiguracji tandemowej (łączna wartość PCE: 15,33%); (d) znormalizowana wartość PCE hermetyzowanego modułu tandemowego monitorowana w warunkach rzeczywistych przez 2000 godzin (T₈₀ ≈ 2000 h); (e) fotografia gotowego elastycznego, pełnoperowskitowego modułu tandemowego 4T o powierzchni 50 cm². Zaadaptowano za zgodą z [H11]. Copyright 2022, Elsevier.

4.3.6.2. Inżynieria składu i granic faz elastycznych perowskitów o szerokiej przerwie energetycznej [H12]

Konfiguracja 4T [H11] potwierdziła wykonalność elastycznego pełnoperowskitowego ogniwa tandemowego, jednak jest ona wewnętrznie ograniczona przez optyczne i elektryczne straty na granicach faz układu złożonego mechanicznie w stos. Aby wyeliminować to ograniczenie, w pracy [H12] rozwinięto architekturę dwukontaktową (2T, monolityczną). Ponadto podjęto zagadnienie fotostabilności perowskitów WBG o wysokiej zawartości bromków,^{21,22} koncentrując się na składzie wolnym od kationów metyloamoniowych (MA): $\text{Cs}_{0.2}\text{FA}_{0.8}\text{Pb}(\text{I}_{0.65}\text{Br}_{0.35})_3$ ($E_g = 1,76$ eV). Wewnętrzna segregacja halogenków w strukturach o mieszanym składzie halogenkowym została stłumiona dzięki synergicznemu zastosowaniu dodatków: jodku 4-fluorofenyletyloamoniowego (4FPEAI) oraz tiocyjanianu ołowiu ($\text{Pb}(\text{SCN})_2$). Dodatek $\text{Pb}(\text{SCN})_2$ ogranicza migrację defektów jonowych i wspomaga wzrost krystalitów o większych rozmiarach, podczas gdy 4FPEAI redukuje nadmiar PbI_2 i pasywuje granice ziaren perowskitu. Zastosowanie obu tych związków wyeliminowało odwracalne przesunięcie ku czerwieni sygnału fotoluminescencji (PL), obserwowane w warstwach referencyjnych podczas trwającego 1000 godzin testu starzenia pod ciągłym naświetleniem (o natężeniu 1 słońca), oraz wydłużyło czas życia fotoluminescencji zmierzony metodą TRPL ze 120 do 420 ns (Rysunek 18).

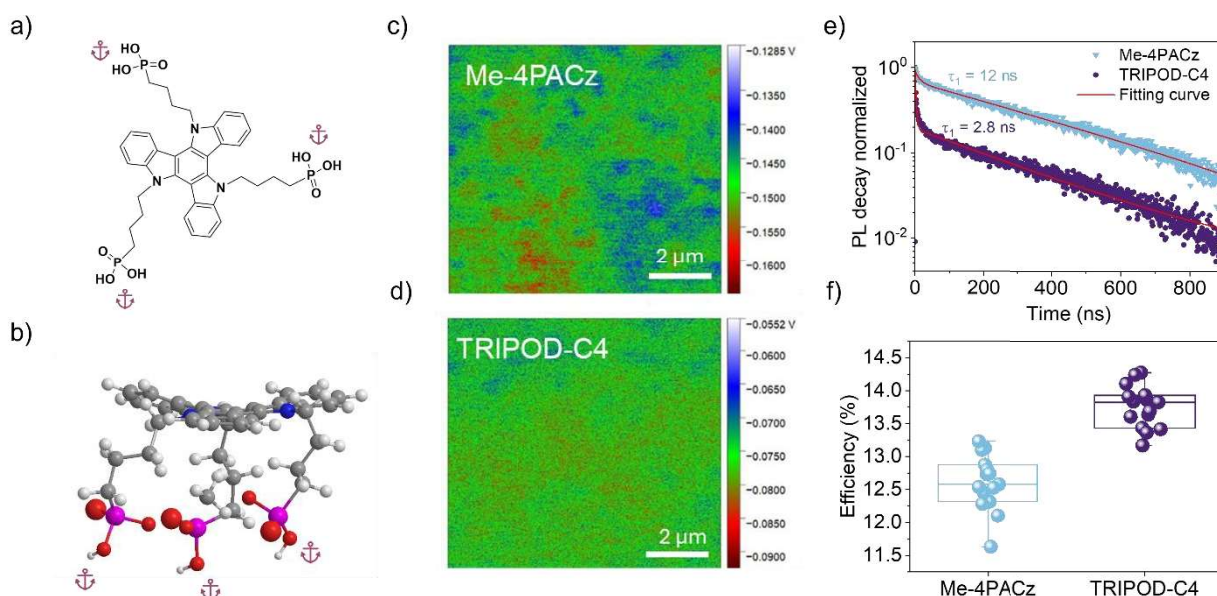


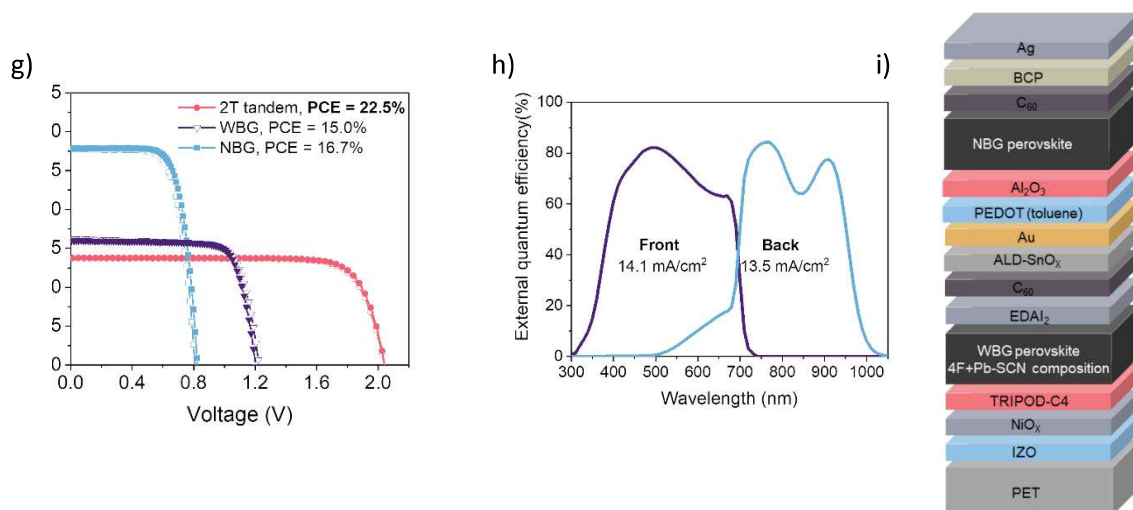
Rysunek 18. (a) Dyfraktogramy rentgenowskie, (b) przekrojowe obrazy FIB-SEM oraz (c) zaniki fotoluminescencji z rozdzielczością czasową (TRPL) dla warstw perowskitu WBG o składzie referencyjnym oraz modyfikowanym dodatkami; widma PL i (e) przestrzennie rozdzielone mapy PL przed i po 1000 h starzenia pod wpływem ciągłego naświetlania w stanie obwodu otwartego w atmosferze obojętnej, wykazujące eliminację efektu segregacji halogenków wyłącznie dla receptury 4F + Pb-SCN. Zaadaptowano z [H12] za zgodą The Royal Society of Chemistry.

