

# AUTOREFERAT

**dr Maciej Rogala**

Katedra Fizyki Ciała Stałego  
Wydział Fizyki i Informatyki  
Stosowanej  
Uniwersytetu Łódzkiego



*Tematyka głównych osiągnięć naukowych:*

**Badania przestrzennego rozkładu właściwości elektrycznych w nanoskali oraz możliwości lokalnej redukcji materiałów tlenkowych**

*Łódź, wrzesień 2023 r.*

## Autoreferat

1. *Imię i nazwisko:*

**Maciej Rogala** (Maciej Jakub Rogala używający imienia Maciej)

2. *Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.*

- Tytuł zawodowy: **magister fizyki** – Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego 2008-06-25 – tytuł pracy magisterskiej: „*Badanie morfologii i struktury elektronowej nanowłókien zbudowanych na bazie węgla*” promotor: dr Paweł Kowalczyk
- Stopień naukowy: **doktor nauk fizycznych** w zakresie fizyki – fizyki ciała stałego - Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego 2012-10-24 – tytuł rozprawy doktorskiej: „*Przełączanie rezystywne w  $TiO_2$* ” promotorzy: prof. dr hab. Zbigniew Klusek, prof. dr hab. Krzysztof Szot recenzenci: prof. dr hab. Jacek Szade, dr hab. Piotr Cyganik  
*rozprawa na wniosek recenzentów została wyróżniona*

3. *Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.*

**2008 – 2010** Institut für Festkörperforschung (Peter Grünberg Institute), Forschungszentrum Jülich (Niemcy) – zatrudniony na stanowisku “naukowiec gość” (18 miesięcy)

- Staż naukowy w grupie (instytucie) prof. R. Waser’a
- Praca nad opisem zjawiska przełączania rezystywnego w nanoskali na potrzeby ReRAM

**2012 – 2015** Uniwersytet Łódzki – zatrudniony na stanowisku adiunkta naukowego

- Stanowisko naukowo – badawcze w Katedrze Fizyki Ciała Stałego
- Realizacja projektu wdrożeniowego z obszaru drukowanej elektroniki elastycznej w oparciu o nanomateriały (GRAF-TECH – NCBIr)

**2013 – 2013** Peter Grünberg Institute, Forschungszentrum Jülich (Niemcy) – staż podoktorski (3 miesiące)

- Badania roli defektów krystalograficznych w przewodnictwie elektrycznym materiałów funkcjonalnych

**2015 – obecnie** Uniwersytet Łódzki – zatrudniony na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego

- Stanowisko naukowo – dydaktyczne w Katedrze Fizyki Ciała Stałego
- Udział w konsorcjach naukowo-przemysłowych, główny wykonawca w projekcie wdrożeniowym z zakresu przemysłowego druku wielowarstwowego (POIR.04.01.02-00-0046)
- Kierownik 2-óch projektów (Sonata oraz Sonata BIS) przyznanych w ramach konkursów NCN
- Wykonawca projektów NCN z zakresu badań nad materiałami niskowymiarowymi, kierowanie zadaniami badawczymi (Certyfikat PRINCE2® Foundation z metodyki zarządzania)

4. *Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.*

**Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych zgodnie z art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.**

**Tematyka cyklu: *Badania przestrzennego rozkładu właściwości elektrycznych w nanoskali oraz możliwości lokalnej redukcji materiałów tlenkowych.***

Jako osiągnięcia naukowe stanowiące wkład w rozwój dyscypliny nauk fizycznych przedstawiam ubiegając się o nadanie stopnia doktora habilitowanego cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych, 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 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Na wymieniony cykl składają się niżej podane publikacje, do których wniosłem dominujący wkład w szczególności w obszarze badań i analiz przewodnictwa elektrycznego w nanoskali oraz lokalnej redukcji materiałów tlenkowych. Szczegółowy wkład poszczególnych autorów w powstanie artykułów został przez nich potwierdzony w oświadczeniach w załącznikach 8H1, 8H2, 8H3, 8H4, 8H5 oraz 8H6 do Wniosku o przeprowadzenie postępowania.

Lista publikacji wchodzących w skład cyklu:

- H1. **M. Rogala**, Z. Klusek, C. Rodenbücher, R. Waser, K. Szot  
*Quasi-two-dimensional conducting layer on TiO<sub>2</sub> (110) introduced by sputtering as a template for resistive switching*  
Applied Physics Letters, 102, 131604 (2013), cytowania - **26**
- H2. **M. Rogala**, G. Bihlmayer, W. Speier, Z. Klusek, C. Rodenbücher, K. Szot  
*Resistive Switching of a Quasi-Homogeneous Distribution of Filaments Generated at Heat-Treated TiO<sub>2</sub> (110)-Surfaces*  
Advanced Functional Materials, 25, 6382 (2015), cytowania - **20**
- H3. **M. Rogala**, G. Bihlmayer, P. Dąbrowski, C. Rodenbücher, D. Wrana, F. Krok, Z. Klusek, K. Szot  
*Self-reduction of the native TiO<sub>2</sub> (110) surface during cooling after thermal annealing – in-operando investigations*  
Scientific Reports, 9, 12563 (2019), cytowania - **19**
- H4. **M. Rogala**, I. Własny, P. Dąbrowski, P.J. Kowalczyk, A. Busiakiewicz, W. Kozłowski, L. Lipińska, J. Jagiełło, M. Aksienionek, W. Strupiński, A. Krajewska, Z. Sieradzki, I. Krucińska, M. Puchalski, E. Skrzetuska, Z. Klusek  
*Graphene oxide overprints for flexible and transparent electronics*  
Applied Physics Letters, 106(4), 041901 (2015), cytowania - **36**
- H5. **M. Rogala**, P.J. Kowalczyk, P. Dąbrowski, I. Własny, W. Kozłowski, A. Busiakiewicz, S. Pawłowski, G. Dobiński, M. Smolny, I. Karaduman, L. Lipińska, R. Kozinski, K. Librant, J. Jagiełło, K. Grodecki, J.M. Baranowski, K. Szot, Z. Klusek  
*The role of water in resistive switching in graphene oxide*  
Applied Physics Letters, 106, 263104 (2015), cytowania - **16**
- H6. **M. Rogala**, P. Dąbrowski, P.J. Kowalczyk, I. Własny, W. Kozłowski, A. Busiakiewicz, I. Karaduman, L. Lipińska, J.M. Baranowski, Z. Klusek  
*The observer effect in graphene oxide–How the standard measurements affect the chemical and electronic structure*  
Carbon, 103, 235 (2016), cytowania - **22**

W wybranym cyklu opisałem moje **badania przestrzennego rozkładu właściwości elektrycznych w nanoskali oraz możliwości lokalnej redukcji materiałów tlenkowych**. Osiągnięcia polegają na zbadaniu i interpretacji procesów i zjawisk, które decydują o właściwościach elektrycznych wybranych materiałów nieorganicznych (tlenków metali przejściowych) oraz organicznych (tlenków grafenu). Głównym znaczeniem osiągnięć dla dziedziny jest wykazanie, że w przypadku materiałów tlenkowych o ich właściwościach funkcjonalnych decydują procesy samoorganizacji zachodzące w skali nanometrowej. Przedstawione w cyklu badania dowodzą, że materiały tlenkowe są wysoce podatne na modyfikacje wywołane oddziaływaniem zewnętrznym. Jeśli takie modyfikacje prowadzone są lokalnie, to w naturalny sposób wprowadzają niejednorodności w przestrzennym rozkładzie właściwości elektrycznych. Jednak

nawet jeśli oddziaływanie jest globalne, to materiały tlenkowe wykazują samoistną skłonność do tworzenia lokalnych niejednorodności. Zebrane i opublikowane wyniki dowodzą, że to właśnie niejednorodności mają dominujący wpływ na właściwości elektryczne materiałów determinując ich zastosowania oraz będąc obszarem możliwej optymalizacji na potrzeby nowoczesnej elektroniki.

Moje badania skupiły się na modelowych układach tlenkowych z obszaru materiałów organicznych i nieorganicznych. Zaplanowałem cykl badawczy i dobrałem materiały tak, aby ich struktura umożliwiała efektywne zachodzenie reakcji redukcji i oksydacji oraz migrację jonów. W szczególności wybrane materiały miały podlegać tym procesom na skutek przepływu prądu elektrycznego wywołanego zewnętrznym oddziaływaniem elektrycznym. Takie właściwości umożliwiają zachodzenie w materiałach zjawiska przełączania rezystywnego, w którym na skutek stymulacji elektrycznej materiału następuje migracja defektów, zmiana walencyjności jonów i w konsekwencji zmiana oporu elektrycznego. Zjawisko, to pozostaje w moim ścisłym obszarze zainteresowania, a w szczególności w swoich pracach skupiałem się na wytłumaczeniu podstawowych zjawisk fizycznych, które mu towarzyszą. Próba wyjaśnienia podstaw przełączania rezystywnego nie może się odbywać bez szerszej analizy właściwości elektrycznych materiałów i powiązania ich z lokalną strukturą krystalograficzną, chemiczną i elektronową. Wnioski z tych analiz przedstawione w omawianym cyklu stanowią moje osiągnięcia.

Na cykl składają się trzy prace opisujące badania prowadzone na ditlenku tytanu ( $\text{TiO}_2$ ) oraz trzy prace opisujące badania prowadzone na tlenku grafenu (GO).

W pracach przeplatają się wątki dotyczące samoorganizacji tlenków w warstwie powierzchniowej/przypowierzchniowej materiałów oraz temat redukcji wywoływanej zewnętrzną stymulacją. Wątki wzajemnie się uzupełniają jednak dla zachowania przejrzystości w poszczególnych publikacjach koncentrowałem się na jednej myśli przewodniej, która podkreślana była w tytule prac i najczęściej związana z potencjalnymi zastosowaniami aplikacyjnymi obserwowanych zjawisk. Wyniki przedstawione w tych pracach i stanowiące moje osiągnięcia dotyczą ściśle badań podstawowych właściwości materiałów i opisu ich fizycznej natury.

Wszystkie prace cyklu powstały w okresie po uzyskaniu stopnia doktora. Dwie prace z cyklu dotyczące  $\text{TiO}_2$  (H1, H2) zawierają również wyniki, które ujęte zostały wcześniej w rozprawie doktorskiej (obronionej w 2012 roku), ale są one wykorzystane w pracach tylko jako wstępna baza do opisywanych analiz. Prace te zawierają w dominującej części nowe, nieomawiane w rozprawie doktorskiej wyniki oraz główne wnioski, które zostały sformułowane na podstawie nowych danych. Tylko w zakresie tych nowych wyników i wniosków prace zostały włączone do cyklu dotyczącego opisu rozkładu przestrzennego właściwości elektrycznych i możliwości ich modyfikacji. W przedstawionym poniżej opisie

mojego wkładu w rozwój dziedziny nauk fizycznych uwzględnionego w cyklu publikacji nie będę opisywał tych odkryć, które uwzględnione zostały w rozprawie doktorskiej. We wszystkich pracach cyklu jestem głównym autorem, który przygotował koncepcję badań, przeprowadził eksperymenty dotyczące właściwości elektrycznych w nanoskali i możliwości ich modyfikacji oraz sformułował tezy i przygotował oryginalną wersję manuskryptów.

