

Prof. dr hab. Grzegorz Karczewski
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

***Recenzja osiągnięć naukowych stanowiących podstawę wniosku habilitacyjnego
doktora Mykhailo Solovana
z Wydziału Fizyki i Astronomii, Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu***

Zgodnie z artykułem 219 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” stopień doktora habilitowanego nadaje się osobie, która spełnia trzy warunki: (1) posiada stopień doktora; (2) posiada w dorobku osiągnięcia naukowe stanowiące znaczny wkład w rozwój określonej dziedziny; (3) wykazuje się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej. Obowiązkiem recenzenta wniosku habilitacyjnego jest ocena, czy spełniony jest punkt 2. artykułu 219 ustawy tzn. odpowiedź na pytanie, czy habilitant posiada wybitne osiągnięcia naukowe. Jednakże uważam, że recenzja nie będzie pełna, jeśli nie znajdą się w niej choćby krótkie wzmianki o przebiegu kariery naukowej i całości dorobku naukowego habilitanta i na tej podstawie odniesienie do dwóch pozostałych warunków nadania stopnia doktora habilitowanego.

Dr Mykhailo Solovan jest absolwentem Czerniowieckiego Uniwersytetu Narodowego im. Jurija Fedkowycza w Czerniowcach w Ukrainie. Tytuł magistra nauk ścisłych uzyskał w 2011 r. w dziedzinie elektroniki fizycznej i biomedycznej. Na tym samym uniwersytecie, w 2014 roku, zdobył stopień kandydata nauk, a w roku 2021 stopień doktora nauk w dziedzinie fizyki półprzewodników i dielektryków. Tematem rozprawy doktorskiej były: „Zjawiska elektroniczne w strukturach z bateriami powierzchniowymi opartych na krzemie, związkach zawierających krzem i związkach chalcogenidowych”.

Ukraiński stopień „kandydata nauk” prawnie uznawany jest za równy stopniowi doktora (PhD), nadawanemu w Polsce, natomiast stopień „doktora nauk” nadawany w Ukrainie nie jest uznawany w Polsce. Warto jednak zaznaczyć, że pod względem wymagań i procedury stopień „doktora nauk” jest bardziej zbliżony do stopnia doktora habilitowanego niż stopnia doktora nadawanych w Polsce. Habilitant przedstawił kopię oryginału i tłumaczenie swojego ukraińskiego dyplomu kandydata nauk oraz zaświadczenie wydane przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej oficjalnie uznające ten dyplom za uprawniający do ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego w Polsce. Tym samym spełnia on wymóg sformułowany w punkcie 1. artykułu 219 ustawy.

Po utrzymaniu tytułu kandydata nauk dr Solovan został zatrudniony w Zakładzie Elektroniki i Inżynierii Energetycznej na Uniwersytecie Narodowym w Czerniowcach, w latach 2014-2015 jako kierownik laboratorium, w latach 2016-2020 jako adiunkt, a w latach 2020-2022 jako profesor uczelni.

W czasie zatrudnienia w Czerniowcach odbył 2-miesięczny staż naukowy w University of Massachusetts oraz 6-miesięczny staż w Politechnice Turyńskiej. W roku 2022 dr Solovan przez 9 miesięcy prowadził badania naukowe na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Nazarbajewa w Kazachstanie, a następnie, pod koniec 2022 roku przyjechał do Poznania i na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza rozpoczął swój staż postdoktorski jako stypendysta Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej w ramach projektu Ulam. Po zakończeniu stypendium NAWA, w październiku 2024 został zatrudniony na UAM jako adiunkt badawczy i kierownik projektu OPUS NCN. Zdobycie finansowania w ramach projektu OPUS przez obcokrajowca, po zaledwie 2 latach pracy w Polsce zasługuje, moim zdaniem, na szczególne uznanie.

Według bazy Web of Science na dorobek naukowy dr. Solovana składa się 94 publikacji naukowych cytowanych ponad 1000 razy (650 bez autocytowań). Biorąc pod uwagę stosunkowo krótki staż pracy naukowej habilitanta, trzeba stwierdzić, że jest to dorobek znaczny. Dobrym tego miernikiem jest stosunkowo wysoki indeks Hirsha habilitanta, równy 19. Stosunkowo wysoka jest również średnia liczba cytowań jego prac, równa 11 na publikację. Na podstawie danych naukometrycznych dorobku publikacyjnego dr. Mykhailo Solovana i własnego doświadczenia stwierdzam, że dotychczasowy dorobek publikacyjny habilitanta jest co najmniej porównywalny z dorobkiem naukowym innych kandydatów ubiegających się o stopień doktora habilitowanego w dziedzinie fizyki ciała stałego.