Drugą kluczową innowacją opisaną w [H12] jest kontakt selektywny dla dziur. Choć samoorganizujące się monowarstwy (SAM) oparte na pochodnych karbazolu, takie jak Me-4PACz, umożliwiły uzyskanie rekordowych sprawności w monolitycznych ogniwach tandemowych krzem/perowskit,²³ ich jednokleszczowa grupa kotwicząca oparta na kwasie fosfonowym ulega desorpcji z powierzchni tlenku metalu pod wpływem długotrwałego obciążenia termicznego.^{24,25} Aby wyeliminować tę niestabilność, zaprojektowano monowarstwę SAM wyposażoną w trzy grupy kotwiczące, oznaczoną jako TRIPOD-C4. Dzięki obecności trzech grup kwasu fosfonowego osadzonych na sztywnym łączniku, TRIPOD-C4 zapewnił pełne i jednorodne pokrycie powierzchni planarnego tlenku niklu, co potwierdzono za pomocą mikroskopii sił Kelvina w trybie modulacji amplitudy (AM-KPFM). Nowy materiał poprawił również skuteczność ekstrakcji fotogenerowanych dziur, co wykazano poprzez szybszy zanik fotoluminescencji, oraz zwiększył sprawność fotowoltaiczną ogniw w porównaniu do struktur opartych na Me-4PACz (Rysunek 19).

W połączeniu ze zoptymalizowaną za pomocą dodatków warstwą absorbera WBG, monowarstwa TRIPOD-C4 pozwoliła na wytworzenie elastycznego jednozłączowego ogniwa WBG 1 cm², podłoże PET) o sprawności PCE wynoszącej 15%. W warunkach ciągłego naświetlania ogniwo osiągnęło parametr T90 (czas, po którym sprawność spada do 90% wartości początkowej) na poziomie 2400 godzin w temperaturze 40 °C oraz T85 równe 1200 godzin w bardziej agresywnej temperaturze 65 °C, co w momencie publikacji pracy stanowiło wynik bezprecedensowy dla perowskitów WBG o wysokiej zawartości bromków.

Ostatecznie, integracja górnego ogniwa WBG ze zoptymalizowanym sub-ogniwem NBG (o składzie FA_{0.75}Cs_{0.25}Pb_{0.6}Sn_{0.4}I₃) w monolitycznej konfiguracji 2T pozwoliła na uzyskanie elastycznego pełnoperowskitowego ogniwa tandemowego o sprawności PCE rzędu 22,5% na powierzchni 1 cm², co jednoznacznie dowodzi wykonalności i potencjału wielozłączowych elastycznych architektur fotowoltaicznych. Rekordowe elastyczne ogniwo tandemowe wykazało napięcie obwodu otwartego (V_{oc}) przy skanowaniu powrotnym na poziomie 2,03 V, co świadczy o wydajnym szeregowym połączeniu sub-ogniw WBG i NBG oraz dobrym dopasowaniu prądowym między oboma złączami, potwierdzonym pomiarami zewnętrznej wydajności kwantowej (EQE) (Rysunek 19).





Rysunek 19. (a-b) Struktura molekularna selektywnej dla dziur monowarstwy SAM typu TRIPOD-C4 wyposażonej w trzy grupy kotwiczące; (c-d) mapy potencjału powierzchni AM-KPFM dla struktur NiO/Me-4PACz i NiO/TRIPOD-C4, wykazujące bardziej jednorodne pokrycie w przypadku monowarstwy z trzema grupami kotwiczącymi; (e) krzywe zaniku TRPL warstw perowskitu osadzonych na różnych monowarstwach SAM (naświetlanych od strony podłoża PET); (f) statystyka wartości PCE elastycznych perowskitowych ogniw słonecznych WBG z różnymi warstwami HTL-SAM (1 cm², podłoże PET); (g) charakterystyki J-V rekordowego elastycznego ogniwa tandemowego (22,5% PCE, 1 cm²); (h) widma EQE górnego sub-ogniwa WBG i dolnego sub-ogniwa NBG wraz ze zintegrowaną gęstością prądu zwarcia (J_{sc}); (i) schemat przekroju poprzecznego elastycznego, dwukontaktowego (2T) pełnoperowskitowego ogniwa tandemowego. Zaadaptowano z [H12] za zgodą The Royal Society of Chemistry.

Wkład autora:

Kandydat był głównym badaczem i autorem korespondencyjnym zarówno [H11], jak i [H12]. Zaprojektował program elastycznego tandemu – obejmujący zarówno projekty 4-terminalowe, jak i 2-terminalowe – w Saule Technologies i Saule Research Institute (SRI). Jego wkład obejmował konceptualizację i kierowanie wszystkimi głównymi zadaniami badawczymi i przepływami pracy w zakresie opracowywania urządzeń. Poza bezpośrednim zarządzaniem wewnętrznym personelem badawczym w Saule i SRI, ustanowił i koordynował międzynarodową współpracę z grupą Fana Fu (Empa, Szwajcaria). Ponadto współtworzył wstępne szkice manuskryptów i prowadził procesy rewizji podczas recenzji. Kandydat był kierownikiem badań i autorem korespondencyjnym publikacji [H11] oraz [H12]. Zaprojektował program rozwoju elastycznych ogniw tandemowych, obejmujący zarówno konfiguracje czterokontaktowe, jak i dwukontaktowe, realizowany w Saule Technologies oraz Saule Research Institute (SRI). Jego wkład obejmował sformułowanie koncepcji naukowej oraz kierowanie wszystkimi kluczowymi zadaniami badawczymi i procesami technologicznymi w zakresie optymalizacji ogniw. Poza bezpośrednim zarządzaniem zespołem badawczym w firmie Saule i SRI, nawiązał i koordynował międzynarodową współpracę z grupą dr. Fana Fu (Empa, Szwajcaria). Ponadto współtworzył pierwotne wersje tekstów publikacji i zarządzał procesem ich korekty na etapie recenzji naukowej. Prace były finansowane ze środków następujących grantów, w których kandydat pełnił funkcję kierownika projektu: dla [H11] – First Team (FNP), Maestro (Horizon 2020 MSCA-ITN) oraz Stratos (NCBR); dla [H12] – Palace (NCN Opus-LAP) oraz Persofab (NCBR Lider).

