

Prof. dr hab. Krystyna Jabłońska
Instytut Fizyki
Polskiej Akademii Nauk

Recenzja osiągnięcia naukowego dr Maciej Rogala pt. „Badania przestrzennego rozkładu właściwości elektrycznych w nanoskali oraz możliwości lokalnej redukcji materiałów tlenkowych.”

oraz ocena dorobku naukowego

Oceny dokonuję zgodnie z Art.219 . ust. 1 określający wymogi niezbędne do nadania stopnia doktora habilitowanego

Art. 219. 1. Stopień doktora habilitowanego nadaje się osobie, która:

1) posiada stopień doktora;

2) posiada w dorobku osiągnięcia naukowe albo artystyczne, stanowiące **znaczący wkład w rozwój określonej dyscypliny,**

w tym co najmniej:

a) 1 monografię naukową wydaną przez wydawnictwo, które w roku opublikowania monografii w ostatecznej formie było ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 lit. a, lub

b) **1 cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych lub w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych, które w roku opublikowania artykułu w ostatecznej formie były ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 lit. b,** lub

c) 1 zrealizowane oryginalne osiągnięcie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne lub artystyczne;

3) wykazuje się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Ad. 1

Habilitant posiada stopień doktora Nauk Fizycznych, uzyskany na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego w październiku 2012. Tytuł rozprawy doktorskiej:

„Przełączanie rezystywne w TiO₂” promotorzy: prof. dr hab. Zbigniew Klusek, prof. dr hab.

Krzysztof Szot. Rozprawa na wniosek recenzentów została wyróżniona. **Wymóg ten został spełniony.**

Ad. 2 b)

Do osiągnięci naukowego habilitant zalicza 1 cykl 6. powiązanych tematycznie publikacji wieloautorskich.

W takim przypadku zaleca się „*złożenie oświadczenia przez habilitanta oraz współautorów wskazujące na ich merytoryczny (a NIE procentowy) wkład w powstanie każdej pracy [np. twórca hipotezy badawczej, pomysłodawca badań, wykonanie specyficznych badań (np.*

przeprowadzenie konkretnych doświadczeń, opracowanie i zebranie ankiet, itp.), wykonanie analizy wyników, przygotowanie manuskryptu artykułu, i inne]. Określenie wkładu danego

autora, w tym habilitanta, powinno być na tyle precyzyjne, aby umożliwić dokładną ocenę jego udziału i roli w powstaniu każdej pracy”

Wymóg ten również został spełniony. Habilitant załączył oświadczenia wszystkich żyjących i zatrudnionych w jednostkach naukowych współautorów. W oświadczeniach tych, jak również w autoreferacie, wkład każdego został jednoznacznie określony, co umożliwiło jednoznaczną ocenę wkładu habilitanta do cyklu publikacji będącego osiągnięciem habilitacyjnym. W publikacjach tych miał on rolę wiodącą i był twórcą koncepcji pracy, przygotowywał i prowadził wiodące w pracy eksperymenty, analizował wyniki, napisał pierwszą wersję artykułów, był autorem korespondencyjnym, odpowiedział na uwagi recenzentów. Ponadto habilitant precyzyjnie określił swój udział w całym opisanym dorobku naukowym.

Ad. 3

Habilitant odbył 18 miesięczne i 3 miesięczne staże w Peter Grünberg Forschungszentrum Jülich, oraz cały szereg, krótkoterminowych wyjazdów naukowych do innych ośrodków zagranicznych i krajowych. Dla jego zainteresowań naukowych istotne znaczenie miało zatrudnienie 18-miesięczne w Forschungszentrum Jülich jeszcze w trakcie przygotowania doktoratu, gdzie zajmował się powiązaniem struktury defektów występujących w tlenkach metali przejściowych z ich właściwościami elektrycznymi. Zagadnienia te pogłębiał również w pracach stanowiących cykl habilitacji i zdobyte doświadczenie zastosował do organicznych materiałów tlenkowych typu GO oraz innych nie wchodzących do osiągnięcia habilitacyjnego pracach.