Przechodząc do strony merytorycznej dorobku naukowego habilitanta, trzeba wyróżnić kilka jego ciekawych publikacji, które zawierają cenne wyniki i są często cytowane przez specjalistów, ale które nie weszły w skład cyklu 6 publikacji będących osiągnięciem habilitacyjnym. Najczęściej cytowaną pracą współautorstwa dr. Solovana (106 cytowań) jest wieloautorska praca z Inorganic Materials opublikowana w 2014 roku pt. „Electrical and optical properties of TiN thin films”. W pracy tej, badane były cienkie warstwy TiN wytworzone metodą sputteringu magnetronowego. Wykazano, że cienkie warstwy TiN są półprzewodnikami typu n o koncentracji nośników ok. $3 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ i energii aktywacji przewodnictwa równej 0,15 eV. Zbadano właściwości optyczne cienkich warstw TiN. Wykazano, że cienka warstwa TiN jest półprzewodnikiem o prostej przerwie energetycznej równej 3.4 eV. Kolejna wysoko cytowana praca habilitanta (97 cytowań) pt.: „Pyro-phototronic effect: An effective route toward self-powered photodetection” zasługuje na szczególną uwagę z dwóch powodów. Po pierwsze, praca ta, choć opublikowana bardzo niedawno, bo w 2023 roku, ma już prawie 100 cytowań (tylko w roku 2024 cytowano ją 42 razy). Po drugie, została opublikowana w czasopiśmie Nano Energy, które ma bardzo wysoki tzw. czynnik wpływu (impact factor) równy 17,0. Publikacja ta poświęcona jest badaniom samozasilających się fotodetektorów wykorzystujących efekt pyro-fototroniczny. W pracy tej opisano podstawowy mechanizm leżący u podstaw efektu pyro-fototronicznego i omówiono najnowsze postępy w badaniach podstawowych nad różnymi materiałami nanostrukturalnymi, a także ich heterozłączami, w których ten efekt może występować. W artykule omówione zostały kluczowe wyzwania i perspektywy dla efektu pyro-fotonicznego w fotodetektorach z własnym zasilaniem w kontekście przyszłego rozwoju. Trzecią ważną publikacją w dorobku habilitanta jest praca z 2016 roku, cytowana 49 razy, opublikowana w Applied Optics pt.: “Raman

spectroscopy of Cu-Sn-S ternary compound thin films prepared by the low-cost spray-pyrolysis technique”. Tytuł dobrze oddaje tematykę i zakres tej publikacji.

Biorąc pod uwagę informacje podane powyżej, nie ulega wątpliwości, że dr Solovan wykazuje się istotną aktywnością naukową, która była realizowana w więcej niż jednej instytucji naukowej, w szczególności w instytucjach zagranicznych, takich jak University of Massachusetts, Politecnico di Torino, Uniwersytet Nazarbajewa. Zatem spełnia on wymóg sformułowany w punkcie 3. artykułu 219 ustawy.

Osiągnięciem naukowym, które dr Mikhailo Solovan wskazał jako podstawę swego wniosku habilitacyjnego, jest cykl 6-ciu publikacji naukowych zatytułowany „Wpływ krótko-impulsowego, wysokoenergetycznego napromieniowania protonowego na nieorganiczne, organiczne i perowskitowe urządzenia optoelektroniczne”. Wszystkie publikacje cyklu są wieloautorskie. Habilitant jest pierwszym autorem 3 z nich. Publikacje zostały opublikowane w renomowanych pismach specjalistycznych o zasięgu światowym, większość z nich w czasopismach o bardzo wysokim czynniku wpływu, takich jak: Advanced Energy Materials (IF=24.4), Advanced Functional Materials (IF=19) i 2 publikacje w Advanced Optical Materials (IF=8.0).

W pierwszej publikacji cyklu habilitacyjnego, H1, zaproponowany został nowy typ fotodiod typu metal-półprzewodnik-metal składających się z materiałów o wysokiej odporności na promieniowanie, takich jak szafir, TiN, CdTe, Hg₃In₂Te₆, MoOx i grafit. Publikacja przedstawia kompleksowe modelowanie i symulacje fotoelektryczne urządzeń optoelektronicznych o takiej architekturze. Obiecujące właściwości optoelektroniczne zostały obliczone w ramach kompleksowego modelu półanalitycznego, opartego na komplementarnym połączeniu numerycznej symulacji optycznej macierzy transferowej z analitycznymi równaniami Hechta. Uzyskane wyniki potwierdzają zasadność koncepcji wysokowydajnych, odpornych na promieniowanie urządzeń optoelektronicznych nowej generacji oraz wskazują na znaczący potencjał dalszej optymalizacji ich konstrukcji.