Publikacje [H11] i [H12] wspólnie obrazują przejście od elastycznych ogniw perowskitowych jednozłączowych w kierunku zaawansowanych architektur wielozłączowych. Podczas gdy praca [H11] prezentuje skalowanie modułowe pełnoperowskitowego układu tandemowego 4T złożonego

mechanicznie w stos, publikacja [H12] stanowi przełom w zakresie sprawności na poziomie pojedynczego ogniwa dzięki zastosowaniu monolitycznej, elastycznej konstrukcji 2T. Te kamienie milowe stanowią silny argument za pozycjonowaniem elastycznych, wielozłączowych ogniw perowskitowych jako atrakcyjnej komercyjnie architektury fotowoltaicznej. Pozwala ona na połączenie zalet konstrukcyjnych elastycznych modułów jednozłączowych (niska masa, elastyczność mechaniczna, niskotemperaturowe procesy wytwarzania) z wysokimi sprawnościami konwersji energii, dostępnymi wyłącznie dla układów wielozłączowych.

4.3.7. Podsumowanie

Niniejsze osiągnięcie naukowe obejmuje dwanaście publikacji poświęconych opracowaniu wydajnych, stabilnych i skalowalnych perowskitowych ogniw słonecznych poprzez inżynierię granic faz, rozwój niskotemperaturowych procesów technologicznych oraz zastosowanie kompleksowych strategii skalowania. Cykl badawczy obrazuje postęp od wczesnych przełomów w niskotemperaturowym formowaniu warstw TiO_2 i modyfikacji heterozłącza fulerem C_{60} , poprzez systematyczny rozwój fulerenowych warstw ETL dla architektur n-i-p oraz p-i-n.

Kolejne prace stanowią aplikację tych fundamentalnych wyników w konstrukcji elastycznych ogniw. Objęły one wdrożenie elektrod węglowych i przezroczystych, drukowanie atramentowe z wykorzystaniem nietoksycznych rozpuszczalników, pasywację ukrytych granic faz oraz niezawodne protokoły hermetyzacji. Prace te obejmują pełny proces badawczy: od fizyki transferu ładunku na molekularnych granicach faz po przełomowe rozwiązania technologiczne w konstrukcji ogniw, czego zwieńczeniem jest pierwszy elastyczny, czterokontaktowy (4T) pełnoperowskitowy moduł tandemowy w skali przemysłowej (50 cm^2) oraz elastyczne, monolityczne ogniwo dwukontaktowe (2T) osiągające sprawność PCE na poziomie 22,5%.

Przejście od prac realizowanych w charakterze pierwszego autora [H1–H4] w trakcie studiów doktoranckich w Oksfordzie, do roli kierownika badań i autora korespondencyjnego w Saule Technologies oraz Saule Research Institute [H5–H12], dokumentuje rozwój kandydata jako niezależnego badacza, zdolnego do formułowania, kierowania i realizacji złożonych, wieloletnich programów badawczych we współpracy z międzynarodowymi konsorcjami.

Najważniejsze wyniki naukowe wybrane do osiągnięcia habilitacyjnego można podsumować następująco:

1. Zademonstrowano formowanie ogniw perowskitowych w temperaturze poniżej 150°C przy użyciu uprzednio zsyntetyzowanych nanocząstek TiO_2 , osiągając sprawność 15,9% w jednym z pierwszych w pełni niskotemperaturowych perowskitowych ogniw słonecznych i otwierając drogę do wykorzystania podłoży elastycznych. [H1]
2. Odkryto, że modyfikacja TiO_2 samoorganizującą się monowarstwą (SAM) z grupą terminalną C_{60} pasywuje stany pułapkowe na granicy faz, umożliwia wydajną ekstrakcję elektronów i pozwala na uzyskanie sprawności 17,3% przy znacząco zredukowanej histerezie; wprowadzono pomiar ustabilizowanej sprawności (SPO) jako standard w dziedzinie. Stanowiło to jedno z pierwszych wdrożeń warstw SAM jako skutecznych kontaktów selektywnych w perowskitowych ogniwach słonecznych – kierunek badań, który dekadę później pozostaje jednym z najbardziej aktywnych w tej dziedzinie. [H2]
3. Wykazano, że C_{60} w pełni zastępuje TiO_2 w funkcji zwartej warstwy typu n formowanej w temperaturze pokojowej; pomiary HAXPES potwierdziły korzystne dopasowanie energetyczne; zarejestrowano 500-godzinną stabilność pod obciążeniem, ujawniając wyraźną przewagę C_{60} nad TiO_2 . [H3]