O tym, że była to znacząca aktywność naukowa świadczy fakt opublikowania 7 prac naukowych gdzie habilitant wskazuje podwójną afiliację. Trzy z tych prac stanowią dorobek habilitacyjny. Tak więc **i ten wymóg ustawowy habilitant niewątpliwie spełnia.**

Prace będące cyklem habilitacyjnym oznaczone jako H1-H6 pochodzą z okresu 2013-2019 i zostały wybrane z pośród 33 prac opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora. Pierwsze pytanie jakie się pojawia po zapoznaniu się z przekazanymi dokumentami to, dlaczego wniosek został przygotowany tak późno skoro prace zostały opublikowane już 5 lat wcześniej. W moje subiektywnej ocenie cały dorobek habilitanta wskazuje na to, że był tak bardzo zaangażowany w pracę naukową prowadzoną z wieloma naukowcami i ośrodkami, prace dydaktyczne i organizacyjne, że staranie się o kolejne stopnie naukowe nie było jego priorytetem. Wybrane do cyklu prace stanowią niewątpliwie spójny cykl i dotyczą dwóch klas materiałów modelowych o dużym znaczeniu praktycznym TiO_2 i GO. W pracach tych habilitant jest pierwszym autorem i doczekały się już one 137 cytowań czyli wzbudziły zainteresowanie wśród naukowców. Cały dorobek dr Rogala był cytowany 717 i wskaźnik Hirscha 13.

W dalszej części mojej opinii postaram się wykazać że habilitant wniósł **znaczący wkład do wiedzy o badanych materiałach i obserwowanych procesach.** Obiektem prowadzonych badań są ditlenki tytanu i tlenki grafenu. Materiały te są intensywnie badane i ważne w zastosowaniach praktycznych. Autor skupił się na właściwościach elektrycznych w nano i mikroskali, które były w czasie gdy powstawały prace nie wystarczająco poznane. Jako narzędzie badawcze wykorzystał metody z zakresu fizyki powierzchni.

Cykl trzech prac poświęcony badaniom ditlenku tytanu jest rozszerzeniem badań prowadzonych w pracy doktorskiej. Autor podkreśla w autoreferacie, że główne tezy tych prac są wynikiem nowych badań prowadzonych już na stażu podoktorskim, a badania będące podstawą doktoratu są tylko „wstępną bazą do opisywanych analiz”. Niestety nie miałam dostępu do pracy doktorskiej

i muszę autorowi uwierzyć. Wykazano w publikacji, że samoorganizacja powierzchni ditlenku tytanu w czasie trawienia jonami Ar prowadzi do zmian morfologii, stechiometrii i struktury elektronowej powierzchni w nanoskali. Proces ten stabilizuje się na głębokości około 30nm i prowadzi do utworzenia w nanoskali szablonu do stabilnego przełączania oporności (półprzewodnik – metal). Ponadto wykazano, że w przełączaniu i zmianie rezystancji dominujący udział odgrywa modyfikacja połączeń między ziarnami materiału, wywołana lokalną migracją jonów tlenu. Te obserwacje były możliwe dzięki zastosowaniu przez habilitanta na stażu podoktorskim techniki mapowania przewodnictwa elektrycznego materiału w skali nanometrowej. **Jest to niewątpliwie znaczący wkład do wiedzy o tym materiale.** Praca została opublikowana w 2013 w APL i była cytowana 26 razy.

Publikacja oznaczona jako H2 również zawiera elementy pracy doktorskiej w postaci „map przewodnictwa dowodzących możliwości wysokorozdzielczej modyfikacji elektrycznej powierzchni TiO_2 ”. Mapy te uzyskały pogłębioną interpretację na poziomie atomowym dzięki badaniom przeprowadzonym później. Tym razem badano procesy w nanoskali zachodzące po termicznej modyfikacji powierzchni. Wykazano, obecność w modyfikowanym materiale hierarchicznej sieci niestabilnych defektów liniowych oraz stabilnej struktury przewodzącej, którą tworzą trwałe defekty krystalograficzne. Niestabilne defekty liniowe ulegają preferencyjnie modyfikacjom elektrycznym. Przepływ ładunku w materiale zapewnia natomiast sieć struktur przewodzących. Podstawą obserwowanych zmian rezystancji jest migrację jonów tlenu powodująca odłączanie i przyłączanie generowanych defektów liniowych do istniejącej sieci defektów krystalograficznych. **Szczegółowa analiza zachodzących zjawisk stanowi niewątpliwie znaczący wkład do wyjaśnienia złożonych mechanizmów przewodnictwa w nanoskali.** Praca została opublikowana w 2015 w Advanced Functional Materials (IF 11.4) i była cytowana 20 razy.