*Tematyka cyklu:*

**Badania przestrzennego rozkładu właściwości elektrycznych w nanoskali oraz możliwości lokalnej redukcji materiałów tlenkowych.**

*Motywacja powstania cyklu:*

Moimi badaniami chciałem dostarczyć wiedzy niezbędnej do pełniejszego poznania i zrozumienia właściwości elektrycznych materiałów tlenkowych i możliwości ich modyfikacji. Zaplanowałem badania na materiałach modelowych dla dwóch grup tlenków – materiałów nieorganicznych i organicznych, dla których istniał szeroki opis literaturowy i których struktura może być traktowana jako podstawowa i pozwalająca na wyciągnięcie szerszych wniosków. Do badań wybrałem równocześnie materiały o znacznym potencjale aplikacyjnym, które równolegle do prowadzonych przeze mnie analiz, były i nadal są przedmiotem pracy licznych zespołów opracowujących nowe idee układów elektronicznych. Chciałem w ten sposób wykorzystać posiadany przeze mnie warsztat z zakresu fizyki powierzchni do rozwiązania lub przynajmniej oznaczenia problemów materiałowych, w tych obszarach, które są najbardziej pilne i które cieszą się dużym zainteresowaniem. Skupiłem się na materiałach podlegających reakcjom redukcji i oksydacji, które to determinują ich właściwości funkcjonalne. Był to ditlenek tytanu znajdujący potencjalne zastosowania między innymi w układach pamięciowych<sup>1</sup> i neuromorficznych<sup>2</sup> opartych o zjawisko przełączania rezystywnego oraz tlenek grafenu, będący elementem cienkowarstwowej elektroniki drukowanej<sup>3</sup> oraz również podlegający przełączaniu rezystywnemu<sup>4</sup>. Oba te materiały eksplorowane były intensywnie w badaniach właściwości elektrycznych przynosząc obiecujące rezultaty. Jednak w przypadku obu materiałów w momencie rozpoczęcia przeze mnie badań większość wniosków i wiedzy opierała się na charakterystykach elektrycznych globalnych układów pomiarowych. Brak było wystarczających i pogłębionych analiz podstawowych procesów zachodzących w nanoskali decydujących o właściwościach elektrycznych. Takie badania podstawowe są domeną fizyków ciała stałego, podczas gdy większość dostępnych wówczas wyników pochodziła z badań prototypowych urządzeń, znajdujących się w obszarze działalności inżynierii materiałowej i elektroniki. Wykonanie podstawowych analiz przestrzennego rozkładu właściwości elektrycznych w nanoskali oraz możliwości lokalnej redukcji materiałów tlenkowych miało na celu znaczne poszerzenie wiedzy w

dziedzinie fizyki, jednocześnie dostarczając podstaw fizycznych rozwoju nowoczesnej technologii.

*Opis osiągnięć naukowych przedstawionych w kolejnych pracach cyklu:*

W ramach doktoratu zajmowałem się opisem zjawiska przełączania rezystywnego w  $\text{TiO}_2$  wykazując możliwości modyfikacji elektrycznej materiału w nanoobszarach oraz opisując jej możliwe mechanizmy. Tę tematykę intensywnie i systematycznie rozwijałem po doktoracie skupiając się w tym wypadku na opisie podstawowych zjawisk fizycznych zachodzących w badanym materiale. Sformułowałem jednocześnie bardziej ogólne tezy dotyczące właściwości przewodnictwa elektrycznego w nanoskali oraz jego modyfikacji.

W wyniku tych prac opublikowany został pierwszy artykuł cyklu:

(H1) **M. Rogala**, Z. Klusek, C. Rodenbücher, R. Waser, K. Szot

*Quasi-two-dimensional conducting layer on  $\text{TiO}_2$  (110) introduced by sputtering as a template for resistive switching*

*Applied Physics Letters*, 102, 131604 (2013)

W pracy opublikowano wyniki pokazujące wpływ bombardowania jonami argonu na zmiany stechiometrii, morfologii oraz przewodnictwa elektrycznego powierzchni  $\text{TiO}_2$  (110). W tym zakresie zebrane wyniki były również opisane w mojej rozprawie doktorskiej. Pokazałem w niej, że bombardowany kryształ przyjmuje na powierzchni granulární morfologię korelującą ze wzrostem przewodnictwa elektrycznego i zmianami walencyjności jonów tytanu. Niemniej sama publikacja powstała po uzyskaniu stopnia doktora i zawiera nowe wyniki i analizy, które wykonałem podczas mojego stażu podoktorskiego w Forschungszentrum Jülich. Nowe badania przedstawione w pracy pozwoliły opisać pełną naturę zmian zachodzących na skutek bombardowania jonowego. W moich badaniach podczas stażu podoktorskiego wykazałem, że wywołana bombardowaniem jonowym redukcja  $\text{TiO}_2$  jest bardzo ograniczona przestrzennie i opiera się na intensywnej przebudowie warstwy przypowierzchniowej o grubości 30 nm. Pokazałem, że na skutek intensywnej redukcji warstwa powierzchniowa kryształu ulega samoorganizacji i wykształca gęsto upakowaną strukturę składającą się z propagujących się w głąb kolumn o różnym stopniu redukcji. Te obserwacje były możliwe dzięki zastosowaniu techniki mapowania przewodnictwa elektrycznego materiału w skali nanometrowej. Przy czym w przeprowadzonych badaniach mapowałem przekrój poprzeczny kryształu (powierzchnię po przełamaniu), co pozwoliło na analizę głębokościową zachodzących zmian. Jednocześnie podczas mojego stażu podoktorskiego wykazałem, że w zredukowanym w ten sposób materiale można zaobserwować zjawisko przełączania rezystywnego. Zjawisko to polega na zmianie rezystancji materiału na skutek przepływu prądu elektrycznego<sup>5</sup>. Taka zmiana jest zachowywana po ustaniu przepływu prądu, ale może być cofnięta poprzez przepływ prądu o przeciwnym zwrocie lub większym natężeniu. Zjawisko

przełączania rezystywnego pozwala w ten sposób na trwałe, ale odwracalny zapis informacji (stanów rozróżnialnej rezystancji) w materiale i rozpatrywane jest jako podstawa działania pamięci rezystywnych (RRAM) lub szerzej układów memrystywnych<sup>6</sup>. Przełączanie rezystywne, polegające na wzmacnianiu lub osłabianiu przewodnictwa układu w zależności od kierunku i natężenia przepływającego prądu sygnału, rozpatrywane jest również jako analog pracy biologicznych synaps i podstawa budowy układów neuromorficznych (urządzeń odtwarzających architekturę ludzkiego mózgu)<sup>7</sup>. Zaobserwowane przeze mnie i opisane w omawianej pracy zjawisko przełączania pokazało, że materiał po przebudowie wywołanej bombardowaniem jonowym jest podatny na zmiany indukowane elektrycznie. Udało mi się, przykładając napięcie poprzez lokalny kontakt ostrzem mikroskopu sił atomowych, przeprowadzić materiał ze stanu półprzewodnikowego do metalicznego. Jednocześnie, co najistotniejsze, wykazałem, że w przełączaniu i zmianie rezystancji dominujący udział odgrywa modyfikacja połączeń między ziarnami materiału, które powstały w procesie bombardowania. Na etapie publikowania artykułu w literaturze dominował pogląd, że zmiany wprowadzane w trakcie przełączania rezystywnego mają często charakter jednorodny. Moje badania podały przykład, że takie zmiany mogą być oparte na układzie wysoce niejednorodnym i być ściśle związane z obserwowaną strukturą klastrów o różnym stopniu redukcji. Co więcej w trakcie takich zmian nie musi dochodzić do pełnej przebudowy chemicznej klastrów, ale wyłącznie zmiany walencyjności w obszarach połączeń między klastrami, które dominują nad obserwowanym przewodnictwem elektrycznym. Zmiana walencyjności i związanego z nią przewodnictwa elektrycznego następuje na skutek redukcji lub oksydacji wywołanej lokalną migracją jonów tlenu.

*W omawianej pracy mój indywidualny wkład obejmował: przygotowanie koncepcji badań, przeprowadzenie pomiarów elektrycznych w nanoskali, przeprowadzenie procesów przełączania rezystywnego, mapowanie przewodnictwa w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni, przeprowadzenie pomiarów XPS, analizę wyników, sformułowanie wniosków, przygotowanie oryginalnej wersji manuskryptu oraz przygotowanie odpowiedzi na recenzje i ostatecznej wersji manuskryptu.*

Rozszerzeniem opisu niejednorodności przewodnictwa elektrycznego i jego zmian w ditlenku tytanu jest drugi artykuł cyklu:

(H2) **M. Rogala**, G. Bihlmayer, W. Speier, Z. Klusek, C. Rodenbücher, K. Szot  
*Resistive Switching of a Quasi-Homogeneous Distribution of Filaments Generated at Heat-Treated TiO<sub>2</sub> (110)-Surfaces*  
Advanced Functional Materials, 25, 6382 (2015)

W pracy przywołano fragment wyników eksperymentalnych prezentowany wcześniej w rozprawie doktorskiej w postaci map przewodnictwa dowodzących możliwości wysokorozdzielczej modyfikacji elektrycznej powierzchni TiO<sub>2</sub>. Mapy



te w zestawieniu z obrazami topograficznymi dowodziły, że obserwowana modyfikacja ma silny wpływ na właściwości elektryczne bez poważnej przebudowy morfologicznej materiału. Niemniej podstawą artykułu jest pełna i poparta nowymi szerszymi badaniami interpretacja mechanizmu wprowadzanych zmian, która została przeze mnie opracowana w trakcie mojej współpracy z Forschungszentrum Jülich w okresie po uzyskaniu stopnia doktora. Na tym etapie moich prac skoncentrowałem się na wyjaśnieniu jaki mechanizm odpowiada za możliwość niemal punktowej (obszary o rozmiarach 10 nm) modyfikacji elektrycznej materiału. Niewyjaśnionym problemem było tu głównie osiągnięcie efektu przewodnictwa dla lokalnych defektów zawieszonych w nieprzewodzącym otoczeniu matrycy kryształu  $\text{TiO}_2$ . W moich nowych badaniach udało się powiązać obserwowane struktury z obecnością w kryształce struktur defektowych w postaci wakansów tlenowych zorganizowanych wzdłuż kierunków [110] oraz [001] (defekty liniowe). Przeprowadzone analizy pozwoliły udowodnić, że zmiany elektryczne są możliwe dzięki obecności w materiale hierarchicznej sieci niestabilnych defektów liniowych oraz dodatkowo stabilnej struktury przewodzącej. Sformułowana i potwierdzona przeze mnie teza zakłada, że niestabilne defekty liniowe ulegają preferencyjnie modyfikacjom elektrycznym, natomiast aby zapewnić przez nie przepływ ładunku niezbędne jest istnienie w materiale sieci przewodzących struktur, która oparta jest na trwałych defektach krystalograficznych. W pracy wykazałem, że podstawą obserwowanych zmian rezystancji jest odłączanie i podłączanie generowanych defektów liniowych do istniejącej sieci, który to z kolei proces jest oparty o migrację jonów tlenu. Tym samym opublikowaną pracą dowiodłem wysokiego poziomu złożoności mechanizmów przewodnictwa w nanoskali oraz pokazałem wieloskładnikowy i wieloetapowy obraz zjawiska przełączania rezystywnego. Uwypukliłem jednocześnie dominującą rolę, którą w zjawisku przewodzenia prądu w kryształach mają naturalnie występujące defekty struktury krystalograficznej. Moje analizy były możliwe wyłącznie dzięki wykorzystaniu techniki mapowania przewodnictwa materiału poddawanego procesom redukcji i oksydacji, oraz mapowania przewodnictwa w płaszczyznach prostopadłych do tej powierzchni, gdzie uwidoczniła się hierarchiczna sieć stabilnych defektów krystalograficznych.