4. Opisano sieciowalne pochodne fullerenu (dwie różne cząsteczki zaprojektowane we współpracy), które w wyniku sieciowania termicznego tworzą warstwy ETL odporne na rozpuszczalniki, rozwiązując problem ortogonalności rozpuszczalników w formowanej z roztworu architekturze n-i-p i zapewniając PCE na poziomie 16,6%. [H4]
5. Wprowadzono nową pochodną fullerenu (PCBC6), zoptymalizowaną pod kątem elastycznych ogniw p-i-n, osiągając rekordowe PCE 18,4% (1 cm²) na folii PET – jedną z najwyższych ówczesnie raportowanych wartości dla elastycznych ogniw perowskitowych p-i-n o dużej powierzchni. [H5]
6. Zademonstrowano stabilne, elastyczne ogniwa p-i-n wyposażone w węglowy kontakt tylny (15,18% na 1 cm², 1000 godzin stabilności operacyjnej i termicznej), skutecznie eliminując problem korozji na granicy faz metal/perowskit. [H6]
7. Opracowano współrozpylane, przezroczyste elektrody IMI z ultracienką warstwą Cu/Ag (78,5% przepuszczalności w zakresie NIR, stabilność przez >10 000 cykli zginania) do zastosowań w ogniwach półprzezroczystych i tandemowych. [H7]
8. Zademonstrowano drukowanie atramentowe warstw perowskitu w warunkach otoczenia z wykorzystaniem nietoksycznych rozpuszczalników, w oparciu o recepturę opracowaną na podstawie badań NMR i DFT, osiągając PCE 11,4% na elastycznych podłożach (1 cm²), co stanowiło krok w kierunku produkcji z rolki na rolkę. [H8]
9. Wykazano, że modyfikacja ukrytej granicy faz wielkogabarytowymi kationami organicznymi ogranicza rekombinację niepromienistą i zwiększa stabilność elastycznych ogniw, zapewniając PCE na poziomie 18,66% na 1 cm². [H9]
10. Zaprojektowano i zweryfikowano eksperymentalnie pierwszy kompleksowy protokół hermetyzacji elastycznych ogniw perowskitowych, pomyślnie przechodzący normatywne testy wilgotnego ciepła (85 °C / 85% RH) i cykli termicznych zgodne ze standardem IEC. [H10]
11. Zademonstrowano pierwszy czterokontaktowy (4T) pełnoperowskitowy moduł tandemowy na elastycznych podłożach w skali 50 cm², osiągając PCE 15,33% poprzez połączenie naniesionych techniką raklowania sub-modułów WBG i NBG z przezroczystymi elektrodami i zoptymalizowaną hermetyzacją; układ zachował 80% początkowej sprawności po 2000 godzinach testów w warunkach rzeczywistych. [H11]
12. Wyeliminowano problem fotodegradacji perowskitów o szerokiej przerwie energetycznej poprzez synergiczną inżynierię składu i granic faz (monowarstwa SAM TRIPOD-C4 z trzema grupami kotwiczącymi), co umożliwiło wytworzenie elastycznego, monolitycznego, dwukontaktowego (2T) ogniwa tandemowego o sprawności 22,5% na 1 cm². [H12]

4.3.8. Bibliografia

1. Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y. & Miyasaka, T. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *J. Am. Chem. Soc.* **131**, 6050–1 (2009).
2. Lee, M. M., Teuscher, J., Miyasaka, T., Murakami, T. N. & Snaith, H. J. Efficient Hybrid Solar Cells Based on Meso-Superstructured Organometal Halide Perovskites. *Science* **338**, 643–647 (2012).
3. Cell Efficiency Chart. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (accessed: May 2025).
4. Jung, H. S. & Park, N.-G. Perovskite Solar Cells: From Materials to Devices. *Small* **11**, 10–25 (2014).
5. Stranks, S. D. *et al.* Electron-hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide perovskite absorber. *Science* **342**, 341–4 (2013).
6. Xing, G. *et al.* Long-range balanced electron- and hole-transport lengths in organic-inorganic CH₃NH₃PbI₃. *Science* **342**, 344–7 (2013).
7. Kim, G. W. & Petrozza, A. Defect Tolerance and Intolerance in Metal-Halide Perovskites. *Adv. Energy Mater.* **10**, 2001959 (2020).
8. Stranks, S. D. & Snaith, H. J. Metal-halide perovskites for photovoltaic and light-emitting

- devices. *Nat. Nanotechnol.* **10**, 391–402 (2015).
9. Park, N. & Zhu, K. Scalable fabrication and coating methods for perovskite solar cells and solar modules. *Nat. Rev. Mater.* **5**, 333–350 (2020).
 10. Wolff, C. M., Caprioglio, P., Stolterfoht, M. & Neher, D. Nonradiative Recombination in Perovskite Solar Cells : The Role of Interfaces. *Adv. Mater.* **31**, 1902762 (2019).
 11. Snaith, H. J. *et al.* Anomalous Hysteresis in Perovskite Solar Cells. *J. Phys. Chem. Lett.* **17**, 1511–1515 (2014).
 12. Ball, J. M., Lee, M. M., Hey, A. & Snaith, H. J. Low-temperature processed meso-superstructured to thin-film perovskite solar cells. *Energy Environ. Sci.* **6**, 1739 (2013).
 13. Suo, J., Yang, B., Bogachuk, D., Boschloo, G. & Hagfeldt, A. The Dual Use of SAM Molecules for Efficient and Stable Perovskite Solar Cells. *Adv. Energy Mater.* **15**, 2400205 (2024).
 14. Leijtens, T. *et al.* Overcoming ultraviolet light instability of sensitized TiO₂ with meso-superstructured organometal tri-halide perovskite solar cells. *Nat. Commun.* **4**, 2885 (2013).
 15. Wang, X. *et al.* Cross-linking strategies for efficient and highly stable perovskite solar cells. *J. Mater. Chem. C* **12**, 351–387 (2024).
 16. Domanski, K. *et al.* Not All That Glitters is Gold: Metal Migration-Induced Degradation in Perovskite Solar Cells. *ACS Nano* **10**, 6306–6314 (2016).
 17. Jariwala, S. *et al.* Local Crystal Misorientation Influences Non-radiative Recombination in Halide Perovskites. *Joule* **3**, 3048–3060 (2019).
 18. Yang, B. *et al.* Strain effects on halide perovskite solar cells. *Chem. Soc. Rev.* **51**, 7509–7530 (2022).
 19. Shockley, W. & Queisser, H. J. Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. *J. Appl. Phys.* **32**, 510 (1961).
 20. Leijtens, T., Bush, K. A., Prasanna, R. & McGehee, M. D. Opportunities and challenges for tandem solar cells using metal halide perovskite semiconductors. *Nat. Energy* **3**, 828–838 (2018).
 21. Hoke, E. T. *et al.* Reversible photo-induced trap formation in mixed-halide hybrid perovskites for photovoltaics. *Chem. Sci.* **6**, 613–617 (2014).
 22. Jiang, Q. *et al.* Compositional texture engineering for highly stable wide-bandgap perovskite solar cells. *Science* **378**, 1295–1300 (2022).
 23. Al-Ashouri, A. *et al.* Monolithic perovskite/silicon tandem solar cell with >29% efficiency by enhanced hole extraction. *Science* **370**, 1300–1309 (2020).
 24. Li, L. *et al.* Buried Interface Chelating Molecular Bridge Strategy Enables Highly Efficient and Stable Inverted Perovskite Solar Cells. *Adv. Mater.* **38**, e18406 (2025).
 25. Ullah, A., Luo, Y. & Wolf, S. De. Self-Assembled Monolayers in p–i–n Perovskite Solar Cells: Molecular Design, Interfacial Engineering, and Machine Learning–Accelerated Material Discovery. *Adv. Mater.* <https://doi.org/10.1002/adma.202520220> (2026)
doi:10.1002/adma.202520220.