W oparciu o teoretyczne podstawy przedstawione w pracy H1, publikacja H2 koncentruje się na opisie procesu wytwarzania oraz na kompleksowej charakteryzacji nowego typu fotodiod heterozłączowych na bazie TiN/CdZnTe, pracujących w zakresie 300–820 nm. Autorzy pokazują, że urządzenia te charakteryzują się wysoką czułością, krótkim czasem odpowiedzi oraz szerokim liniowym zakresem dynamicznym, przewyższając pod względem parametrów porównywalne detektory oparte na innych nieorganicznych materiałach półprzewodnikowych. Ich odporność na promieniowanie wysokoenergetyczne potwierdzono eksperymentalnie podczas napromieniowania impulsami protonów o energii 170 keV i skumulowanej fluencji $2 \times 10^{12} \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2}$. Połączenie wysokiej wydajności i wyjątkowej stabilności radiacyjnej czyni te struktury obiecującą platformą dla zastosowań w przestrzeni kosmicznej.

W pracy H3 przedstawione zostało alternatywne rozwiązanie, które stanowią samozasilająca się fotodiody ze złączem Schottky’ego grafit/CdZnTe, działające w zakresie od nadfioletu do bliskiej podczerwieni. Urządzenia te osiągają maksymalną czułość na poziomie $0,25 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ oraz detekcyjność rzędu $6,5 \times 10^{11} \text{ Jones}$, przy krótkich czasach narastania i opadania sygnału (1,2/7,2 μs) oraz szerokim liniowym zakresem dynamicznym (77 dB). Parametry te, w połączeniu z wysoką odpornością

na promieniowanie, predysponują je do pracy w środowiskach o intensywnym promieniowaniu jonizującym.

Dr Solovan badał także wpływ promieniowania wysokoenergetycznego na fotodiody wytworzone z materiałów organicznych, takie jak PCE10:ITIC-4F. Badaniom tym poświęcona jest publikacja H4, w której analizowane były własności fotowoltaiczne takich urządzeń przed oraz po ekspozycji na 150-nanosekundowy impuls protonów (170 keV , $2 \times 10^{12} \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2}$), odpowiadający około sześciu latom pracy na niskiej orbicie okołoziemskiej. Istotnym wynikiem tych badań jest obserwacja, że po początkowym spadku wydajności następuje wcześniej nieobserwowany efekt samonaprawy, związany z dynamiką pułapek indukowanych protonami w objętości warstwy aktywnej. Odkrycie to, w połączeniu z niską masą urządzeń organicznych, wskazuje na ich znaczący potencjał w technologiach kosmicznych.

Następna publikacja H5 przedstawia badania odporności radiacyjnej nowoczesnych, wieloskładnikowych fotodiod perowskitowych $\text{Cs}_{0.04}\text{Rb}_{0.04}(\text{FA}_{0.65}\text{MA}_{0.35})_{0.92}\text{Pb}(\text{I}_{0.85}\text{Br}_{0.14}\text{Cl}_{0.01})_3$, testowanych w warunkach wysokointensywnego, impulsowego napromieniania protonami o energii 170 keV przy fluencji do $10^{13} \text{ protonów cm}^{-2}$. Badane fotodiody wykazują rekordową odporność radiacyjną spośród dotychczas opisanych analogicznych urządzeń optoelektronicznych. W szczególności wykazano, że napromienianie protonami o fluencji $2 \times 10^{12} \text{ protonów cm}^{-2}$ prowadzi nawet do niewielkiej poprawy parametrów fotodiody. Niemniej jednak wysoka fluencja $10^{13} \text{ protonów cm}^{-2}$ powoduje pogorszenie parametrów fotodiody średnio jedynie o 25% w porównaniu z urządzeniami w stanie wyjściowym. Ujawniona wysoka wydajność oraz zaawansowana odporność radiacyjna potwierdzają ogromny potencjał zastosowań lekkich i niskokosztowych, wytwarzanych metodami roztworowymi perowskitowych urządzeń optoelektronicznych w systemach czujników i sieciach komunikacyjnych pracujących w surowych warunkach kosmicznych.