*W omawianej pracy mój indywidualny wkład obejmował: przygotowanie koncepcji badań, przeprowadzenie pomiarów i stymulacji elektrycznych w nanoskali, przeprowadzenie procesów przełączania rezystywnego, mapowanie przewodnictwa w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni, analizę wyników, sformułowanie wniosków, przygotowanie oryginalnej wersji manuskryptu oraz przygotowanie odpowiedzi na recenzje i ostatecznej wersji manuskryptu.*

Uzupełnieniem opisu nanoskalowej struktury defektów odpowiedzialnej za przewodnictwo elektryczne zawartych w powyższej publikacji są wyniki przedstawione w kolejnej pracy cyklu:

(H3) **M. Rogala**, G. Bihlmayer, P. Dąbrowski, C. Rodenbücher, D. Wrana, F. Krok, Z. Klusek, K. Szot  
*Self-reduction of the native TiO<sub>2</sub> (110) surface during cooling after thermal annealing – in-operando investigations*  
Scientific Reports, 9, 12563 (2019)

Opisałem w niej mechanizm, który decyduje o generowaniu defektów w tlenkach metali w procesie redukcji termicznej przy obecności gradientu chemicznego pomiędzy materiałem a otoczeniem. Przedstawione badania dowodzą, że obecne w zredukowanym termicznie materiale defekty, powstają głównie w procesie chłodzenia, a nie w wysokich temperaturach. Przeprowadzenie opisanych badań było możliwe wyłącznie dzięki zastosowaniu przeze mnie nietypowego układu pomiarowego w którym można było wykonywać pomiar składu chemicznego powierzchni (metodą spektroskopii elektronów w zakresie promieniowania X) bezpośrednio w trakcie wygrzewania próbki w temperaturach powyżej 1000 °C. Wykonywane wcześniej i publikowane analizy były oparte na pomiarach zmian składu chemicznego po procesie wygrzewania<sup>8</sup> (nie w trakcie). Moje badania pokazały, że istotna redukcja warstwy przypowierzchniowej następuje w trakcie chłodzenia na skutek samoorganizacji wakansów tlenowych i ich migracji pomiędzy wnętrzem kryształu a jego powierzchnią. Zjawisko migracji wakansów powiązałem z różnicami w wartościach energii tworzenia się defektów w warstwie przypowierzchniowej materiału i we wnętrzu kryształu oraz ich organizacją w defekty liniowe. Analizy przedstawione w pracy bezpośrednio odnoszą się do struktur defektowych opisywanych w pracy poprzedniej H2 (generowanych w tych samych warunkach wstępnej redukcji kryształu TiO<sub>2</sub>) i opisują przyczynę formowania się ścieżek przewodzących prąd elektryczny w izolatorze, który podlega procesom lokalnej redukcji i oksydacji. Moje badania dowodzą, że właściwości elektryczne powierzchni wyznaczone są głównie przez migrację defektów pomiędzy nią, a wnętrzem materiału, a nie jak wcześniej sądzono wyłącznie przez emisję tlenu z materiału. Dowiodłem, że intensywna zmiana stechiometrii w układzie opartym o tlenek metalu powinna być rozpatrywana jako silnie zlokalizowana w obszarze przypowierzchniowym, oraz że zmiana ta jest niejednorodna i oparta na nanoskalowych defektach. Wyniki opisywane w pracy zostały przeze mnie uzyskane w ramach współpracy z Forschungszentrum Jülich i opublikowane kilka lat po moim stażu doktorskim. Stanowią one dopełnienie poprzednich analiz, ponieważ wyjaśniają podstawową przyczynę formowania się przestrzennego rozkładu właściwości elektrycznych TiO<sub>2</sub>.

*W omawianej pracy mój indywidualny wkład obejmował: przygotowanie koncepcji badań, przeprowadzenie pomiarów elektrycznych w nanoskali, przeprowadzenie pomiarów XPS, przeprowadzenie pomiaru koncentracji defektów prostopadle do powierzchni, sformułowanie wniosków, przygotowanie oryginalnej wersji manuskryptu, przygotowanie odpowiedzi na recenzje i ostatecznej wersji manuskryptu.*

W cyklu moich badań nad przestrzennym rozkładem właściwości elektrycznych w nanoskali oraz powiązaną z nią możliwością lokalnej redukcji nie ograniczyłem się wyłącznie do  $\text{TiO}_2$ , ale skoncentrowałem się również na tlenkach materiałów organicznych. Pozwala to na uogólnienie sformułowanych i opisanych powyżej wniosków na grupę materiałów, które mają znacznie mniej zdefiniowaną budowę krystaliczną i chemiczną. W kolejnych pracach cyklu opisano analizy prowadzone na tlenku grafenu (GO). Były one opracowywane i publikowane równolegle do prac wymienionych powyżej, ale dla przejrzystości opiszę je w osobnym porządku chronologicznym.

GO ma strukturę opartą o warstwę grafenową, w której zostały wprowadzone defekty, między innymi w postaci dołączenia grup funkcyjnych (m.in. karbonylowych, karboksylowych, epoksydowych i hydroksylowych). GO stanowi tym samym relatywnie podstawowy częściowo periodyczny układ badawczy w obszarze materiałów organicznych.

Pracą dotyczącą tlenku grafenu, która bezpośrednio kontynuuje moje analizy niejednorodności procesów redukcji i oksydacji w skali nanometrowej jest:

(H4) **M. Rogala**, I. Własny, P. Dąbrowski, P.J. Kowalczyk, A. Busiakiewicz, W. Kozłowski, L. Lipińska, J. Jagiełło, M. Aksienionek, W. Strupiński, A. Krajewska, Z. Sieradzki, I. Krucińska, M. Puchalski, E. Skrzetuska, Z. Klusek  
*Graphene oxide overprints for flexible and transparent electronics*  
Applied Physics Letters, 106(4), 041901 (2015)

W tej pracy skorzystałem z mojego doświadczenia zdobytego podczas analizy powierzchni  $\text{TiO}_2$  i przenieśliem je na badania powierzchni cienkiej warstwy tlenku grafenu poddanego chemicznej redukcji w kwasie bromowodorowym. Uzyskana w ten sposób powierzchnia funkcjonalna może być wykorzystywana jako transparentna elektroda na potrzeby elektroniki elastycznej<sup>9</sup>. Podobnie jak w przypadku powierzchni funkcjonalnych tlenków metali, w tej pracy udało mi się powiązać właściwości chemiczne zredukowanej powierzchni tlenku grafenu z niejednorodnościami występującymi w rozkładzie właściwości elektrycznych w skali nano. W pracy zestawiałem wyniki spektroskopii XPS wskazujące na intensywną redukcję chemiczną GO z analizą rozkładu przestrzennego przewodnictwa elektrycznego na powierzchni materiału. Przeprowadzone przeze mnie analizy XPS pokazały, że GO przed redukcją zawiera szereg różnorodnych typów defektów struktury grafenowej w postaci wiązań tworzonych pomiędzy atomami węgla, a dołączonymi do płaszczyzny grafenowej grupami funkcyjnymi. Przy czym w strukturze badanego materiału dominowały grupy karbonylowe. Redukcja materiału opiera się na usuwaniu grup funkcyjnych i odbudowie struktury grafenowej. Jednocześnie, jak wykazałem w pracy, proces ten jest selektywny i pozostawia istotną ilość defektów, w szczególności opartych o grupy zawierające fragment OH. Występujące defekty zaburzają przewodnictwo elektryczne zredukowanego materiału. Jak pokazałem, proces ten nie jest

jednorodny przestrzennie. Moje badania dowiodły, że (podobnie jak w przypadku zredukowanego przez bombardowanie jonami  $\text{TiO}_2$ ) zredukowane GO ma tendencję do wytwarzania nanoskalowych klastrów o różnym poziomie przewodnictwa elektrycznego. Opisane klastry są przewodzące, jednak wartości ich efektywnego przewodnictwa mogą różnić się nawet dziesięciokrotnie w ramach sąsiadujących obszarów. Dodatkowe przeprowadzone przeze mnie badania i analizy spektroskopii (konduktancji) tunelowej dowiodły, że sąsiednie klastry mogą różnić się charakterem przewodnictwa – mogą być półprzewodnikowe lub metaliczne. Jest to niezwykle istotne z uwagi na zastosowanie materiału na potrzeby produkcji transparentnych i elastycznych elektrod. Odnosząc się do tego obszaru zastosowań wykazałem, że przewodnictwo elektryczne warstwy funkcjonalnej (wytworzonej elektrody elastycznej) ograniczone jest przez te zaobserwowane w skali nanometrowej niejednorodności, które wynikają najprawdopodobniej z procesów lokalnej samoorganizacji materiału tlenkowego w trakcie formowania warstwy. Ta samoorganizacja pozostaje pochodną różnej aktywności chemicznej poszczególnych grup funkcyjnych występujących pierwotnie w strukturze GO (defektujących grafen). Jednoznacznym wnioskiem opublikowanych badań było stwierdzenie, że optymalizacji makroskalowych właściwości elektrycznych zredukowanych warstw GO należy szukać w ich nanoskalowej jednorodności. Na potrzeby tej pracy zaadaptowałem moją metodologię prowadzenia lokalnych pomiarów elektrycznych przy wykorzystaniu mikroskopu sił atomowych, którą rozwinąłem badając tlenki metali oraz dodatkowo opracowałem przedstawioną w pracy metodologię badania tlenkowo-grafenowych warstw funkcjonalnych.

