



Prof. dr hab. Marek Nowicki, tel: (+48) 71 375 94 54
e-mail: marek.nowicki@uwr.edu.pl, www.wfa.uwr.edu.pl

Wrocław, 05.03.2024

**Recenzja osiągnięć naukowych dra Macieja Rogali w związku z postępowaniem
o nadanie stopnia doktora habilitowanego**

Pan dr Maciej Rogala uzyskał tytuł magistra fizyki w 2008 roku, a stopień doktora fizyki w 2012 roku na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego (UŁ) na podstawie rozprawy doktorskiej pt. *Przełączanie rezystywne w TiO_2* . Promotorami w przewodzie doktorskim byli prof. dr hab. Zbigniew Klusek oraz prof. dr hab. Krzysztof Szot. W okresie od 2008 do 2010 roku był on zatrudniony na stanowisku naukowca w Forschungszentrum Jülich GmbH w Niemczech. Podczas stażu naukowego w Institut für Festkörperforschung w grupie prof. R. Waser'a pracował on nad opisem zjawiska przełączania rezystywnego w nanoskali na potrzeby ReRAM. W 2012 roku został on zatrudniony na stanowisku adiunkta naukowego, a w 2015 roku na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego w Katedrze Fizyki Ciała Stałego na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego. W 2013 roku dr Rogala odbył staż podoktorski w Forschungszentrum Jülich GmbH, gdzie zajmował się badaniem roli defektów krystalograficznych w przewodnictwie elektrycznym materiałów funkcjonalnych. Podczas swojej pracy na Uniwersytecie Łódzkim dr Rogala realizował projekt wdrożeniowy dotyczący drukowanej elektroniki elastycznej w oparciu o nanomateriały, brał udział w konsorcjach naukowo-przemysłowych będąc głównym wykonawcą w projekcie wdrożeniowym z zakresu przemysłowego druku wielowarstwowego, był kierownikiem projektów Sonata i Sonata BIS realizowanych w ramach konkursów NCN oraz był wykonawcą w projektach NCN dotyczących badań materiałów niskowymiarowych.

Jako osiągnięcie naukowe dr Maciej Rogala przedstawił cykl sześciu powiązanych tematycznie artykułów naukowych zatytułowany *Badania przestrzennego rozkładu właściwości elektrycznych w nanoskali oraz możliwości lokalnej redukcji materiałów tlenkowych*. Prace zostały opublikowane w latach 2013-2019 w Applied Physics Letters (3), Advanced Functional Materials

(1), Scientific Reports (1) oraz Carbon (1). Opublikowane artykuły dotyczą badań właściwości ditlenku tytanu $\text{TiO}_2(110)$ oraz tlenku grafenu GO przy zastosowaniu powierzchniowo czułych metod eksperymentalnych takich jak: spektroskopia fotoelektronów w zakresie promieniowania rentgenowskiego (XPS), mikroskopia sił atomowych (AFM) z jednoczesnym pomiarem prądu, skaningowa spektroskopia tunelowa (STS) i spektroskopia ramanowska. Ponadto, w pracach przedstawiono wyniki teoretycznych badań otrzymanych przy zastosowaniu teorii funkcjonału gęstości DFT. Publikacje powstały po uzyskaniu stopnia doktora, a ich tematyka dotyczy w szczególności przełączania rezystywnego zachodzącego w materiałach tlenkowych na skutek stymulacji elektrycznej prowadzącej do zmiany wartościowości tworzących te materiały jonów, dyfuzji defektów i w konsekwencji lokalnej zmiany oporu. Autor cyklu prac analizuje właściwości elektryczne badanych materiałów i wskazuje na możliwość ich lokalnej modyfikacji w powiązaniu z ich składem chemicznym, strukturą krystalograficzną i elektronową. Prace dotyczą badań podstawowych mających na celu poznanie i zrozumienie właściwości elektrycznych tlenków, które mogą mieć zastosowania praktyczne i być podstawą przyszłych technologii opartych na wiedzy. Właściwości fizykochemiczne tlenków takich jak rutyl i tlenek grafenu związane z ich strukturą krystalograficzną i elektronową oraz możliwość ich funkcjonalizacji powoduje, że są one interesującymi obiektami badań zarówno z poznawczego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Ich zastosowanie np. w nanotechnologii, optoelektronice, czy też w sensoryce wymaga szczegółowych badań przy użyciu możliwie wielu spektroskopowych i mikroskopowych metod badawczych. Badania podstawowe przedstawione w cyklu publikacji jako osiągnięcie naukowe habilitanta wpisują się w tę tematykę i są w pełni uzasadnione. Dr Maciej Rogala jest pierwszym autorem wszystkich publikacji [H1-H6], co wskazuje na jego dominujący wkład w ich powstawaniu. Główny wkład habilitanta w powstawanie prac wynika również z oświadczeń współautorów.