5. Informacje o istotnej aktywności naukowej realizowanej w więcej niż jednej uczelni lub jednostce naukowej, w szczególności zagranicznej

5.1. Długookresowe pobyty w jednostkach naukowych

- Paź'04 - Cze'09: Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polska – Studia magisterskie z chemii
- Sty'08 - Cze'08: Uniwersytet w Lund, Lund, Szwecja - Pobyt badawczy na Wydziale Fizyki Chemicznej (Erasmus)
- Sie'10 - Sie'12: Conductive Inkjet Technology, Cambridge, Wielka Brytania – Inżynier ds. materiałów
- Paź'12 - Lut'16: Uniwersytet Oksfordzki, Oksford, Wielka Brytania – Studia doktoranckie (DPhil), grupa Prof. H.J. Snaitha
- Lut'16 - Cze'25: Saule Technologies, Wrocław, Polska - Dyrektor Naukowy, kierowanie B+R w zakresie technologii perowskitowej fotowoltaiki
- Paź'17 - Paź'25: Fundacja Saule Research Institute, Wrocław, Polska - Dyrektor Naukowy i Kierownik Projektu w kilku grantach
- Lis'25 - Obecnie: Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska - Adiunkt, Kierownik Projektu (grant Opus)

5.2. Współpraca międzynarodowa

W trakcie badań przedstawionych w publikacjach [H1]-[H12] oraz w projektach pokrewnych kandydat zbudował szeroką sieć międzynarodowej współpracy naukowej, obejmującą grupy akademickie, instytuty badań stosowanych, ośrodki dysponujące wielkoskalową infrastrukturą badawczą oraz partnerów przemysłowych. Poniżej wymieniono najważniejsze ośrodki współpracujące z kandydatem w trakcie realizacji cyklu habilitacyjnego.

- Uniwersytet Oksfordzki (Clarendon Laboratory, Wydział Fizyki, Wielka Brytania) – grupa prof. Henry'ego J. Snaitha. Współpraca od czasu studiów doktoranckich kandydata (2012-2016); wspólne prace nad selektywnymi kontaktami elektronowymi, oraz architekturą ogniw tandemowych; współpraca w projekcie „Maestro”.
- Uniwersytet Rzymski „Tor Vergata” (Centre for Hybrid and Organic Solar Energy – CHOSE, Włochy) – grupa prof. Alda Di Carlo. Pełnienie przez prof. A. Di Carlo funkcji promotora dla trojga doktorantów (V. Babu, T. Ahmad, A. Wąsiak-Maciejak) oraz wspólny rozwój elastycznych ogniw jednozłączowych, półprzezroczystych i pełnoperowskitowych ogniw tandemowych [H5–H7, H9, H11, H12]; współpraca w ramach projektów: „Maestro”, „Espresso”, „Pearl”.
- Uniwersytet w Cambridge (Wydział Inżynierii Chemicznej i Biotechnologii, Wielka Brytania) – grupa prof. Samuela D. Stranksa. Fotoluminescencja i spektroskopia z rozdzielczością czasową absorberów perowskitowych oraz warstw selektywnych dla ładunków; współautorstwo publikacji dotyczącej modyfikacji heterozłącza [H2].
- Uniwersytet w Perugii i CNR-SCITEC, Perugia, Włochy – grupa prof. Filippa De Angelisa i dr. Edoarda Mosconiego. Obliczenia w ramach teorii funkcjonału gęstości (DFT) dla powierzchni

perowskitu, granic faz i koordynacji dodatków; stały partner w zakresie obliczeń teoretycznych w pracach [H5], [H8], [H9], [H12]; współpraca w ramach projektów: „Maestro”, „Espresso”, „First Team”.

- Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB), Niemcy – grupa prof. Antonia Abatego i prof. Steve’a Albrechta (HZB). Stabilność odwróconych ogniw perowskitowych i monolityczne architektury perowskitowych ogniw tandemowych; współpraca w ramach projektów „Pearl” i „Supertandem”.
- Istituto Italiano di Tecnologia (IIT), Center for Nano Science and Technology @PoliMi, Mediolan, Włochy – grupa prof. Annamarii Petrozzy. Ultraszybka spektroskopia i fizyka defektów absorberów perowskitowych; współautorstwo publikacji spoza cyklu habilitacyjnego; współpraca w ramach projektu „Maestro”.
- Uniwersytet w Pawii (Wydział Chemii, Włochy) – grupa prof. Giulii Grancini. Heterostruktury perowskitowe 2D/3D i strategie pasywacji granic faz.
- Uniwersytet Jaume I (Instytut Materiałów Zaawansowanych – INAM, Castelló de la Plana, Hiszpania) – grupa prof. Francisca Fabregata-Santiago. Spektroskopia impedancyjna i analiza rekombinacji w elastycznych ogniwach perowskitowych; współautorstwo [H6]; współpraca w ramach projektu „Maestro”.
- Uniwersytet w Kolonii (Instytut Chemii Nieorganicznej, Niemcy) – grupa prof. Sanjaya Mathura. Synteza materiałów i chemia powierzchni selektywnych kontaktów ładunku; współautor [H8].
- ICFO – Institut de Ciències Fotòniques, Barcelona, Hiszpania – zespół dr. Matza Liebela. Ultraszybka mikroskopia optyczna w układzie wzbudzenie-próbkowanie (pump-probe) do badania dynamiki nośników ładunku w warstwach perowskitu.
- Zurychski Uniwersytet Nauk Stosowanych (ZHAW, Instytut Fizyki Obliczeniowej, Winterthur, Szwajcaria) – grupa prof. Wolfganga Tressa. Symulacje fizyczne i modelowanie dryfowo-dyfuzyjne perowskitowych ogniw słonecznych; współpraca w ramach projektu „Palace”.
- Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu (Wydział Fizyki, Polska) – grupa prof. Marcina Ziółka. Ultraszybka spektroskopia absorpcji przejściowej absorberów perowskitowych; współautorstwo kilku publikacji spoza cyklu habilitacyjnego.
- Politechnika Wrocławska (Katedra Inżynierii Materiałów Półprzewodnikowych, Polska) – zespół prof. Roberta Kudrawca, i prof. Jarosława Serafińczuka. Pełnienie przez prof. R. Kudrawca funkcji promotora dla dwojga doktorantów (B. Wilk i W. Żuraw); charakteryzacja strukturalna i optyczna warstw perowskitu (XRD, c-AFM, fotoluminescencja); współautorstwo w publikacjach [H8, H9].
- TNO Solliance, Eindhoven, Holandia – zespół dr. Sjoerda Veenstry, dr Dorrit Roosen-Melsen i dr. Mehrdada Najafiego. Skalowanie elastycznej fotowoltaiki perowskitowej i badania niezawodności prowadzone w ramach wspólnych projektów konsorcjów europejskich; współpraca w ramach projektów „Supertandem” i „Pearl”.
- Empa – Szwajcarskie Federalne Laboratoria Badania Materiałów i Technologii, Dübendorf, Szwajcaria – zespół dr. Fana Fu. Rozwój monolitycznych, pełnoperowskitowych ogniw