*W omawianej pracy mój indywidualny wkład obejmował: przygotowanie koncepcji badań, wykonanie pomiarów elektrycznych w nanoskali, mapowanie konduktancji tunelowej powierzchni, wykonanie pomiarów XPS, sformułowanie wniosków, przygotowanie oryginalnej wersji manuskryptu, przygotowanie odpowiedzi na recenzje i ostatecznej wersji manuskryptu.*

Kolejna praca cyklu rozwija tematykę właściwości elektrycznych cienkich warstw GO o analizę możliwości ich kontrolowanej redukcji w obszarach o rozmiarach nanometrów, która prowadzi do nadania warstwie właściwości przewodzących:

(H5) **M. Rogala**, P.J. Kowalczyk, P. Dąbrowski, I. Własny, W. Kozłowski, A. Busiakiewicz, S. Pawłowski, G. Dobiński, M. Smolny, I. Karaduman, L. Lipińska, R. Kozinski, K. Librant, J. Jagiełło, K. Grodecki, J.M. Baranowski, K. Szot, Z. Klusek  
*The role of water in resistive switching in graphene oxide*  
Applied Physics Letters, 106, 263104 (2015)

W tej pracy bezpośrednio czerpię z mojego doświadczenia w analizie zjawiska przełączania rezystywnego w tlenkach metali. Na jej potrzeby przeniosłem metodykę badań oraz wytworzyłem próbki, gdzie tlenek grafenu naniesiony był

na powierzchnię platyny stanowiącej elektrodę spodnią. Wraz z przewodzącym ostrzem mikroskopu sił atomowych (AFM), stanowiącym mobilną elektrodę górną, osiągnąłem układ metal-izolator-metal dedykowany do badania zjawiska zmiany przewodnictwa na skutek przepływu impulsów elektrycznych. Praca zawiera dyskusję możliwości wprowadzania lokalnych zmian w przewodnictwie tlenku grafenu. Wykazałem, że poprzez stymulację elektryczną w nanoskali można wywołać lokalną redukcję tlenku grafenu, którą potwierdziłem metodami wysokorozdzielczej spektroskopii XPS. Wskazałem, że proces przepływu prądu elektrycznego prowadzi do usuwania grup funkcyjnych występujących w GO i odtwarzania struktury grafenowej. Jednocześnie udowodniłem, że usuwanie grup funkcyjnych zachodzi również między warstwami GO i prowadzi do zmniejszenia się dystansów międzywarstwowych w materiale. Zatem redukcja inicjowana stymulacją elektryczną powierzchni przyjmuje charakter objętościowy. Zaproponowanym przeze mnie wyjaśnieniem obserwowanego zjawiska jest model, w którym wstępnie zredukowany przez kontakt z ostrzem AFM obszar GO przyjmuje rolę elektrody i pozwala na wtórną redukcję obszarów przyległych. Podkreśla to kolejny raz obserwowaną przeze mnie już w przypadku  $\text{TiO}_2$  współzależność obszarów sąsiadujących w aspekcie zmian ich właściwości elektrycznych. Dodatkowo w pracy udowodniłem, że obserwowane procesy zmian przewodnictwa elektrycznego są związane z reakcją elektrochemiczną następującą w obecności wody. Tym samym w pracy zawarłem istotną dyskusję możliwej rozdzielczości przestrzennej procesów modyfikacji elektrycznej powierzchni tlenku grafenu. Ponadto, podobnie jak w poprzedniej pracy cyklu, zwróciłem uwagę na występujące w materiale niejednorodności struktury i różną podatność na zmiany właściwości elektrycznych wywołane procesami redukcji i oksydacji. Pokazałem, że komplikacja budowy GO pozwala na odłączanie w procesie redukcji poszczególnych grup funkcyjnych i zastępowanie ich w procesie oksydacji innymi. Wniosek ten oparłem na mojej analizie podatności materiału na wprowadzanie defektów w kolejnych cyklach przełączania rezystywnego, które po pełnym procesie redukcji i wtórnej oksydacji stawało się niewydajne, a już w procesie samej oksydacji część nanoskalowych obszarów materiału nie poddawała się zmianom. Praca dostarczyła istotnego opisu podstawowych zjawisk zachodzących w nanoskali podczas procesu przełączania rezystywnego GO. Uzupełniła ona większość publikowanych wcześniej wyników, które opisywały przełączanie układów wieloskładnikowych, gdzie oprócz GO występowały inne materiały podatne na redukcję i oksydację. Wieloskładnikowość układów stanowiła utrudnienie w precyzyjnym opisie podstawowych mechanizmów fizycznych. Zastosowane przeze mnie i opisane w pracy podejście z wykorzystaniem układu jednoskładnikowego i zaproponowanie obserwacji zmian przewodnictwa w skali nanometrowej przyczyniło się do pełniejszego opisu zagadnienia.

*W omawianej pracy mój indywidualny wkład obejmował: przygotowanie koncepcji badań, przygotowanie cienkich warstw tlenku grafenu, przeprowadzenie*

*pomiarów elektrycznych i stymulacji w nanoskali, przeprowadzenie procesów przełączania rezystywnego, analizę wyników XPS, sformułowanie wniosków, przygotowanie oryginalnej wersji manuskryptu, przygotowanie odpowiedzi na recenzje i ostatecznej wersji manuskryptu.*

Rozszerzeniem poprzedniej publikacji o bardziej ogólne zagadnienia lokalnej redukcji tlenku grafenu są analizy opublikowane w pracy:

(H6) **M. Rogala**, P. Dąbrowski, P.J. Kowalczyk, I. Własny, W. Kozłowski, A. Busiakiewicz, I. Karaduman, L. Lipińska, J.M. Baranowski, Z. Klusek

*The observer effect in graphene oxide—How the standard measurements affect the chemical and electronic structure*

Carbon, 103, 235 (2016)

Przedstawione badania wykazały wysoką podatność cienkich warstw tlenku grafenu na redukcję nawet przy niewielkim oddziaływaniu zewnętrznym. W pracy opisałem możliwości lokalnej redukcji poprzez oddziaływanie światłem, promieniowaniem X oraz przepływem prądu elektrycznego o niewielkich gęstościach. Poruszyłem w ten sposób bardzo istotny problem modyfikacji materiału i jego właściwości elektrycznych podczas standardowych pomiarów, pokazując, że charakterystyka (szczególnie w skali nanometrowej) może zaburzać stan i wpływać na właściwości próbki. Możliwość niecelowej redukcji tlenku grafenu oraz jej bardzo istotna skala nie była wcześniej jasno sformułowana w literaturze (mimo znacznej ilości prac powstających w tym okresie z zakresu opisu właściwości fizycznych i chemicznych GO). Analizami przedstawionymi w pracy wykazałem, że wątek niecelowej redukcji GO w trakcie charakteryzacji powinien być uwzględniany każdorazowo w dobrych praktykach pomiarowych, zarówno podczas stosowania lokalnych jak i globalnych technik badawczych. Moje analizy spektroskopii XPS dowiodły, że zmiany występujące w materiale są niejednorodne pod względem chemicznym. Zaobserwowałem, że w trakcie naświetlania promieniowaniem X preferencyjnie usuwane są defekty grafenu w postaci grup karbonylowych, a sam proces jest intensywniejszy bezpośrednio przy powierzchni materiału (mimo znacznie głębszego wnikania promieniowania). Jednocześnie moje badania właściwości elektrycznych przedstawione w pracy dowodzą kolejny raz, że redukcja tlenków w nanoobszarach ma przebieg niejednorodny przestrzennie. Mimo jednakowej stymulacji prądowej powierzchni GO wzrost przewodnictwa elektrycznego następuje wybiórczo i dotyczy w głównej mierze wybranych klastrów materiału o niewielkich rozmiarach (rzędu dziesiątek nm). Te właściwości materiału zostały przeze mnie uwidocznione dzięki zastosowaniu mapowania przewodnictwa elektrycznego w skali nanometrowej.

*W omawianej pracy mój indywidualny wkład obejmował: przygotowanie koncepcji badań, przygotowanie cienkich warstw tlenku grafenu, przeprowadzenie pomiarów elektrycznych i stymulacji w nanoskali, analizę redukcji tlenku grafenu w*

*skali mikro i nano, analizę wyników XPS, sformułowanie wniosków, przygotowanie oryginalnej wersji manuskryptu, przygotowanie odpowiedzi na recenzje i ostatecznej wersji manuskryptu.*

*Podsumowanie cyklu:*

Rezultaty moich badań i analiz przedstawione w powyższym cyklu publikacji dostarczają jednoznacznych dowodów, że właściwości elektryczne materiałów tlenkowych nie są z góry ustalone dla danego typu układu, ale podlegają modyfikacjom. W większości przypadków, jak wykazałem, źródłem takich modyfikacji są procesy i niejednorodności występujące w skali nanometrowej. Wiele z tych procesów zależy od naturalnej podatności materiałów na zjawiska lokalnej redukcji i oksydacji, które często przebiegają w sposób niejednorodny przestrzennie i powodują powstawanie nanoskalowych klastrów o odmiennych właściwościach elektrycznych. Jednocześnie wszelkie procesy zewnętrznej stymulacji elektrycznej, prowadzonej w celu modyfikacji materiału tlenkowego, również zależne są od zmian o charakterze lokalnym. Opierają się one wtórnie o podatność badanych materiałów do przyjmowania niejednorodnej struktury w nanoskali. Dodatkowo przebieg modyfikacji w danym obszarze materiału zależny jest bezpośrednio od stopnia redukcji lub składu chemicznego otaczających go sąsiednich fragmentów. Opisane odkrycia rozszerzają istotnie wiedzę o faktycznych fizycznych podstawach procesów zachodzących w tlenkowych materiałach funkcjonalnych, wykorzystywanych w szczególności na potrzeby nowoczesnej elektroniki i nanoelektroniki.

**Osiągnięcia naukowe w obszarze analizy właściwości materiałów dwuwymiarowych metodami spektroskopii fotoelektronowej.**

Posiadam również istotne osiągnięcie naukowe stanowiące wkład w rozwój dyscypliny nauk fizycznych, które jest rozłączne z omawianym wyżej cyklem publikacji i dotyczy innego obszaru badań, którym się intensywnie zajmuję. Osiągnięcie to można określić jako **opracowanie** dobrych praktyk **analizy spektroskopii fotoelektronowej materiałów dwuwymiarowych (2D)** i rozpropagowanie ich na zespoły, z którymi współpracuję poza Uniwersytetem Łódzkim. Mój warsztat analizy spektroskopii fotoelektronowej (w szczególności w zakresie promieniowania X – XPS) rozwijałem początkowo w badaniach tlenków metali oraz tlenku grafenu. Dostarczyło mi to wiedzy i doświadczenia, ale przede wszystkim krytycznego podejścia do referencji literaturowych w zakresie identyfikacji wiązań chemicznych występujących w badanych materiałach. Pozwoliło mi to w późniejszym okresie na przejście do badań nowych materiałów 2D (innych niż grafen, w tym dichalkogenków metali przejściowych i tlenków metali), które były stosunkowo nowe w obszarze badań spektroskopowych i często słabo scharakteryzowane. Moje badania nowych materiałów 2D

początkowo skupiały się na wewnętrznych pracach zespołu w Uniwersytecie Łódzkim. Opracowywałem metody rozwarstwiania materiałów w warunkach próżniowych (w celu pozyskania referencyjnych spektroskopii na niezanieczyszczonych powierzchniach) oraz brałem udział w analizie danych spektroskopowych uzyskanych z wykorzystaniem laboratoryjnych oraz synchrotronowych źródeł promieniowania. W późniejszym okresie pozwoliło mi to na nawiązanie współprac zewnętrznych z naukowcami z Uniwersytetu Warszawskiego oraz Politechniki Warszawskiej. Włączyłem się w ich badania i mogłem przekazać moje doświadczenie w analizie XPS materiałów 2D i podjąć się charakteryzacji subtelnych zmian chemicznych wprowadzanych w trakcie modyfikacji cienkich warstw (oraz monowarstw) dichalkogenków metali przejściowych. W ramach tych współprac powstały prace:

(P5) K. Czerniak-Łosiewicz, M. Świniarski, A.P. Gertych, M. Giza, Z. Maj, **M. Rogala**, P.J. Kowalczyk, M. Zdrojek  
*Unraveling the Mechanism of the 150-Fold Photocurrent Enhancement in Plasma-Treated 2D TMDs*  
ACS Applied Materials and Interfaces, 14, 33984 (2022) **IF 9.5**, cytowania - 1

(P10) **M. Rogala**, S. Sokołowski, U. Ukegbu, A. Mierzwa, R. Szoszkiewicz  
*Direct Identification of Surface Bound MoO<sub>3</sub> on Single MoS<sub>2</sub> Flakes Heated in Dry and Humid Air*  
Advanced Materials Interfaces, 8, 2100328 (2021) **IF 6.3**, cytowania - 9

(P14) R. Szoszkiewicz, **M. Rogala**, P. Dąbrowski  
*Surface-Bound and Volatile Mo Oxides Produced During Oxidation of Single MoS<sub>2</sub> Crystals in Air and High Relative Humidity*  
Materials, 13(14), 3067 (2020) **IF 3.6**, cytowania - 17

(numeracja zgodna z listą w Wykazie osiągnięć naukowych)

W tych pracach moja rola polegała na zaplanowaniu i wykonaniu analiz spektroskopii XPS. W przypadku pierwszej z prac dotyczyła opisu wpływu oddziaływania plazmy z warstwami MoS<sub>2</sub> oraz WS<sub>2</sub>. W przypadku dwóch pozostałych analizowałem wpływ powierzchniowego utleniania w warunkach podniesionej wilgotności warstw MoS<sub>2</sub>. Wyniki moich badań pozwoliły powiązać obserwowane przez współpracowników modyfikacje morfologii oraz struktury elektronowej materiałów z ich konkretną transformacją strukturalną. Opisałem zmiany wiązań chemicznych występujących w układach metal-siarka oraz metal-tlen w ujęciu zarówno jakościowym jak i ilościowym. W swoich analizach poprzez zaplanowanie dedykowanych pomiarów kontrolnych udało mi się wykluczyć wpływ modyfikacji badanych układów 2D w trakcie naświetlania promieniowaniem X służącym do charakteryzacji. Efekt taki może występować dla częściowo utlenionych dichalkogenków metali przejściowych, które były przedmiotem badań i pominięty przy analizie mógłby prowadzić do formułowania nieprawidłowych wniosków.



Moje badania w obszarze spektroskopii fotoelektronowej materiałów dwuwymiarowych objęły również spektroskopię w zakresie promieniowania nadfioletowego (UPS) przynosząc istotne wnioski w zakresie opartych o tę metodę pomiarów pracy wyjścia materiałów. Realizując projekt NCN Opus 2016/21/B/ST5/00984 *Hybrydowy układ grafen-tlenek metalu przejściowego: synteza i zastosowanie jako anody oraz katody w organicznych diodach emitujących światło*, którego byłem wykonawcą, zajmowałem się zagadnieniem spektroskopii UPS na warstwach grafenowych pokrytych MoO<sub>3</sub>. Konkluzje moich badań zostały wykorzystane do przeprowadzenia analiz opisanych w pracy:

(P6) D.A. Kowalczyk, **M. Rogala**, K. Szałowski, D. Belić, P. Dąbrowski, P. Krukowski, I. Lutsyk, M. Piskorski, A. Nadolska, P. Krempiński, M. Le Ster, P.J. Kowalczyk  
*Two-Dimensional Crystals as a Buffer Layer for High Work Function Applications: The Case of Monolayer MoO<sub>3</sub>*  
ACS Appl. Mater. Interfaces, 14, 39, 44506 (2022) **IF 9.5**, cytowania - 7

Pomiary eksperymentalne tej pracy zostały wykonane w ramach rozprawy doktorskiej Doroty Kowalczyk, której byłem promotorem pomocniczym. Praca opisuje wytwarzanie tlenków metali jako materiału funkcjonalizującego (w tym wypadku zwiększającego pracę wyjścia) elektrod do zastosowań w nowoczesnych urządzeniach. Na potrzeby tej pracy, i na podstawie wcześniejszych obserwacji wyników UPS, sformułowałem tezę, że błędem jest rozpatrywanie efektów funkcjonalizacji wyłącznie globalnymi metodami pomiarowymi. Zaplanowałem również szeroki zakres lokalnych pomiarów pracy wyjścia mikroskopią kelwinowską (KPFM), który został następnie skonfrontowany ze standardowo wykonywanymi pomiarami UPS. Badania przedstawione w pracy potwierdziły, że spektroskopia fotoelektronowa pozwala na poprawną ocenę wartości pracy wyjścia powierzchni funkcjonalizowanych cienkimi warstwami MoO<sub>3</sub> wyłącznie w przypadku, gdy pokrycie powierzchni materiałem funkcjonalizującym jest ciągłe. W przeciwnym przypadku wynik pomiarów UPS może być znacząco błędny.

Moje opublikowane osiągnięcia w temacie analizy spektroskopii fotoelektronowej materiałów dwuwymiarowych mogą stanowić istotny materiał referencyjny dla innych badaczy i w znaczącym stopniu ułatwić im analizę wyników spektroskopowych dla materiałów 2D.

Moimi kolejnymi osiągnięciami w dyscyplinie nauk fizycznych są rezultaty badań i udział w publikacjach w obszarach, które można podzielić na trzy rozdzielne tematyki:

- *Badanie morfologii i właściwości elektrycznych materiałów dwuwymiarowych*
- *Badanie struktury i właściwości tlenków metali przejściowych*
- *Badanie morfologii nanostruktur*

Z zestawienia osiągnięć publikacyjnych odpowiadających tym tematom wyłączyłem publikacje wymienione przy poprzednio opisywanych osiągnięciach.

(poniżej zachowałem numerację publikacji odpowiadającą liście w Wykazie osiągnięć naukowych)

*Badanie morfologii i struktury elektronowej materiałów dwuwymiarowych.*

W temacie ***Badanie morfologii i właściwości elektrycznych materiałów dwuwymiarowych*** jestem współautorem następujących prac powstałych we współpracy z ośrodkami krajowymi i zagranicznymi:

- (P1) J. Sitek, K. Czerniak-Łosiewicz, A.P. Gertych, M. Giza, P. Dąbrowski, **M. Rogala**, K. Wilczyński, A. Kaleta, S. Kret, B.R. Conran, X. Wang, C. McAleese, M. Macha, A. Radenović, M. Zdrojek, I. Pasternak, W. Strupiński  
*Selective Growth of van der Waals Heterostructures Enabled by Electron-Beam Irradiation*  
ACS Applied Materials and Interfaces, 15, 33838 (2023) **IF 9.5**
- (P3) I. Lutsyk, K. Szalowski, P. Krukowski, P. Dabrowski, **M. Rogala**, W. Kozłowski, M. Le Ster, M. Piskorski, D. A. Kowalczyk, W. Rys, R. Dunal, A. Nadolska, K. Toczek, P. Przybysz, E. Lacinska, J. Binder, A. Wismolek, N. Olszowska, J. J. Kolodziej, M. Gmitra, T. Hattori, Y. Kuwahara, G. Bian, T. C. Chiang, P. J. Kowalczyk  
*Influence of structural defects on charge density waves in 1T-TaS<sub>2</sub>*  
Nano Research 16, 11528 (2023) **IF 9.9**, cytowania - 1
- (P4) A. Nadolska, D.A. Kowalczyk, I. Lutsyk, M. Piskorski, P. Krukowski, P. Dąbrowski, M. Le Ster, W. Kozłowski, R. Dunal, P. Przybysz, W. Ryś, K. Toczek, P.J. Kowalczyk, **M. Rogala**  
*Electrostimulation and Nanomanipulation of Two-Dimensional MoO<sub>3-x</sub> Layers Grown on Graphite*  
Crystals, 13, 905 (2023) **IF 2.7**
- (P7) P. Krukowski, M. Piskorski, R. Udovytska, D.A. Kowalczyk, I. Lutsyk, **M. Rogala**, P. Dąbrowski, W. Kozłowski, B. Łuszczynska, J. Jung, J. Ulański, K. Matuszek, A. Nadolska, P. Przybysz, W. Ryś, K. Toczek, R. Dunal, P. Krempiński, J. Czerwińska, M. Le Ster, M. Skulimowski and P.J. Kowalczyk  
*Graphene on quartz modified with rhenium oxide as a semitransparent electrode for organic electronics*  
Opto-Electronics Review, 30, 4, e141953 (2022) **IF 1.6**, cytowania - 1
- (P8) J. Kierdaszuk, P. Dąbrowski, **M. Rogala**, P. Krukowski, A. Przewłoka, A. Krajewska, W. Kaszub, M. Sobanska, Z.R. Zytkeiwicz, V.Z. Zubialevich, P.J. Kowalczyk, A. Wismolek, J. Binder, A. Drabińska  
*Strain control in graphene on GaN nanowires: Towards pseudomagnetic field engineering*  
Carbon, 186, 128-140 (2021) **IF 11.3**

- (P13) D.A. Kowalczyk, **M. Rogala**, K. Szałowski, W. Kozłowski, I. Lutsyk, M. Piskorski, P. Krukowski, P. Dąbrowski, D. Belić, M. Cichomski, Z. Klusek, P.J. Kowalczyk  
*Local electronic structure of stable monolayers of  $\alpha$ -MoO<sub>3-x</sub> grown on graphite substrate*  
 2D Materials, 8, 25005 (2021) **IF 6.8**, cytowania - 11
- (P15) K. Pabianek, P. Krukowski, K. Polański, P. Ciepielewski, J.M. Baranowski, **M. Rogala**, W. Kozłowski, A. Busiakiewicz  
*Interactions of Ti and its oxides with selected surfaces: Si(100), HOPG(0001) and graphene/4H-SiC(0001)*  
 Surface & Coatings Technology, 397, 126033 (2020) **IF 4.1**, cytowania - 5
- (P16) K. Ludwiczak, E. Lacinska, J. Binder, I. Lutsyk, **M. Rogala**, P. Dąbrowski, Z. Klusek, R. Stępniewski, A. Wysmołek  
*Impeded phase transition in 1T-TaS<sub>2</sub>: Thermoelectric fingerprint of long-lived mixed states*  
 Solid State Communications, 305, 113749 (2020) **IF 1.8**, cytowania - 9
- (P17) P. Krukowski, D.A. Kowalczyk, M. Piskorski, P. Dąbrowski, **M. Rogala**, P. Caban, P. Ciepielewski, J. Jung, J.M. Baranowski, J. Ulański, Z. Klusek  
*Work Function Tunability of Graphene with Thermally Evaporated Rhenium Heptoxide for Transparent Electrode Applications*  
 Advanced Engineering Materials, 22, 1900955 (2019) **IF 3.2**, cytowania - 7
- (P19) P. Dąbrowski, **M. Rogala**, I. Pasternak, P. Krukowski, J.M. Baranowski, W. Strupiński, I. Lutsyk, D.A. Kowalczyk, S. Pawłowski, Z. Klusek  
*Early oxidation stages of germanium substrate in the graphene/Ge(001) system*  
 Carbon, 149, 290-296 (2019) **IF 8.8**, cytowania - 9
- (P20) I. Lutsyk, **M. Rogala**, P. Dąbrowski, P. Krukowski, P.J. Kowalczyk, A. Busiakiewicz, D.A. Kowalczyk, E.M. Łacińska, J. Binder, N. Olszowska, M. Kopciuszynski, K. Szałowski, M. Gmitra, R. Stępniewski, M. Jałochowski, J.J. Kołodziej, A. Wysmołek and Z. Klusek  
*Electronic structure of commensurate, nearly commensurate, and incommensurate phases of 1T-TaS<sub>2</sub> by angle-resolved photoelectron spectroscopy, scanning tunneling spectroscopy, and density functional theory*  
 Physical Review B, 98, 195425 (2018) **IF 3.7**, cytowania - 27
- (P23) P. Dąbrowski, **M. Rogala**, I. Pasternak, J.M. Baranowski, W. Strupiński, M. Kopciuszynski, R. Zdyb, M. Jałochowski, I. Lutsyk, and Z. Klusek  
*The study of the interactions between graphene and Ge(001)/Si(001)*  
 Nano Research, 10(11), 3648-3661 (2017) **IF 8.0**, cytowania - 20
- (P24) I. Własny, **M. Rogala**, P. Dąbrowski, P.J. Kowalczyk, A. Busiakiewicz, W. Kozłowski, L. Lipińska, J. Jagiełło, M. Aksienionek, Z. Sieradzki, I. Krucińska, M. Puchalski, E. Skrzetuska, Z. Draczyński, Z. Klusek  
*Finding optimal HBr reduction of inkjet printed graphene oxide for flexible electronics*  
 Materials Chemistry and Physics, 181, 409-414 (2016) **IF 2.1**, cytowania - 7