Pierwsza praca [H1] opublikowana w Applied Physics Letters w 2013 roku zawiera wyniki badań dotyczących wpływu trawienia $\text{TiO}_2(110)$ w warunkach ultrawysokiej próżni wiązką jonów argonu na morfologię, stechiometrię i przewodnictwo elektryczne powierzchni. Autor pracy pokazał związek między morfologią powierzchni po bombardowaniu jonami Ar ze zmianą wartościowości jonów tworzących powierzchnię i warstwy przypowierzchniowe oraz wzrostem przewodnictwa elektrycznego próbki w skali nanometrowej. W pracy przedstawiono zmiany rezystancji powierzchni w funkcji czasu bombardowania i ekspozycji na tlen oraz przekrój poprzeczny kryształu po jego przełamaniu. Prezentowane wyniki świadczą o przełączaniu rezystywnym pomiędzy stanem półprzewodnikowym i metalicznym na wskutek przepływającego

prądu między próbnikiem mikroskopu AFM i podłożem, co może być wykorzystane do zapisu informacji.

W drugiej pracy [H2] opublikowanej w *Advanced Functional Materials* w 2015 roku badano przełączanie rezystywne powierzchni (110) monokryształu rutyłu poddanej różnym warunkom termicznym. Przedstawione mapy przewodnictwa ujawniają charakterystyczne struktury, które przypisuje się defektom w kryształach i migracji wakansów tlenowych. Opracowana procedura obróbki cieplnej umożliwiła indukowanie stanów o niskiej rezystancji. Analiza przekroju próbki ujawnia rozgałęzioną strukturę dyslokacji w kryształach, wykazującą duże zagęszczenie przy powierzchni TiO_2 . Możliwość przełączania rezystywnego w wyniku stymulacji elektrycznej uwidoczniła jest w postaci odwzorowanej matrycy na powierzchni ditlenku tytanu. W ten sposób pokazano, że możliwy jest nadruk elektryczny w skali nanometrowej, który charakteryzuje mniejsza lokalna rezystancja w porównaniu z obszarami próbki, które nie były poddawane takiej stymulacji. Obecność obszarów wyindukowanych niskim napięciem utożsamiana jest z aglomeracją luk tlenowych. Obliczenia z pierwszych zasad DFT przeprowadzone dla defektów w strukturze TiO_2 ujawniają zmiany gęstości ładunku i struktury elektronowej w tym materiale.

Trzecia praca [H3], która ukazała się w czasopiśmie *Scientific Reports* w 2019 roku, dotyczy termicznej redukcji powierzchni $\text{TiO}_2(110)$. Na podstawie analizy wyników XPS uzyskanych na bieżąco w danej temperaturze próbki pokazano, że do maksymalnej redukcji powierzchni dochodzi nie w trakcie ogrzewania, jak się zwykle przyjmowało, lecz podczas chłodzenia próbki. Powyższe wnioski były możliwe dzięki szczegółowej analizie sygnału XPS, identyfikacji składników próbki oraz jej stechiometrii w obszarze przypowierzchniowym. Zaobserwowany proces autor przewodnika przypisuje migracji wakansów tlenowych między powierzchnią i objętością kryształu, który wynika z różnicy między wartościami energii tworzenia defektów na powierzchni i wewnątrz próbki.