tandemowych, pomiary TOF-SIMS; współautorstwo w [H12]; współpraca w ramach projektu „Supertandem”.

- VTT Technical Research Centre of Finland Ltd., Espoo, Finlandia – zespół dr Riikki Suhonen i dr. Thomasa M. Kraftha. Produkcja pilotażowa elastycznych perowskitowych ogniw i modułów z elektrodą węglową; współpraca w ramach projektu „Pearl”.
- Fraunhofer ISE, Freiburg im Breisgau, Niemcy – zespół dr. Uliego Würfela i dr. Markusa Kohlstäda. Protokoły przyspieszonego starzenia i charakteryzacja opartych na fulerenach kontaktów typu n; współautorstwo [H5, H8].; współpraca w projektach „Espresso”, „Supertandem”, „First Team”.
- SPECIFIC – Sustainable Product Engineering Centre for Innovative Functional Industrial Coatings, Uniwersytet w Swansea, Walia, Wielka Brytania – zespół prof. Trystana Watsona. Ogniwia perowskitowe formowane z roztworu na podłożach elastycznych, współpraca w ramach projektu „Maestro”.
- Tecnalia Research & Innovation, Donostia–San Sebastián, Hiszpania – zespół dr. Werthera Cambaraua i dr. Eduarda Romána Mediny. Testy starzenia w warunkach rzeczywistych i architektury folii barierowych dla elastycznych modułów perowskitowych; współpraca w projekcie „Supertandem”.
- Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), Hamburg, Niemcy – dr Christoph Schlueter (linia badawcza P22). Twarda rentgenowska spektroskopia fotoelektronów (HAXPES) do analizy ukrytych granic faz w ogniwach perowskitowych; współautorstwo w [H3].
- Optigon Inc. (spin-out MIT), Boston, MA, USA – dr Dane W. deQuillettes. Wymiana naukowa w zakresie wysokoprzepustowej charakteryzacji materiałów perowskitowych i inspekcji procesów w linii produkcyjnej.

6. Informacje o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych i popularyzatorskich

6.1. Działalność dydaktyczna

Formalne doświadczenie dydaktyczne kandydat zdobył podczas studiów doktoranckich na Uniwersytecie Oksfordzkim, a następnie poszerzył je o obszerną praktykę w opiece naukowej i mentoringu nad początkującymi badaczami w przemysłowym środowisku badawczym Saule Technologies oraz Saule Research Institute. Podstawą tej działalności dydaktycznej jest zasada, że umiejętności eksperymentalne z zakresu inżynierii materiałów zaawansowanych oraz fizyki przyrządów półprzewodnikowych najskuteczniej przekazuje się poprzez bezpośrednią pracę w laboratorium, opiekę naukową zorientowaną na realizację projektów oraz aktywne angażowanie podopiecznych w proces publikacji i upowszechniania autorskich wyników badań.

W okresie studiów na Uniwersytecie Oksfordzkim (styczeń 2013 – czerwiec 2015) kandydat pełnił funkcję asystenta dydaktycznego na Wydziale Fizyki, gdzie odpowiadał za prowadzenie zajęć laboratoryjnych z fizyki materii skondensowanej oraz indywidualną ocenę sprawozdań studenckich.

6.2. Opieka promotorska nad doktorantami

W okresie pełnienia funkcji dyrektora naukowego w Saule Technologies oraz Saule Research Institute kandydat sprawował bezpośrednią opiekę naukową nad sześcioma doktorantami realizującymi prace doktorskie w instytucjach partnerskich w Polsce i we Włoszech. Pięciu z nich pomyślnie obroniło swoje rozprawy, natomiast szósty złożył pracę i oczekuje na wyznaczenie terminu obrony. We wszystkich przypadkach kandydat odpowiadał za merytoryczne kierowanie badaniami, bieżącą opiekę naukową, rozwiązywanie bieżących problemów eksperymentalnych oraz przygotowanie podopiecznych do procedur recenzyjnych. Realizowane pod nadzorem kandydata projekty doktorskie zestawiono poniżej:

- Taimoor Ahmad – University of Rome „Tor Vergata”, Włochy. Tytuł rozprawy: *Scaling up highly efficient large area flexible perovskite solar cells*. Doktorat obroniony w 2022 roku.
- Vivek Babu – University of Rome „Tor Vergata”, Włochy. Tytuł rozprawy: *Perovskite on flexible foil: from lab to real-world application*. Doktorat obroniony w 2022 roku.
- Barbara Wilk – Politechnika Wrocławska, Polska. Tytuł rozprawy: *Ink-jet printing of perovskite solar cells*. Doktorat obroniony w 2022 roku.
- Shyantana Dasgupta – Politechnika Poznańska, Polska. Tytuł rozprawy: *Enhancement of structural stability and operational reliability of perovskite solar cells*. Doktorat obroniony w 2024 roku.
- Wiktor Żuraw – Politechnika Wrocławska, Polska. Tytuł rozprawy: *Development of lead-reduced perovskite photovoltaics*. Doktorat obroniony w 2026 roku.
- Anna Wąsiak-Maciejak – University of Rome „Tor Vergata”, Włochy. Tytuł rozprawy: *Flexible perovskite photovoltaics: overcoming technical limits through stability engineering and scalable manufacturing*. Rozprawa złożona, obrona zaplanowana na czerwiec 2026.

