

Autoreferat

1. Imię i nazwisko:

Paweł Szreoder

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe:

- 2004 r. stopień doktora nauk fizycznych, Instytut Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, tytuł rozprawy: *Własności elektronowe nanorurek węglowych*;
- 1999 r. dyplom magistra filozofii, Wydział Humanistyczny Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu;
- 1992 r. dyplom magistra fizyki, Wydział Matematyki, Fizyki i Chemii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:

- 2005 – 2014 adiunkt w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu;
- 04.2012 – 06.2012 staż podoktorski w Institut für Chemie und Biotechnik, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften, Technische Universität Ilmenau (Niemcy);
- 08.2009 – 12.2009 staż podoktorski w Institut für Physik, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften, Technische Universität Ilmenau (Niemcy).;
- 2003 – 2005 wykładowca w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu;
- 12.1995 staż naukowy w Institut für Physik, Fakultät für Naturwissenschaften, Technische Universität Chemnitz (Niemcy);
- 1995 – 2003 asystent w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

- (a) tytuł: **Fizyka powierzchni międzyfazowej węgla niskowymiarowych i roztworów jonowych**
- (b) autor: Paweł Szroeder, tytuł monografii: *Fizyka powierzchni międzyfazowej węgla niskowymiarowych i roztworów jonowych*, Toruń 2013, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, ISBN 978-83-231-3094-9
- (c) Omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

4.1. Wprowadzenie

Monografia „Fizyka powierzchni międzyfazowej węgla niskowymiarowych i roztworów jonowych”, którą wskazałem jako główne osiągnięcie naukowe do postępowania habilitacyjnego, jest podsumowaniem moich badań nad zjawiskami zachodzącymi w obszarze międzyfazowym nanorurek i grafenu oraz roztworów jonowych. Mój wkład w głębsze zrozumienie tych zjawisk polega na zbadaniu powiązań kinetyki reakcji przeniesienia elektronu przez powierzchnię międzyfazową ze strukturą elektronową węgla niskowymiarowych i strukturą warstwy międzyfazowej roztworów jonowych.

Struktura pasm elektronowych nanorurek węglowych i grafenu jest stosunkowo dobrze poznana. W funkcjach gęstości stanów elektronowych nanorurek węglowych występują osobliwości van Hove'a, których obecność jest skutkiem spętania kwantowego (*quantum confinement*). Ważną cechą nanorurek i grafenu jest mała gęstość stanów elektronowych w sąsiedztwie poziomu Fermiego. Zaawansowany jest stan badań nad wpływem nieporządku na strukturę pasm elektronowych, który polega na indukowaniu zlokalizowanych stanów elektronowych w sąsiedztwie poziomu Fermiego.

Równie zaawansowane są badania nad strukturą warstwy międzyfazowej elektrolitu na powierzchni węgla niskowymiarowych. Kluczowym czynnikiem określającym tę strukturę jest hydrofobowa natura węgla niskowymiarowych o strukturze plastra miodu. Defekty i podłoże mogą zmieniać ich właściwości na bardziej hydrofilowe.

Mimo rozległej literatury dotyczącej struktury pasm elektronowych nanorurek węglowych i grafenu oraz struktury warstwy międzyfazowej elektrolitu na powierzchni węgla o strukturze plastra miodu, wciąż brakuje prac, w których podejmowano by się określenia wpływu obu czynników na kinetykę heterogenicznej reakcji przeniesienia elektronu. Stanowiło to dla mnie główną motywację do podjęcia badań, które zwieńczone zostały powstaniem przedstawionej monografii.

Dobre przewodnictwo powierzchniowe, stabilność chemiczna, duża powierzchnia czynna oraz biogodność nanorurek węglowych i grafenu są kluczowe w zastosowaniu tych materiałów do konstrukcji wydajnych urządzeń elektrochemicznych nowej generacji. Urządzenia te powinny rozwiązać problemy taniej i precyzyjnej diagnostyki medycznej i środowiskowej oraz energetyki małej skali.

4.2. Cel naukowy

Celem monografii było systematyczne i możliwie jak najbardziej wyczerpujące zbadanie zagadnień dotyczących struktury i procesów zachodzących w obszarze międzyfazowym węgla niskowymiarowych oraz roztworów jonowych.

Nanorurki i grafen, do których ograniczyłem się w pracy, łączą dwie cechy:

- (i) hybrydyzacja orbitali elektronowych umożliwiającą tworzenie płaszczyzn o strukturze plastra miodu,
- (ii) spętanie kwantowe (*quantum confinement*) będące konsekwencją zredukowanego wymiaru tych kryształów.

Przedmiotem moich badań było określenie, jaki wpływ ma funkcja gęstości stanów elektronowych węgla niskowymiarowych na kinetykę heterogenicznej reakcji przeniesienia ładunku. W szczególności chodziło o reakcje z udziałem:

- idealnej elektrody grafenowej oraz grafenu z defektami;
- idealnych elektrod nanorurkowych metalicznych i półprzewodzących o różnych chiralnościach;
- elektrod nanorurkowych z domieszką donorową i akceptorową.