W trzeciej pracy z tego cyklu H3 autor analizował procesy w trakcie chłodzenia powierzchni kryształu TiO_2 po termicznym wygrzewaniu. Przedstawione badania wykazały, że powstające w tym procesie defekty tworzone są głównie w procesie chłodzenia, a nie w wysokich temperaturach. Aby to wykazać autor zastosował nietypowy układu pomiarowy XPS, w którym wykonywał pomiar składu chemicznego bezpośrednio w trakcie wygrzewania próbki w temperaturach powyżej 1000 °C oraz chłodzenia. Dzięki temu udowodnił, że dominująca redukcja warstwy przypowierzchniowej następuje w wyniku chłodzenia. Odpowiada za to proces samoorganizacji wakansów tlenowych i ich migracja do powierzchni z objętości kryształu. Analizy przedstawione w tej pracy bezpośrednio odnoszą się do struktur generowanych w tych samych warunkach wstępnej redukcji kryształu TiO_2 jak w pracy H2. **Znaczącym wkładem do wiedzy o mechanizmach nanoprzewodzenia w tych materiałach jest wyjaśnienie przyczyny formowania się ścieżek przewodzących prąd elektryczny w izolatorze.** Wykazano, że właściwości elektryczne powierzchni determinuje migracja defektów z objętości materiału, a nie jak wcześniej sądzono jedynie emisja tlenu z materiału. Praca została opublikowana w Scientific Reports, w 2019 roku (IF 4.0) i była cytowana 19 razy.

Podsumowując, cykl omawianych prac dotyczących ditlenku tytanu wnosi znaczący wkład do wiedzy o mechanizmach odpowiedzialnych za formowanie w nanoskali przestrzennego rozkładu właściwości elektrycznych na powierzchni tego materiału.

Metodologia prowadzenia lokalnych pomiarów elektrycznych przy wykorzystaniu mikroskopu sił atomowych, rozwinięta przez autora do badania tlenków tytanu została zaadoptowana do badania tlenkowo-grafenowych warstw funkcjonalnych. Wyniki tych badań zostały opublikowane

w cyklu trzech prac prezentujących badania modyfikowanych tlenków grafenu i stanowią drugą część dorobku habilitacyjnego. W pracy H4 badano powierzchnię cienkiej warstwy tlenku grafenu poddanej chemicznej redukcji w kwasie bromowodorowym. Wykazano, że uzyskana w ten sposób powierzchnia funkcjonalna może być wykorzystywana jako transparentna elektroda na potrzeby elastycznej, przezroczystej elektroniki. Zmodyfikowany materiał może być zastosowany w istniejących i wykorzystywanych na skalę przemysłową drukarkach atramentowych. Podobnie jak w przypadku powierzchni funkcjonalnych tlenków metali, w tej pracy udało się autorowi powiązać właściwości chemiczne zredukowanej powierzchni tlenku grafenu z niejednorodnościami występującymi w rozkładzie właściwości elektrycznych w skali nano. Wykazano, że GO przed redukcją zawiera szereg typów defektów w dołączonych do płaszczyzny grafenowej grupach funkcyjnych, w których dominowały grupy karbonylowe. Redukcja materiału opiera się na usuwaniu grup funkcyjnych i odbudowie struktury grafenowej. Proces ten jest selektywny i nie usuwa wszystkich defektów. Pozostałe defekty zaburzają przewodnictwo elektryczne. **Znaczący wkład tej publikacji polega na połączeniu naukowych metod charakteryzacji materiały z istniejącą przemysłową technologią druku.** Wytworzono na bazie grafenu atrament w pełni kompatybilny z dostępnymi na rynku dyszami drukarskimi. Ponadto zaproponowano procedurę redukcji chemicznej po druku, która prowadzi do przywrócenia przewodności elektrycznej bez niszczenia podłoża. Zaprezentowane wyniki pokazują wyjątkowy potencjał tlenku grafenu w zakresie szybkiego i opłacalnego wdrożenia komercyjnego do produkcji elastycznej elektroniki. Praca została opublikowana w Applied Physics Letters, w 2015 roku (IF 3.1) i była cytowana 36 razy, a więc najczęściej z prac wchodzących w zakres osiągnięcia habilitacyjnego. Świadczy to o znaczeniu prac łączących badania podstawowe z możliwością wykorzystania komercyjnego.