Poza wymienioną powyżej formalną opieką naukową, kandydat sprawował nadzór merytoryczny nad naukowcami, stażystami poddoktorskimi, badaczami wizytującymi oraz młodszymi pracownikami naukowymi Saule Technologies i Saule Research Institute, w tym stypendystami programu Marie Skłodowska-Curie Innovative Training Network (MSCA-ITN, projekt „Maestro”). Działalność ta obejmowała udzielanie wsparcia merytorycznego, szkolenia z zakresu zaawansowanych technik charakteryzacji materiałów oraz pomoc w przygotowywaniu publikacji naukowych i wniosków grantowych.

6.3. Działalność organizacyjna

Działalność organizacyjna kandydata w minionej dekadzie koncentrowała się na tworzeniu programów naukowych, zespołów badawczych i międzynarodowych konsorcjów dedykowanych rozwojowi perowskitowej technologii fotowoltaicznej, a także na jej popularyzacji wśród odbiorców przemysłowych, środowiska naukowego oraz szerokiej publiczności.

W 2017 roku, pełniąc funkcję dyrektora naukowego Saule Technologies, kandydat opracował merytoryczne podstawy powołania Saule Research Institute, niezależnej fundacji wspierającej działalność badawczo-rozwojową przedsiębiorstwa. W obu tych podmiotach zbudował wielodyscyplinarny zespół badawczo-rozwojowy i sprawował nad nim bezpośrednie kierownictwo. W skład zespołu weszli fizycy eksperymentalni, chemicy materiałowi, inżynierowie technologii oraz inżynierowie procesu. Kandydat definiował strategie badawcze, tworzył infrastrukturę eksperymentalną oraz wdrożył spójne ramy zarządzania własnością intelektualną, obejmujące procedury zgłaszania wynalazków, wewnętrzną strategię patentową, zasady ochrony tajemnicy przedsiębiorstwa oraz analizy swobody działania (FTO).

Równoległe do działań instytucjonalnych, kandydat inicjował, przygotowywał i koordynował ze strony pod względem merytorycznym (ze strony Saule i Saule Research Institute) ponad piętnaście przyznanych grantów badawczych finansowanych przez Unię Europejską (programy Horyzont 2020, Horyzont Europa) oraz agencje krajowe (NCBR, NCN, FNP), o łącznym budżecie przekraczającym dziesięć milionów euro. W projektach tych pełnił funkcje kierownika projektu, kierownika projektu ze strony partnera w międzynarodowych konsorcjach lub dyrektora naukowego nadzorującego kierowników poszczególnych projektów z ramienia Saule. Odpowiadał za naukową koordynację prac partnera i reprezentował Saule Technologies oraz Saule Research Institute w procesach decyzyjnych na poziomie konsorcjum.

W sierpniu 2025 roku kandydat był współzałożycielem spółki Chemini, startupu typu deep-tech, ukierunkowanego na rozwój i komercjalizację zaawansowanych nanomateriałów dla fotowoltaiki nowej generacji. Przedsiębiorstwo zostało powołane wspólnie z dwoma byłymi liderami R&D zespołu badawczego Saule i opiera się na doświadczeniu badawczym kandydata w temacie perowskitowej fotowoltaiki i chemii materiałowej.

Popularyzacja nauki stanowi integralną część działalności zawodowej kandydata i była realizowana poprzez regularny udział w międzynarodowych konferencjach naukowych, wydarzeniach branżowych oraz inicjatywach informacyjnych dotyczących fotowoltaiki nowej generacji. Kandydat wygłaszał wykłady na zaproszenie podczas wiodących konferencji materiałowych i fotowoltaicznych (Materials Research Society, European Materials Research Society, SuperGEN, Printed Electronics Europe, EU PVSEC, MATSUS), a także na forach przemysłowych skierowanych do osób spoza branży. Wystąpienia te koncentrowały się na stopniu dojrzałości technologicznej fotowoltaiki perowskitowej oraz jej potencjalnym wkładzie w globalną transformację energetyczną. Zestawienie tych wystąpień zamieszczono w punkcie 6.

Wyrazem uznania dla wkładu kandydata w rozwój dziedziny były między innymi dwie kolejne nominacje (w latach 2015, 2016) w polskiej edycji programu „Innovators Under 35 Europe” organizowanego przez MIT Technology Review.

7. Inne informacje

7.1. Nagrody i wyróżnienia przemysłowe

Wkład kandydata w rozwój perowskitowej technologii fotowoltaicznej znalazł odzwierciedlenie w dwóch nominacjach (w latach 2015 i 2016) do wyróżnienia w programie MIT Technology Review „Innovators Under 35” (polska edycja regionalna). Ponadto jego badania doktoranckie na Uniwersytecie Oksfordzkim były wspierane przez kilka prestiżowych stypendiów przyznawanych w rygorystycznym trybie konkursowym. Finansowanie to obejmowało stypendium EPSRC DTA, stypendium przemysłowe ufundowane przez Oxford Photovoltaics Ltd, grant z funduszu C.R. Barber Trust (Institute of Physics) oraz dofinansowanie podróży-badawcze ze środków St Cross College w Oksfordzie.

7.2. Role redakcyjne i doradcze

Członek Przemysłowej Rady Doradczej (Industrial Advisory Board) czasopisma „APL Energy” (wydawanego przez American Institute of Physics) – międzynarodowego, recenzowanego czasopisma naukowego z pogranicza nauk o energii i fizyki stosowanej.

7.3. Założenie spółki Chemini

W sierpniu 2025 roku kandydat współzałożył spółkę Chemini, firmy typu deep-tech ukierunkowanej na rozwój i komercjalizację zaawansowanych nanomateriałów dla fotowoltaiki nowej generacji. Przedsiębiorstwo zostało powołane wspólnie z dwoma byłymi liderami R&D zespołu badawczego Saule i opiera się na doświadczeniu badawczym kandydata w temacie perowskitowej fotowoltaiki i chemii materiałowej.