Następna praca [H4] opublikowana w *Applied Physics Letters* w 2015 roku dotyczy badań tlenku grafenu, który wykorzystano do uzyskania funkcjonalnej powierzchni na podłożu poliestrowym. Publikacja stanowi przykład zastosowania tlenku grafenu w technologii nadruku do wytworzenia transparentnej i elastycznej elektrody na potrzeby elastycznej elektroniki. W pracy pokazano, że redukcja chemiczna naniesionej warstwy potwierdzona analizą widm XPS i Ramana skutkuje przywróceniem przewodności elektrycznej. Badania lokalnego przewodnictwa przy zastosowaniu skaningowej spektroskopii tunelowej (STS) wykazały, że powstałe warstwy nie są w

pełni jednorodne pod względem rezystancji wykazując lokalnie charakter albo metaliczny albo półprzewodnikowy.

Kolejna publikacja [H5] wydana w Applied Physics Letters w 2015 roku stanowi kontynuację badań dotyczących lokalnego przełączania rezystywnego w tlenku grafenu przy użyciu próbnika AFM. Rejestrowane zależności prądu w funkcji napięcia $I(V)$ dla różnych polaryzacji potwierdzają możliwość takiego przełączania. Badania przeprowadzone dla tego tlenku dowodzą, że zmiana wilgotności skutkuje wzrostem obszaru poddanego stymulacji elektrycznej. Tym samym autor wskazuje na rolę wody w procesie elektrochemicznej redukcji tlenku grafenu. Obserwacje poparte są szczegółową analizą maksimów fotoemisyjnych rejestrowanych przy zastosowaniu XPS.

Ostatnia praca cyklu [H6] opublikowana w czasopiśmie Carbon w 2016 roku dotyczy problematyki modyfikacji próbki podczas pomiarów pod wpływem czynników zewnętrznych. Autor porusza problem zmian właściwości tlenku grafenu w trakcie pomiarów pod wpływem czynników wzbudzających próbkę, którymi są padające promieniowanie rentgenowskie i światło oraz przepływ prądu elektrycznego. Uwzględnienie tych czynników jest istotne z punktu widzenia charakteryzacji badanych materiałów i powinno stanowić podstawę dobrych praktyk pomiarowych. Ponadto, dr Rogala wskazuje na niejednorodność przestrzenną zachodzących zmian obserwowaną w rejestrowanych mapach przewodnictwa elektrycznego, co tłumaczy klastrową strukturą tlenku grafenu w skali nanometrowej.

Oprócz cyklu sześciu publikacji stanowiących główne osiągnięcie naukowe habilitanta dorobek naukowy dr Macieja Rogali obejmuje ponadto dwa rozdziały opublikowane w monografiach naukowych oraz 27 publikacji, które ukazały się po uzyskaniu stopnia doktora. Ich tematyka dotyczy właściwości materiałów dwuwymiarowych takich jak dichalkogenki metali przejściowych (MoS_2 oraz WS_2) i tlenki metali badanych przy zastosowaniu spektroskopii fotoelektronowej XPS i UPS. Badania obejmowały również zastosowanie mikroskopii kelwinowskiej KPFM w celu wyznaczenia pracy wyjścia i skonfrontowania otrzymanych wartości z wynikami UPS. Ponadto, badania dotyczyły morfologii i właściwości elektrycznych materiałów dwuwymiarowych, struktury i właściwości tlenków metali przejściowych (TiO_2 oraz SrTiO_3) oraz morfologii nanostruktur. Dodatkowe sześć prac opublikowano przed uzyskaniem stopnia doktora. Wedle Web of Science Core Collection liczba cytowań (bez autocytowań) wszystkich prac wynosi 653, indeks Hirscha wynosi 13, liczba punktów ministerialnych wynosi 3062, a całkowity współczynnik wpływu czasopism, w których opublikowano wyniki badań równy jest 192.6.