- (P28) P. Dąbrowski, **M. Rogala**, I. Własny, Z. Klusek, M. Kopciuszynski, M. Jałochowski, W. Strupiński, J.M. Baranowski  
*Nitrogen doped epitaxial graphene on 4H-SiC(0001) - Experimental and theoretical study*  
 Carbon, 94, 214-223 (2015) **IF 6.2**, cytowania - 7
- (P30) I. Własny, P. Dąbrowski, **M. Rogala**, I. Pasternak, W. Strupiński, J.M. Baranowski, Z. Klusek  
*Impact of electrolyte intercalation on the corrosion of graphene-coated copper*  
 Corrosion Science, 92, 69-75 (2015) **IF 5.1**, cytowania - 39
- (P33) I. Własny, P. Dąbrowski, **M. Rogala**, P.J. Kowalczyk, I. Pasternak, W. Strupiński, J.M. Baranowski, Z. Klusek  
*Role of graphene defects in corrosion of graphene-coated Cu(111) surface*  
 Applied Physics Letters, 102, 111601-1-4 (2013) **IF 3.5**, cytowania - 77

W pracach tych brałem udział w planowaniu i wykonywaniu eksperymentów (z wyłączeniem P16, P19, P23 i P28), analizowałem lub konsultowałem wyniki (wszystkie podane prace) oraz dyskutowałem przedstawione wnioski. Mój wkład w daną pracę jest w większości przypadków odzwierciedlony pozycją mojego nazwiska na liście autorów. Wyjątek stanowi tu praca (P4) której jestem ostatnim autorem, ponieważ powstała pod moim nadzorem jako kierownika projektu badawczego oraz promotora pomocniczego doktoratu mgr inż. A. Nadolskiej. W wymienionych pracach analizowane były szeroko pojęte oddziaływania między układami, których jednym z elementów składowych jest materiał dwuwymiarowy lub materiał warstwowy. Zawierają one studium właściwości morfologicznych, mechanicznych i przede wszystkim elektrycznych powierzchni takich układów.

#### *Badanie struktury i właściwości tlenków metali przejściowych.*

W tematyce ***Badanie struktury i właściwości tlenków metali przejściowych*** opublikowałem jako współautor następujące prace:

- (P2) K. Cieślik, D. Wrana, **M. Rogala**, C. Rodenbücher, K. Szot, F. Krok  
*The Effect of Reduction and Oxidation Processes on the Work Function of Metal Oxide Crystals: TiO<sub>2</sub>(110) and SrTiO<sub>3</sub>(001) Case*  
 Crystals, 13, 1052 (2023) **IF 2.7**
- (P9) K. Cieślik, D. Wrana, K. Szajna, W. Bełza, **M. Rogala**, C. Rodenbücher, P. Dąbczyński, K. Szot, F. Krok  
*Tuning the electronic properties of a clean TiO<sub>2</sub>(110) surface via repeated sputtering and annealing: A KPFM and LC-AFM study*  
 Applied Surface Science, 571, 151303 (2021) **IF 7.3**, cytowania - 2
- (P21) C. Rodenbücher, D. Wrana, P. Meuffels, **M. Rogala**, F. Krok and K. Szot  
*Electrical nanopatterning of TiO<sub>2</sub> single crystal surfaces in situ via local resistance and potential switching*  
 APL Materials, Volume: 6, Issue: 6, 066105 (2018) **IF 4.3**, cytowania - 6

- (P22) C. Rodenbücher, G. Bihlmayer, W. Speier, J. Kubacki, M. Wojtyniak, **M. Rogala**, D. Wrana, F. Krok and K. Szot  
*Local surface conductivity of transition metal oxides mapped with true atomic resolution*  
Nanoscale, Volume: 10, Issue: 24, 11498-11505 (2018) **IF 7.0**, cytowania - 18
- (P25) A. Busiakiewicz, W. Kozłowski, P. Dąbrowski, **M. Rogala**, Z. Klusek  
*Temperature-induced segregation of Co- and Ni-rich nanoparticles on rutile TiO<sub>2</sub>(001)*  
Materials Research Express, 3, 085004 (2016) **IF 1.1**, cytowania - 3

Badania opisane w powyższych publikacjach prowadziłem we współpracy z Forschungszentrum Jülich, Uniwersytetem Jagiellońskim oraz Uniwersytetem Śląskim w Katowicach. Dotyczyły one opisu struktury krystalograficznej oraz właściwości elektrycznych niestechiometrycznych tlenków metali (TiO<sub>2</sub> oraz SrTiO<sub>3</sub>). Mój udział w przedstawionych analizach polegał na wykonaniu części badań eksperymentalnych (P2, P9) lub badań wstępnych (P21, P22) oraz dyskusji i konsultacji wyników oraz końcowych wersji manuskryptów.

Dodatkowo w omawianej tematyce jestem współautorem dwóch rozdziałów w monografii, których jestem pierwszym autorem i które zawierają przygotowane przeze mnie podsumowanie wiedzy o transformacjach chemicznych powierzchni oraz metodach badania struktury krystalograficznej, chemicznej i elektronowej tlenków metali przejściowych:

- (M1) **M. Rogala**, Z. Klusek  
*Chemical transformation of surface region of model oxides exposed to high temperature and different chemical activity of oxygen*  
Switching effects in transition metal oxides, Wydawnictwo Naukowe PWN SA Warszawa 2021, ISBN 978-83-01-21316-9
- (M2) **M. Rogala**, D. Wrana, F. Krok, Z. Klusek  
*Crystallographic structure, electronic structure and chemical composition on the nanoscale: Important role of the SPM, LEED, Photoemission investigations for the analysis of the crystal geometry, electronic structure and diffusion phenomena on the surface of model oxides*  
Switching effects in transition metal oxides, Wydawnictwo Naukowe PWN SA Warszawa 2021, ISBN 978-83-01-21316-9

#### *Badanie morfologii nanostruktur.*

Z kolei w tematyce **Badanie morfologii nanostruktur** opublikowałem jako współautor następujące prace:

- (P11) M. Brzeziński, B. Kost, W. Gonciarz, A. Krupa, M. Socka, **M. Rogala**  
*Nanocarriers based on block copolymers of l-proline and lactide: The effect of core crosslinking versus its pH-sensitivity on their cellular uptake*  
European Polymer Journal, 156, 110572 (2021) **IF 5.5**, cytowania - 7

(P12) B. Kost, W. Gonciarz, A. Krupa, M. Socka, **M. Rogala**, T. Biela, M. Brzeziński  
*pH-tunable nanoparticles composed of copolymers of lactide and allyl-glycidyl ether with various functionalities for the efficient delivery of anti-cancer drugs*  
Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 204, 111801 (2021) **IF 5.9**, cytowania - 7

Prace powstały w ramach współpracy z Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych Polskiej Akademii Nauk. Mój udział w prezentowanych badaniach polegał na wykonaniu oraz analizie i interpretacji pomiarów mikroskopii sił atomowych nanocząstek w celu oceny ich rozmiarów i morfologii.

Osiągnięcia naukowe przed uzyskaniem stopnia doktora.

Wszystkie powyższe osiągnięcia dotyczą okresu po uzyskaniu stopnia doktora. Dodatkowo posiadam następujące osiągnięcia publikacyjne z okresu **przed uzyskaniem stopnia doktora**:

(P34) A. Busiakiewicz, A. Huczko, M. Soszyński, K. Polański, **M. Rogala**, Z. Klusek  
*Surface chemical composition of SiC-cored nanowires investigated at room and elevated temperatures in ultra-high vacuum*  
Vacuum, 86, 1974-1978 (2012) **IF 1.5**, cytowania - 6

(P35) J. Kubacki, A. Molak, **M. Rogala**, C. Rodenbücher, K. Szot  
*Metal-insulator transition induced by non-stoichiometry of surface layer and molecular reactions on single crystal KTaO<sub>3</sub>*  
Surface Science, 606 (15-16), 1252 (2012) **IF 1.8**, cytowania - 13

(P36) K. Szot, **M. Rogala**, W. Speier, Z. Klusek, A. Besmehn, R. Waser  
*TiO<sub>2</sub> - a prototypical memristive material*  
Nanotechnology, 22, 254001 (2011) **IF 4.0**, cytowania - 248

(P37) A. Busiakiewicz, Z. Klusek, **M. Rogala**, P. Dąbrowski, P.J. Kowalczyk, P.K. Datta  
*The new high-temperature surface structure on reduced TiO<sub>2</sub>(001)*  
Journal of Physics: Condensed Matter, 22, 395501 (2010) **IF 2.3**, cytowania - 13

(P38) M. Bystrzejewski, A. Huczko, P. Kowalczyk, **M. Rogala**, M. Szybowski, M.H. Rummeli, T. Gemming, H. Lange  
*Ultra Highly Selective Synthesis of Double-Walled Carbon Nanotubes*  
Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, 18, 137-147 (2010) **IF 0.6**, cytowania - 1

Pozycje P34 i P38 należy zaliczyć do opisywanej już tematyki *Badanie morfologii nanostruktur*. W pracach tych częściowo wykorzystano rezultaty oraz wyniki wstępne mojej pracy magisterskiej poświęconej charakteryzacji nanowłókien oraz nanorurek powstających podczas reakcji syntezy spaleniowej.