7.4. Tabela podsumowująca wkład autora

No.	Authorship role	Specific contribution of the candidate	Funding (candidate as Project Leader)	Institution where the work was carried out
H1	Pierwszy autor	Koncepcja i planowanie eksperymentów; synteza nanocząstek, wytwarzanie ogniw fotowoltaicznych; charakterystyka J-V, pomiary przewodnictwa; analiza danych; napisanie manuskryptu.	Nie dotyczy (badania doktorskie).	Uniwersytet Oksfordzki, Clarendon Laboratory, Wielka Brytania.
H2	Pierwszy autor	Koncepcja i planowanie eksperymentów; wytwarzanie ogniw fotowoltaicznych; charakterystyka J-V, obrazowanie SEM; spektroskopia impedancyjna; pomiary fotoluminescencji z rozdzielczością czasową; analiza danych; koordynacja pracy współautorów; napisanie manuskryptu.	Nie dotyczy (badania doktorskie).	Uniwersytet Oksfordzki, Clarendon Laboratory, Wielka Brytania.
H3	Pierwszy autor	Koncepcja i planowanie eksperymentów; wytwarzanie ogniw; charakteryzacja spektroskopowa (PL, TRPL, UV-Vis); obrazowanie SEM; organizacja i koordynacja czasu eksperymentalnego na linii badawczej HAXPES w synchrotronie Diamond Light Source; koordynacja pracy współautorów; napisanie manuskryptu.	Nie dotyczy (badania doktorskie).	Uniwersytet Oksfordzki, Clarendon Laboratory, Wielka Brytania.
H4	Współpierwszy autor (równy wkład z I. Ramirezem)	Współautorstwo koncepcji i współkoordynacja projektu; wytwarzanie ogniw; obrazowanie SEM; charakteryzacja spektroskopowa (UV-Vis, PL, TRPL); pomiary stabilności; koordynacja pracy współautorów; napisanie manuskryptu.	Nie dotyczy (badania doktorskie).	Uniwersytet Oksfordzki, Clarendon Laboratory, Wielka Brytania.
H5	Kierownik projektu / autor korespondencyjny	Koncepcja i ogólna strategia badawcza; kierowanie całością prac eksperymentalnych; nadzór nad analizą danych; koordynacja pracy współautorów; nadzór nad zespołem; napisanie, korekta i finalizacja manuskryptu; pozyskanie finansowania i zarządzanie grantem.	Kierownik projektu: ESPRESSO (Horyzont 2020), First Team (FNP).	Saule Technologies, Wrocław, Polska.
H6	Kierownik projektu / autor korespondencyjny	Koncepcja i kierowanie strategią badawczą; merytoryczne zarządzanie projektem; nadzór nad kluczowymi etapami rozwoju technologicznego; koordynacja pracy współautorów; nadzór nad zespołem; napisanie, korekta i finalizacja manuskryptu; pozyskanie finansowania i zarządzanie grantem.	Kierownik projektu: First Team (FNP), Maestro (Horyzont 2020 MSCA-ITN).	Saule Technologies oraz Saule Research Institute, Wrocław, Polska.
H7	Kierownik projektu / autor	Koncepcja i kierowanie strategią badawczą; merytoryczne zarządzanie projektem; nadzór nad rozwojem platformy przezroczystych elektrod	Kierownik projektu: First Team (FNP), Barrier Foil	Saule Technologies oraz Saule Research Institute, Wrocław, Polska.

	koresponden- cyjny	IMI; nadzór nad zespołem; korekta i finalizacja manuskryptu; pozyskanie finansowania i zarządzanie grantem.	(NCBR), Stratos (NCBR).	
H8	Kierownik projektu / autor koresponden- cyjny	Koncepcja i kierowanie strategią badawczą; merytoryczne zarządzanie projektem; nadzór nad programem druku atramentowego przy użyciu zielonych rozpuszczalników; koordynacja pracy współautorów; nadzór nad zespołem; napisanie, korekta i finalizacja manuskryptu; pozyskanie finansowania i zarządzanie grantem.	Kierownik projektu: First Team (FNP), OPUS 12 (NCN), ESPRESSO (Horyzont 2020).	Saule Technologies oraz Saule Research Institute, Wrocław, Polska.
H9	Kierownik projektu / autor koresponden- cyjny	Opracowanie koncepcji programu stabilności wewnętrznej (intrinsic stability); nadzór nad wszystkimi pracami rozwojowymi w zakresie technologii; nadzór nad analizą danych; koordynacja pracy współautorów; nadzór nad zespołem; napisanie, korekta i finalizacja manuskryptu; pozyskanie finansowania i zarządzanie grantem.	Kierownik projektu: First Team (FNP), ESPRESSO (Horyzont 2020).	Saule Technologies oraz Saule Research Institute, Wrocław, Polska.
H10	Kierownik projektu / autor koresponden- cyjny	Opracowanie koncepcji programu stabilności zewnętrznej (rozwój enkapsulacji); nadzór nad wszystkimi pracami rozwojowymi w zakresie technologii; nadzór nad zespołem; napisanie, korekta i finalizacja manuskryptu; pozyskanie finansowania i zarządzanie grantem.	Kierownik projektu: First Team (FNP), ESPRESSO (Horyzont 2020).	Saule Technologies oraz Saule Research Institute, Wrocław, Polska.
H11	Kierownik projektu / autor koresponden- cyjny	Opracowanie koncepcji programu elastycznych ogniw tandemowych pełnoperowskitowych; kierowanie wszystkimi kluczowymi zadaniami badawczymi i etapami rozwoju ogniw; nadzór nad zespołem; napisanie, korekta i finalizacja manuskryptu; pozyskanie finansowania i zarządzanie grantem.	Kierownik projektu: First Team (FNP), Maestro (Horyzont 2020 MSCA-ITN), Stratos (NCBR).	Saule Technologies oraz Saule Research Institute, Wrocław, Polska.
H12	Kierownik projektu / autor koresponden- cyjny	Opracowanie koncepcji programu elastycznych, monolitycznych, dwuterminalowych (2-terminal) ogniw tandemowych pełnoperowskitowych; kierowanie wszystkimi kluczowymi etapami prac badawczych; koordynacja pracy współautorów; nadzór nad zespołem; napisanie, korekta i finalizacja manuskryptu; pozyskanie finansowania i zarządzanie grantem.	Kierownik projektu: Palace (NCN Opus-LAP), Persofab (NCBR LIDER).	Saule Research Institute, Wrocław, Polska.

Konrad
Wojciechow
ski

Elektronicznie
podpisany przez
Konrad Wojciechowski
Data: 2026.06.09
00:42:02 +02'00'