Po uzyskaniu stopnia doktora wyniki badań były przedstawiane przez dr Rogalę podczas konferencji naukowych w formie prezentacji plakatowych (15), wystąpień ustnych (8) i wykładów proszonych (2). Ponadto, dr Rogala był współautorem 101 wystąpień konferencyjnych, których osobiście nie prezentował. Przed doktoratem tych wystąpień było: pięć plakatowych i jedno ustne. Dr Rogala legitymuje się współpracą z takimi ośrodkami naukowymi jak m.in.: Forschungszentrum Jülich GmbH, w którym przebywał na stażach naukowych, Uniwersytet Jagielloński, Uniwersytet Śląski w Katowicach, Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych Polskiej Akademii Nauk w Łodzi oraz Narodowe Laboratorium Fotowoltaiki. Podstawowym miejscem zatrudnienia dr Rogali jest Uniwersytet Łódzki.

Dr Rogala brał udział w organizacji trzech krajowych i międzynarodowych konferencji naukowych. Na szczególną uwagę zasługuje pełnienie funkcji zastępcy przewodniczącego komitetu organizacyjnego międzynarodowej konferencji 36th ECOSS, która odbyła się w 2023 roku w Łodzi. Od 2013 roku dr Maciej Rogala realizował 12 projektów badawczych w ramach grantów NCN (10) i NCBiR (2) pełniąc funkcję wykonawcy (10) i kierownika (2). Habilitant był recenzentem manuskryptów na zlecenie dziewięciu czasopism naukowych o międzynarodowym obiegu takich jak m.in.: Carbon, Scientific Reports, Advanced Science, Physica Status Solidi, Solid-State Electronics, Phase Transitions, Acta Physica Polonica, Nanomaterials oraz ACS Applied Materials & Interfaces. Ponadto, dr Rogala uczestniczył w zespołach oceniających wnioski badawcze na zlecenie krajowych (Uniwersytet Łódzki, Ministerstwo Edukacji i Nauki) i zagranicznych (Czech Science Foundation, Department of Energy USA) instytucji. W ramach współpracy z otoczeniem gospodarczym habilitant prowadził badania z przedsiębiorstwem QWERTY sp. z o.o dotyczące druku elektroniki elastycznej i brał udział we wdrożeniu tej technologii. Ponadto, dr Rogala jest współautorem dwóch zgłoszeń patentowych i dwóch patentów.

Dr Maciej Rogala legitymuje się osiągnięciami w zakresie kształcenia kadry naukowej pełniąc funkcję promotora pomocniczego w trzech przewodach doktorskich, będąc recenzentem rozprawy doktorskiej na zlecenie University of Canterbury w Nowej Zelandii, będąc promotorem trzech prac magisterskich i jednej inżynierskiej oraz recenzentem siedmiu prac inżynierskich. Do osiągnięć dydaktycznych dr Rogali należy zaliczyć prowadzenie wykładów, ćwiczeń i pracowni dla kierunków fizyka i informatyka, które spotkały się z pozytywnym odbiorem studentów. Ponadto, dr Rogala jest członkiem Rady Wydziału, komisji ds. udostępniania infrastruktury badawczej Uniwersytetu Łódzkiego oraz aktywnie uczestniczył w projektach realizowanych w Katedrze

Fizyki Ciała Stałego. W ramach działalności popularyzatorskiej dr Rogala brał udział w Festiwalach Nauki Techniki i Sztuki, zajęciach dla młodzieży szkolnej oraz komunikatach medialnych. Ponadto, dr Rogala prowadził seminaria i wykłady w zewnętrznych jednostkach naukowych oraz jest laureatem nagród indywidualnych i zespołowych za osiągnięcia naukowe przyznane przez Prezesa PAN, Rektora Uniwersytetu Łódzkiego, Fundację Uniwersytetu Łódzkiego oraz zdobył srebrny medal na Międzynarodowych Targach Wynalazków w Paryżu.

Wymienione w autoreferacie osiągnięcia naukowe, organizacyjne, dydaktyczne, popularyzujące naukę oraz wdrożeniowe oceniam wysoko. Wszystkie osiągnięcia spełniają kryteria służące do oceny dorobku osoby ubiegającej się o stopień doktora habilitowanego. Jestem w pełni przekonany, że całkowity dorobek naukowy przedstawiony w autoreferacie spełnia wymagania określone w art. 219 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*. Dlatego, wnoszę o nadanie dr Maciejowi Rogali stopnia doktora habilitowanego.



Prof. dr hab. Marek Nowicki