Z kolei pozycje P35, P36 i P37 dotyczą tematyki *Badanie struktury i właściwości tlenków metali przejściowych*. W pracach P35 oraz P37 opisane są transformacje

struktury powierzchni odpowiednio krysztalów  $\text{KTaO}_3$  i  $\text{TiO}_2$  wywołanych zmianami stechiometrii. W tych pracach mój udział polegał na konsultacji części eksperymentalnej oraz dyskusji wyników. Na szczególną uwagę zasługuje natomiast praca P36. Jest to praca przeglądowa cytowana obecnie niemal 250 razy, która zawiera analizę zjawisk raportowanych jako mechanizmy przełączania rezystywnego w  $\text{TiO}_2$  oraz część z oryginalnymi wynikami eksperymentalnymi dotyczącymi indukowania przełączania w skali nanometrowej przy użyciu przewodzącego ostrza mikroskopu sił atomowych. Przedstawiona tam oryginalna część wynikowa jest mojego autorstwa i powstała w trakcie przygotowania przeze mnie analiz na potrzeby rozprawy doktorskiej. Spośród wielu istotnych artykułów odnoszących się do tej pracy warto zauważyć opublikowaną w 2014 roku pracę autorstwa Leona Chua <sup>10</sup>, który jest „ojcem” pojęcia memrystora i memrystancji, utożsamianej z przełączaniem rezystywnym i nadającej temu zjawisku elementarny sens w teorii obwodów elektrycznych. Leon Chua cytując pracę P36 zaadaptował w swoim artykule zmierzony i opisany przeze mnie przebieg histerezy elektrycznej prezentujący możliwość przełączania rezystywnego nanoobszarów.

#### *Odniesienia literaturowe:*

1. Jeong, D. S. *et al.* Emerging memories: Resistive switching mechanisms and current status. *Reports Prog. Phys.* **75**, 076502 (2012).
2. Lim, H., Kim, I., Kim, J. S., Seong Hwang, C. & Jeong, D. S. Short-term memory of  $\text{TiO}_2$ -based electrochemical capacitors: Empirical analysis with adoption of a sliding threshold. *Nanotechnology* **24**, 384005 (2013).
3. Kamyshny, A. & Magdassi, S. Conductive nanomaterials for printed electronics. *Small* **10**, 3515–3535 (2014).
4. Tian, H. *et al.* Cost-effective, transfer-free, flexible resistive random access memory using laser-scribed reduced graphene oxide patterning technology. *Nano Lett.* **14**, 3214–3219 (2014).
5. Waser, R. & Aono, M. Nanoionics-based resistive switching memories. *Nat. Mater.* **6**, 833–840 (2007).
6. Yang, J. J., Strukov, D. B. & Stewart, D. R. Memristive devices for computing. *Nat. Nanotechnol.* **8**, 13–24 (2013).
7. Seok Jeong, D., Kim, I., Ziegler, M. & Kohlstedt, H. Towards artificial neurons and synapses: a materials point of view. *RSC Adv.* **3**, 3169 (2013).
8. Diebold, U. The surface science of titanium dioxide. *Surf. Sci. Rep.* **48**, 53–229 (2003).
9. Wang, B. & Facchetti, A. Mechanically Flexible Conductors for Stretchable and Wearable E-Skin and E-Textile Devices. *Adv. Mater.* **31**, (2019).
10. Chua, L. If it's pinched it's a memristor. *Semicond. Sci. Technol.* **29**, 104001 (2014).

5. *Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.*

Głównym ośrodkiem mojej działalności naukowej był i jest obecnie Uniwersytet Łódzki, jednocześnie w latach 2008-2018 równolegle współpracowałem z Peter Grünberg Institute w Forschungszentrum Jülich (Niemcy). Moja praca w Peter Grünberg Institute rozpoczęła się jeszcze na etapie doktoratu, kiedy miała formę pełnoetatowego ciągłego zatrudnienia przez okres 18 miesięcy (pobyt stały). Następnie w okresie po doktoracie odbyłem staż podoktorski (3 miesięczny pobyt stały) uzupełniany licznymi wyjazdami krótkoterminowymi. Charakter pracy w Peter Grünberg Institute polegał w okresie po doktoracie na regularnych wizytach mających na celu wykonanie eksperymentalnych prac badawczych oraz przeprowadzeniu szkoleń i konsultacji. Pobyty w Niemczech uzupełniane były okresami współpracy zdalnej polegającej na konsultowaniu wyników i przygotowywaniu publikacji.

Moja praca w Forschungszentrum Jülich skupiała się głównie na zagadnieniu powiązania defektów występujących w tlenkach metali przejściowych z ich właściwościami elektrycznymi. Prowadziłem badania w instytucie PGI-7 kierowanym przez profesora Rainera Wäsera, jednej z wiodących grup w tematyce przełączania rezystywnego i nanoelektroniki opartej o tlenki metali. Zajmowałem się badaniami mikroskopowymi oraz spektroskopowymi powierzchni krysztalów  $\text{TiO}_2$  oraz  $\text{SrTiO}_3$  funkcjonalizowanymi na potrzeby stymulowanej elektrycznie kontrolowanej zmiany rezystancji. Wykorzystywałem techniki mikroskopii sił atomowych (AFM), w tym mikroskopii kelwinowskiej (KPFM) oraz spektroskopię elektronów w zakresie promieniowania X (XPS). Pobyt zagraniczny pozwolił mi na wykorzystanie w moich badaniach unikatowej aparatury naukowej dedykowanej do analizy skutków reakcji redukcji i oksydacji tlenków metali bezpośrednio w trakcie ich przebiegu (in-operando). Podejście takie rzadko jest spotykane w literaturze, ze względu na znaczną komplikację prac eksperymentalnych, gdzie dominują badania materiałów po, a nie w trakcie reakcji. Wykazałem, że podejście „in-operando” pozwala na pełniejsze spojrzenie na analizowane procesy i często prowadzi nowych i zarazem jednoznacznych wniosków. Przykładem takiej analizy były badania zmiany składu chemicznego powierzchni  $\text{TiO}_2$  w trakcie procesu redukcji poprzez wygrzewanie w warunkach próżniowych. Moje badania dowiodły, że najintensywniejsza redukcja powierzchni następuje w procesie chłodzenia materiału z temperatury wysokiej do pokojowej, a nie jak zazwyczaj zakładano w trakcie podgrzewania. Uzyskanie tych wyników było możliwe wyłącznie dzięki unikatowej konstrukcji spektrometru XPS, który pozwalał na prowadzenie pomiarów na próbce podgrzanej do 1100 °C.

Efektom mojej aktywności naukowej realizowanej w Peter Grünberg Institute jest znaczące poszerzenie wiedzy w tematyce wpływu defektów na właściwości elektryczne tlenków metali. Wyniki mojej pracy i współpracy z



Forschungszentrum Jülich przedstawione są w licznych publikacjach naukowych, w tym po uzyskaniu stopnia doktora:

- P18. (H3) **M. Rogala**, G. Bihlmayer, P. Dąbrowski, C. Rodenbücher, D. Wrana, F. Krok, Z. Klusek, K. Szot  
*Self-reduction of the native TiO<sub>2</sub> (110) surface during cooling after thermal annealing – in-operando investigations*  
Scientific Reports, 9, 12563 (2019)
- P21. C. Rodenbücher, D. Wrana, P. Meuffels, **M. Rogala**, F. Krok and K. Szot  
*Electrical nanopatterning of TiO<sub>2</sub> single crystal surfaces in situ via local resistance and potential switching*  
APL Materials, Volume: 6, Issue: 6, 066105 (2018)
- P22. C. Rodenbücher, G. Bihlmayer, W. Speier, J. Kubacki, M. Wojtyniak, **M. Rogala**, D. Wrana, F. Krok and K. Szot  
*Local surface conductivity of transition metal oxides mapped with true atomic resolution*  
Nanoscale, Volume: 10, Issue: 24, 11498-11505 (2018)
- P27. (H2) **M. Rogala**, G. Bihlmayer, W. Speier, Z. Klusek, C. Rodenbücher, K. Szot  
*Resistive Switching of a Quasi-Homogeneous Distribution of Filaments Generated at Heat-Treated TiO<sub>2</sub> (110)-Surfaces*  
Advanced Functional Materials, 25, 6382 (2015)
- P32. (H1) **M. Rogala**, Z. Klusek, C. Rodenbücher, R. Waser, K. Szot  
*Quasi-two-dimensional conducting layer on TiO<sub>2</sub> (110) introduced by sputtering as a template for resistive switching*  
Applied Physics Letters, 102, 131604 (2013)

oraz przed uzyskaniem stopnia doktora:

- P35. J. Kubacki, A. Molak, **M. Rogala**, C. Rodenbücher, K. Szot  
*Metal-insulator transition induced by non-stoichiometry of surface layer and molecular reactions on single crystal KTaO<sub>3</sub>*  
Surface Science, 606 (15-16), 1252 (2012)
- P36. K. Szot, **M. Rogala**, W. Speier, Z. Klusek, A. Besmehn, R. Waser  
*TiO<sub>2</sub> - a prototypical memristive material*  
Nanotechnology, 22, 254001 (2011)

(numery wg. pt. II.4 Wykazu osiągnięć)

W publikacjach P18, P27, P32, P35 i P36 występuję z afiliacją Forschungszentrum Jülich obok afiliacji Uniwersytetu Łódzkiego, przy czym we wszystkich tych publikacjach, oprócz P18, afiliacja zagraniczna jest afiliacją główną.

Kopie umów pomiędzy mną a Forschungszentrum Jülich dotyczące i potwierdzające staże 18 miesięczne i 3 miesięczne przedstawione są jako

załączniki 5a, 5b i 5c do Wniosku o przeprowadzenie postępowania. Przedstawiłem tam umowy zatrudnienia na okres 12 i 6 miesięcy w latach 2008-2010 (załącznik 5a i 5b) oraz potwierdzenie finansowania w okresie stażu podoktorskiego w 2013 roku (załącznik 5c).