W kolejnej pracy H5 autor rozwija tematykę właściwości elektrycznych cienkich warstw GO przeprowadzając analizę możliwości ich kontrolowanej redukcji w obszarach o rozmiarach nanometrów i uzyskania pożądaných właściwości przewodzących. Dokonując stymulacji elektrycznej w nanoskali spowodował habilitant lokalną redukcję tlenku grafenu poprzez usunięcie grup funkcyjnych i odtwarzanie struktury grafenowej. Zaproponował wyjaśnienie obserwowanego zjawiska, w którym zredukowany przez kontakt z ostrzem AFM obszar GO przyjmuje rolę elektrody i pozwala na wtórną redukcję obszarów przyległych. Obserwowane procesy zmian przewodnictwa elektrycznego są związane z reakcją elektrochemiczną w obecności wody. **Znaczącym osiągnięciem tej pracy jest dyskusja możliwej rozdzielczości przestrzennej procesów modyfikacji elektrycznej powierzchni tlenku grafenu oraz wykazanie, że złożoność budowy GO pozwala na odłączanie w procesie redukcji poszczególnych grup funkcyjnych i zastępowanie ich w procesie oksydacji innymi.** Publikacja ta uzupełniła większość publikowanych wcześniej wyników, dla układów wieloskładnikowych, które były trudne do jednoznacznego opisu podstawowych mechanizmów fizycznych. Zastosowanie układu jednoskładnikowego umożliwiło wiarygodną interpretację obserwowanych zjawisk. Praca została opublikowana w Applied Physics Letters, w 2015, (IF 3.1) i była cytowana 16 razy.

W publikacji H6 została przeanalizowana możliwość lokalnej redukcji GO poprzez oddziaływanie ze światłem, promieniowaniem X oraz przepływem prądu elektrycznego o niewielkich gęstościach. **Znaczący wkład tej pracy do badań prowadzonych w nanoskali to wskazanie na bardzo istotny problem modyfikacji materiału i jego właściwości elektrycznych podczas standardowych pomiarów, które w nanoskali mogą wpływać na właściwości próbki.** Autor podkreśla, że możliwość niecelowej redukcji GO w trakcie charakteryzacji powinien być

uwzględniany każdorazowo w dobrych praktykach pomiarowych. Badania właściwości elektrycznych przedstawione w tej publikacji wykazały, że redukcja tlenków w nanoobszarach ma przebieg niejednorodny przestrzennie pomimo jednakowej stymulacji prądowej powierzchni GO. Wzrost przewodnictwa elektrycznego następuje nierównomiernie i dotyczy w głównej mierze wybranych klastrów materiału o niewielkich rozmiarach. Zaobserwowanie tych właściwości było możliwe dzięki zastosowaniu mapowania przewodnictwa elektrycznego w skali nanometrowej. Praca została opublikowana w Carbon, w 2016 (IF 6.3) i była cytowana 22 razy.

Podsumowując analizę publikacji będących osiągnięciem habilitacyjnym w mojej ocenie stanowią one znaczący wkład do wiedzy o właściwościach badanych materiałów tlenkowych i procesach obserwowanych w nanoskali.

Ocena pozostałych osiągnięć naukowych habilitanta

Habilitant ma również znaczące osiągnięcia naukowe nie wchodzące do osiągnięcia habilitacyjnego. Należą do nich 4 prace opublikowane niedawno, w których habilitant charakteryzował modyfikowane materiały za pomocą spektroskopii XPS. Był on również promotorem pomocniczym w rozprawie doktorskiej Doroty Kowalczyk, gdzie badano pracę wyjścia elektronów w zmodyfikowanych materiałach.