W publikacji H6 badana była odporność radiacyjna wysokowydajnych, wieloskładnikowych perowskitowych ogniw słonecznych w ekstremalnych warunkach napromieniania protonami o krótkich impulsach. Urządzenia poddano wysokointensywnemu napromienianiu protonami, które odpowiada około 30 latom pracy na niskiej orbicie okołoziemskiej. Przeprowadzono kompleksową charakterystykę materiałową aktywnej warstwy perowskitowej oraz analizę parametrów pracy urządzeń perowskitowych przed i po napromienianiu protonami. Otrzymane wyniki wskazują, że parametry fotowoltaiczne ogniw słonecznych ulegają niewielkiemu pogorszeniu — odpowiednio do 20% i 50% — po niskiej fluencji protonów $2 \times 10^{12} \text{ p cm}^{-2}$ oraz wysokiej fluencji $1 \times 10^{13} \text{ p cm}^{-2}$, co jest spowodowane wzrostem strat związanych z nieradiacyjną rekombinacją. Wyniki pokazują wyjątkową odporność wieloskładnikowych perowskitów na ekstremalne, wysokointensywne napromienianie protonami o krótkich impulsach, które przekracza surowe warunki kosmiczne i którego wpływ na PSC nie był wcześniej badany.

Do najważniejszych wyników naukowych przedstawionych w publikacjach cyklu habilitacyjnego dr Solovana należą obserwacje, że:

- Połączenie półprzewodników z szeroką przerwą energetyczną II-VI (np. CdZnTe) z warstwami okiennymi odpornymi na promieniowanie (np. TiN) prowadzi do rekordowo wysokiej detektywności oraz szybkości odpowiedzi fotodiod, jak pokazano w publikacji H2.

- Fotodiody Schottky'ego Grafit/CdZnTe w trybie zasilania własnego zaprezentowane wykazują porównywalne właściwości optoelektroniczne (czułość, detektywność oraz czas odpowiedzi), co potwierdza niezawodność oraz wszechstronność urządzeń opartych na CdZnTe [H3].
- Napromieniowanie protonami o impulsowym, wysokim natężeniu strumienia powoduje powstawanie defektów głównie na interfejsie oraz w warstwie aktywnej, jednak architektura urządzenia może łagodzić te efekty dzięki zaawansowanej inżynierii heterozłącza [H2].
- Symulacje SRIM oraz modelowanie oparte na równaniu Hechta dostarczają cennych przewidywań dotyczących profili jonizacji oraz efektywności zbierania nośników ładunku, umożliwiając optymalizację architektury urządzeń w celu poprawy odporności radiacyjnej [H1, H2].
- Organiczne fotodiody i ogniwa fotowoltaiczne (mieszanki PCE10:ITIC-4F) mogą wykazywać wyjątkową stabilność radiacyjną nawet po intensywnym napromieniowaniu protonami, utrzymując swoje właściwości operacyjne dzięki mechanizmom samonaprawy [H4].
- Spektroskopia impedancyjna oraz pomiary przejściowe odpowiedzi pokazują, że efekt samonaprawy w organicznych urządzeniach koreluje z dynamicznym wyżarzaniem defektów oraz procesami regeneracji interfejsu [H4].
- Wieloskładnikowe hybrydowe fotodiody i ogniwa słoneczne z perowskitu wykazują wyjątkową stabilność pod wpływem napromieniowania protonami, zachowując ponad 75% swojej detektywności oraz wydajności [H5, H6].

Podsumowując, w swojej rozprawie habilitacyjnej dr Mikhailo Solovan zaproponował nową generację submikronowych fotodiod opartych na unikalnych kombinacjach materiałów funkcjonalnych odpornych na promieniowanie, przeznaczonych do pracy w szerokim zakresie widma – od ultrafioletu, przez światło widzialne, aż po bliską podczerwień. Opracowane koncepcje obejmują struktury heterozłączowe, złącza Schottky'ego, urządzenia perowskitowe i organiczne, projektowane z myślą o zastosowaniach w wymagających środowiskach, takich jak przestrzeń kosmiczna czy obszary o podwyższonym poziomie promieniowania jonizującego. Przedstawił szereg interesujących wyników dotyczących własności przyrządów optoelektronicznych poddawanych intensywnemu promieniowaniu protonowemu. Te prace są ważne z punktu widzenia badań podstawowych i aplikacyjnych detektorów i urządzeń fotowoltaicznych.

Stwierdzam, że spełniony jest punkt 2. artykułu 219 ustawy, tzn. dr Mikhailo Solovan posiada wybitne osiągnięcia naukowe stanowiące znaczny wkład w rozwój uprawianej przez niego dziedziny nauki. Zatem spełnia on wszystkie warunki określone w ustawie i rozporządzeniu o stopniach naukowych. Wnoszę zatem o dopuszczenie dr. Mikhailo Solovana do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.