Staż w Forschungszentrum Jülich był uzupełniony przeze mnie kilkoma pobytami zagranicznymi związanymi z uczestnictwem w szkołach letnich oraz konsultacjach naukowych. Wyjazdy te miały mniejsze znaczenie dla mojej aktywności naukowej, jednak przyczyniły się do znacznego poszerzenia wiedzy i pozwoliły na przeniesienie dobrych praktyk w zakresie pracy eksperymentalnej oraz współpracy z otoczeniem gospodarczym do mojej pracy w Uniwersytecie Łódzkim. Poniżej przedstawiam listę moich staży zagranicznych wraz z określeniem czasu ich trwania:

- S1. Niemcy – Forschungszentrum Jülich (Peter Grünberg Institute), staż podoktorski finansowany przez Forschungszentrum Jülich (1.02.2013-30.04.2013)
- S2. Niemcy – Forschungszentrum Jülich (Peter Grünberg Institute), czasowe zatrudnienie na stanowisku naukowca gościa (1.10.2008-30.03.2010)
- S3. Niemcy – Forschungszentrum Jülich (Peter Grünberg Institute), wielokrotne krótkie staże w ramach współpracy (3-14.07.2011, 3-14.02.2014, 18-22.01.2016, 25-29.04.2016, 14-18.05.2018)
- S4. Francja – The Institute of Scientific Studies of Cargese, udział w International School: "Frontier Research in 2D Materials" (2-13.04.2018)
- S5. Wielka Brytania – The Commercial Graphene Show 2015 (Manchester), udział w dyskusjach panelowych i nawiązywanie współpracy w ramach środowiska przemysłu grafenowego (16-17.04.2015)
- S6. Słowacja – Pavol Jozef Šafárik University in Košice, konsultacje naukowe (21-23.10.2013, 22-24.10.2014)
- S7. Niemcy – University of Hamburg (Institute of Applied Physics and Microstructure Research Center), udział w International Summer School "Physics of Functional Micro- and Nanostructures" (8-20.09.2008)

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

Posiadam następujące osiągnięcia w obszarze **kształcenia kadry naukowej**:

- Byłem **promotorem pomocniczym rozprawy doktorskiej** mgr inż. Doroty Kowalczyk pt. *Graphene heterostructures with transition metal oxides – investigations of morphology and electronic structure towards applications in organic electronics* (obroniona 2022 r.).
- Jestem **promotorem pomocniczym rozprawy doktorskiej** mgr inż. Aleksandry Nadolskiej pt. *Badanie procesów przełączania rezystywnego w układach opartych o tlenki metali*. Praca realizowana jest w ramach projektu Sonata Bis, którym kieruję.
- Jestem **promotorem pomocniczym rozprawy doktorskiej** mgr inż. Rafała Dunala pt. *Badanie procesów przełączania rezystywnego w układach opartych o dichalkogenki metali przejściowych*. Praca realizowana jest w ramach projektu Sonata Bis, którym kieruję.
- Byłem **recenzentem w przewodzie doktorskim** MSc Sary Salehitaleghani, praca pt. *Scanning Tunneling Studies of Topological Insulators*. Recenzja wykonywana była na zlecenie University of Canterbury (Nowa Zelandia).

Byłem **promotorem** następujących **prac dyplomowych** obronionych na Uniwersytecie Łódzkim:

- *Wytwarzanie i charakteryzacja epitaksjalnych warstw złota na potrzeby mechanicznej eksfoliacji materiałów dwuwymiarowych*. - Krzysztof Mielczarek (**praca magisterska**, kierunek **fizyka**, 2023 r.)
- *Badanie własności elektrycznych w skali nanometrowej wydruków na potrzeby elastycznej elektroniki*. - Piotr Kuźmiuk (**praca magisterska**, kierunek **fizyka**, 2018 r.)
- *Opracowanie oprogramowania do kontroli procesu efuzji poprzez jednoczesne wykorzystanie sterownika Shinko ACR oraz spektrometru MKS Microvision 2*. - Michał Boduła (**praca inżynierska**, kierunek **informatyka**, 2022 r.)
- *Opracowanie dedykowanego oprogramowania do komunikacji z zasilaczem laboratoryjnym AIM-TTI QL564P*. - Mariusz Bednarek (**praca inżynierska**, kierunek **informatyka**, 2021 r.)

Byłem **recenzentem** siedmiu **prac inżynierskich** na kierunku informatyka:

Kacper Musiał – 2023 r., Daniel Pająk – 2022 r., Michał Gendek – 2021 r., Mateusz Jabłoński – 2019 r., Paweł Siciński – 2018 r., Łukasz Kleczko – 2018 r., Rafał Sobczak – 2018 r.

Prowadziłem następujące zajęcia **dydaktyczne**:

***kierunek fizyka***

- Metody eksperymentalne fizyki współczesnej – **wykład** przygotowywany i prowadzony w latach 2019-2023
- Nanotechnologia – **wykład** przygotowywany i prowadzony w latach 2019-2023
- Analiza danych w technikach XPS/Auger – **ćwiczenia** przygotowywane i prowadzone w latach 2015-2016
- Metody eksperymentalne w nanotechnologii II oraz III – **pracownia specjalistyczna** przygotowywana i prowadzona w latach 2015-2016

***kierunek informatyka***

- Architektura systemów komputerowych – **ćwiczenia** informatyczne przygotowywane i modyfikowane w latach 2015-2019 oraz prowadzone 2015-2023 (w tym rozszerzone o funkcje pracy zdalnej i asynchronicznej)
- Języki programowania I – **ćwiczenia** informatyczne przygotowywane i modyfikowane w latach 2015-2019 oraz prowadzone 2015-2023
- Inżynieria oprogramowania – **ćwiczenia** informatyczne przygotowywane i prowadzone w latach 2019-2021
- Podstawy elektrotechniki i elektroniki – **ćwiczenia** informatyczne przygotowywane i modyfikowane w latach 2016-2020 oraz prowadzone 2016-2021 (w tym rozszerzone o funkcje pracy zdalnej i asynchronicznej)
- Software Engineering – **ćwiczenia** informatyczne prowadzone w roku 2021
- Systemy wbudowane – **ćwiczenia** informatyczne prowadzone w roku 2015

Zajęcia prowadzone przeze mnie spotkały się z dobrym odbiorem i wysoką oceną wśród studentów (wyrażaną w ankietach). Oceny jakości prowadzonych zajęć i przekazywanego materiału wystawiane przez studentów moim zajęciom były w każdym semestrze mojej pracy powyżej średniej arytmetycznej z ogółu ankiet (m.in. pytania: czy wiadomości były przekazywane w sposób jasny, czy zajęcia były prowadzone w sposób uporządkowany, czy wymagania wobec studentów były dobrze sprecyzowane)

Do moich osiągnięć **organizacyjnych** w szczególności należą:

- Opracowywanie budżetów projektów naukowych realizowanych w Katedrze Fizyki Ciała Stałego Uniwersytetu Łódzkiego (sumaryczny budżet ponad 20 mln zł)
- Przygotowywanie specyfikacji aparatury badawczej na potrzeby zamówień Uniwersytetu Łódzkiego oraz nadzorowanie procesu negocjacji, zakupu i instalacji (w tym systemu XPS – 2021 r. oraz systemu UHV z komorą reakcyjną – 2018 r.)
- Sprowadzenie na Uniwersytet Łódzki aparatury próżniowej ze spektrometrem LEED, w ramach darowizny z Forschungszentrum Jülich. Wartość zakupu nowego odpowiednika tego systemu przekroczyłaby 500 000 PLN. Aparatura została uruchomiona i jest wykorzystywana w badaniach.
- Członkostwo w Radzie Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego
- Członkostwo w Komisji do spraw udostępniania infrastruktury badawczej Uniwersytetu Łódzkiego oraz udział w opracowaniu regulaminów udostępniania aparatury.
- Członkostwo w komitetach organizacyjnych konferencji krajowych (VIII Krajowa Konferencja Nanotechnologii 2017, 7th Polish Conference “Graphene and other 2D materials” 2022) i międzynarodowej (36th European Conference on Surface Science 2023, gdzie pełniłem funkcję zastępcy przewodniczącego)

Aktywnie uczestniczyłem w przedsięwzięciach **popularyzujących naukę**, w tym na szczególną uwagę zasługują:

- VII Festiwal Nauki Techniki i Sztuki w Łodzi (miałem udział w planowaniu i organizacji „Pikniku Naukowego” - w trakcie studiów)
- V – VIII, X – XII Festiwal Nauki Techniki i Sztuki w Łodzi (miałem udział w planowaniu i prezentacji pokazów popularyzatorskich z dziedziny fizyki – w trakcie studiów i doktoratu)
- Seria zajęć dydaktycznych mających na celu popularyzację fizyki wśród młodzieży szkolnej (prowadziłem zajęcia w laboratoriach Uniwersytetu Łódzkiego dla uczniów Zespołu Szkół Salezjańskich im. Ks. Bosko w Łodzi, cyklicznie po uzyskaniu stopnia doktora)

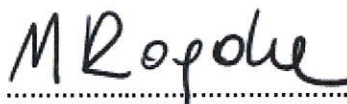
- Wystąpiłem w serii materiałów i komunikatów medialnych popularyzujących badania nanotechnologiczne nad układami neuromorficznymi oraz grafenowymi:
    - TeleexpressEXTRA 24.01.2017
    - Dziennik Łódzki 7.12.2016
    - <http://www.polskieradio.pl/10/5366/Artykul/1722333>
    - <http://naukawpolsce.pap.pl/aktualnosci/news,412727,sztuczne-synapsy-krokiem-na-drodze-do-sztucznego-mozgu.html>
    - <http://www.medonet.pl/zdrowie,naukowcy-pracuja-nad-sztucznym-mozgiem,artykul,1722714.html>
    - TVP Łódź – Łodzią po regionie 28.11.2016
  - Odbyło się ze mną spotkanie otwarte w ramach cyklu „Obiecane inspiracje” w Obiecana Café w Łodzi (29.06.2023), podczas którego opowiadałem publiczności o aspektach pracy fizyka i działalności naukowej.
7. *Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.*

Przeprowadziłem następujące **seminaria i wykłady w jednostkach zewnętrznych:**

- VII Szkoła skaningowej mikroskopii i spektroskopii bliskich oddziaływań SPM (organizator: Uniwersytet Jagielloński w Krakowie), *Wstęp do SPM/STM*, 30.11.2022
- Środowiskowe Seminarium Fizyki Ciała Stałego, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński w Krakowie, *Przełączanie rezystywne w skali nanometrowej – defekty struktury krystalograficznej jako układy pamięciowe i nieorganiczne synapsy*, 21.10.2020
- Seminarium Fizyki Ciała Stałego, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, *Tlenek grafenu – od memrystorów do elastycznej elektroniki*, 24.03.2017
- Seminarium Zakładu Fizyki Ferroelektryków, Uniwersytet Śląski w Katowicach, *Przełączanie rezystywne w  $TiO_2$  i w tlenku grafenu: obserwacje w nano-skali*, 8.10.2014

Otrzymałem następujące **nagrody oraz wyróżnieniach** za osiągnięcia naukowe i patentowe:

- 2022 r. - *Nagroda za Wybitne Osiągnięcia Przyczyniające się do Rozwoju Nauki dla Młodych Uczonych Pracujących na Terenie Województwa Łódzkiego*, przyznawana przez Prezesa Polskiej Akademii Nauk (nagroda w kategorii nauki ścisłe)
- 2020 r. - *Nagroda zespołowa I stopnia* przyznana przez Rektora Uniwersytetu Łódzkiego za publikacje z cyklu "Fizyka nanoskali: badania materiałów niskowymiarowych".
- 2017 r. - *Nagroda Naukowa Fundacji Uniwersytetu Łódzkiego* za wybitne osiągnięcia naukowe w latach 2015-2016.
- 2016 r. - *Nagroda zespołowa I stopnia* przyznana przez Rektora Uniwersytetu Łódzkiego za cykl publikacji "Badania układów niskowymiarowych dla współczesnej elektroniki".
- 2015 r. - *Srebrny medal na Międzynarodowych Targach Wynalazków Concours Lepine 2015* w Paryżu za: „Metodę antystatycznego wykańczania tekstyliów z włókien syntetycznych metodą z wykorzystaniem druku cyfrowego tlenkiem grafenu”.

  
.....  
(podpis wnioskodawcy)



PODPIS ZAUFANY

MACIEJ JAKUB  
ROGAŁA

29.09.2023 19:32:42 [GMT+2]

Dokument podpisany elektronicznie  
podpisem zaufanym