Pozostałe osiągnięcia podzielił na trzy rozdzielne tematyki:

- *Badanie morfologii i właściwości elektrycznych materiałów dwuwymiarowych* -16 publikacji
- *Badanie struktury i właściwości tlenków metali przejściowych* – 5 publikacji, 2 rozdziały w monografii
- *Badanie morfologii nanostruktur* – 2 publikacje

Publikacje z zakresu tych zagadnień powstały we współpracy z ośrodkami krajowymi i zagranicznymi i udział habilitanta jest również dobrze opisany. Tak więc habilitant aktywnie prowadził prace naukowe poza dorobkiem habilitacyjnym. Prace te ukazały się w dobrych i bardzo dobrych czasopismach, wiele z nich zostało opublikowane w latach późniejszych niż dorobek habilitacyjnych. Świadczy to o dużej aktywności naukowej i samodzielności habilitanta. Przed uzyskaniem stopnia doktora opublikował 5 prac. Jedną z nich jest praca przeglądową cytowaną około 250 razy. Dorobek ten niewątpliwie zasługuje na bardzo dobrą ocenę i jest przejrzysto opisany w Autoreferacie co bardzo ułatwia jego ocenę.

Ocena dorobku dydaktycznego, organizacyjnego oraz popularyzującego naukę

Habilitant był promotorem pomocniczym w 2 zakończonych przewodach doktorskich i jednym realizowanym aktualnie w ramach projektu NCN. Był również opiekunem 2 prac magisterskich i 2 inżynierskich oraz recenzentem 7 prac inżynierskich. Ponadto prowadził szereg zajęć dydaktycznych na kierunkach fizyka oraz informatyka. Jego dorobek dydaktyczny jest bardzo znaczący nawet jak na pracownika uniwersyteckiego. Habilitant może się również pochwalić znaczącymi osiągnięciami organizacyjnymi: członkostwem w komitetach organizacyjnych konferencji krajowych i międzynarodowych, radzie naukowej, komisjach d.s. aparatury badawczej itp... Uczestniczył również w wielu akcjach popularyzujących naukę, prowadził seminaria i wykłady w wielu jednostkach zewnętrznych. Wystąpił w serii materiałów i komunikatów medialnych popularyzujących badania nanotechnologiczne. Wszystko to świadczy,

że jest dojrzałym, w pełni samodzielnym, bardzo aktywnym pracownikiem naukowym co znalazło uznanie w wielu nagrodach i wyróżnieniach za osiągnięcia naukowe i patentowe.

Habilitant aktywnie prezentował swoje wyniki na konferencjach naukowych w kraju i za granicą (25 prezentacji, w tym 10 ustnych, jedna z nich wykład zaproszony). W 101 prezentacjach był współautorem nie prezentując wyników osobiście. Bierze udział obecnie w realizowaniu 5 projektów NCN. W jednym z nich jest kierownikiem. 7 innych projektów zostało zrealizowanych. W jednym z nich był kierownikiem. Tak więc potrafi zdobywać fundusze na prowadzone badania.

Prowadził również działalność recenzencką publikacji w czasopismach międzynarodowych oraz wniosków grantowych dla agencji finansujących zagranicznych oraz krajowych co świadczy o uznaniu w środowisku naukowym.

Jest współautorem patentów, zgłoszeń patentowych oraz wdrożeń technologicznych.

W świetle tego co zostało powiedziane, rozpatrując prace stanowiące osiągnięcie habilitacyjne dr Macieja Rogala z całym przekonaniem stwierdzam, że publikacje te wnoszą znaczący wkład do wiedzy o przestrzennym rozkładzie właściwości elektrycznych w nanoskali oraz możliwości lokalnej redukcji materiałów tlenkowych. W mojej ocenie wszystkie przedstawione osiągnięcia w pełni spełniają wymogi określone w Art.219 . ust. 1 niezbędne do nadania stopnia doktora habilitowanego. Dlatego wnioskuję do Komisji Uniwersytetu Łódzkiego ds. stopni naukowych o nadanie dr Maciejowi Rogala stopnia naukowego doktora habilitowanego w dyscyplinie nauki fizyczne. Moim zdaniem osiągnięcia dr Macieja Rogala zasługują na wyróżnienie.