Powierzchnia idealnego grafenu jest hydrofobowa, co wynika z nieobecności niewysyconych wiązań w płaszczyznach o strukturze plastra miodu i występowania wiązań wodorowych pomiędzy molekułami wody. Zagadnienia, które podjąłem się rozstrzygnąć dotyczą:

- wpływu struktury wody międzyfazowej na kinetykę reakcji elektrodowych;
- wpływu podłoża i nanocząstek pierwiastków obcych (chodzi głównie o nanocząstki metali grupy przejściowej uwięzione w kanałach centralnych nanorurek) na proces kształtowania się struktury warstwy międzyfazowej roztworu.

4.3. Osiągnięte wyniki

W mojej ocenie największym osiągnięciem niniejszej rozprawy jest **zbadanie powiązań kinetyki reakcji przeniesienia elektronu przez powierzchnię międzyfazową ze strukturą elektronową węgla niskowymiarowych i strukturą warstwy międzyfazowej roztworu**. Oryginalny wkład moich badań w rozwój badań procesów zachodzących na granicy faz polega na:

- (i) zbadaniu wpływu **stanów defektowych i domieszkowych** na kinetykę heterogenicznej reakcji przeniesienia ładunku przez granicę międzyfazową elektrolitu i węgla niskowymiarowych. W konsekwencji wyjaśniłem zwiększoną aktywność katalityczną grafenu i nanorurek domieszkowanych azotem. Część wyników przedstawionych w monografii opublikowałem również w pracach [1, 2];
- (ii) zbadaniu wpływu **chiralności nanorurek** na kinetykę reakcji przeniesienia elektronu. Część wyników badań przedstawionych w monografii opublikowałem w pracy [3];

- (iii) wykazaniu, że **podłoże** grafenu oraz obecność **nanocząstek żelaza** w kanałach centralnych nanorurek wielościennych wpływają stymulująco na kinetykę reakcji elektrodowych;
- (iv) określeniu mechanizmu i zakresu **blokowania reakcji elektrodowych** na grafenie epitaksjalnym na podstawie analizy widm zmiennoprądowej impedancji elektrochemicznej. Przedstawione w monografii wyniki zawarłem również w oczekującej na publikację pracy [4];
- (v) wykazaniu, że nanorurki domieszkowane azotem są **katalizatorem reakcji redukcji tlenu** zarówno w elektrolicie zasadowym, jak i kwaśnym. Ponadto wykazałem, że mogą one być wykorzystywane jako nieenzymatyczne **czujniki biochemiczne**. Przedstawione w monografii wyniki opublikowałem w pracach [1, 5]. Do tej pory rozważano możliwość stosowania węgla niskowymiarowych jedynie w konstrukcji alkalicznych ogniw paliwowych;
- (vi) zaobserwowaniu współzależności pomiędzy **natężeniem indukowanego defektami ramanowskiego pasma D** i **kinetyką heterogenicznej reakcji przeniesienia elektronu** [2].

Wyszczególnione powyżej osiągnięcia i–vi opisane zostały w punktach 4.3.1 – 4.3.6 autoreferatu.

Przedmiotem badań eksperymentalnych były następujące węgle niskowymiarowe:

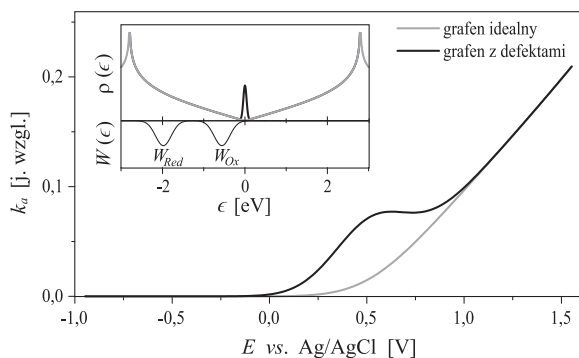
- maty sznurów nanorurek jednościennych (BP, od *buckypaper*), które wytwarzałem z nanorurek jednościennych dostarczonych przez firmę Nanocyl[®] metodą filtracji próżniowej zawieszin nanorurek w wodnym roztworze SDS;
- dywany nanorurek wielościennych niedomieszkowanych (MCNTs, od *multi-walled carbon nanotubes*) wyhodowane w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Technicznego w Ilmenau na podłożu Si/SiO₂ metodą pirolizy „sprayu” zawierającego benzen;
- dywany nanorurek wielościennych domieszkowanych azotem (MN-CNTs, od *multi-walled nitrogen-carbon nanotubes*). Wytwarzane były one tą samą metodą, co MCNTs, z tą różnicą, że jako substrat wykorzystywany był acetonitryl. Z badań SEM-EDS, przedstawionych przeze mnie w pracy [1] wynika, że koncentracja domieszki azotu w MN-CNTs wynosiła 7 procent atomowych;
- grafen epitaksjalny (EG, od *epitaxial graphene*) pochodzący z Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych. Uzyskuje się go przez rozkład termiczny SiC. W metodzie tej mono- i wielowarstwy grafenowe powstają wprost na podłożu SiC. Unikalna technologia wzrostu grafenu epitaksjalnego opracowana w ITME opisana jest w pracy Strupińskiego i in. [6];
- grafit pirolityczny o wysokim uporządkowaniu (HOPG, od *highly ordered pyrolytic graphite*). Jest on, w odróżnieniu od pozostałych, kryształem trójwymiarowym. W badaniach stanowił on materiał referencyjny.

4.3.1. Stany defektowe i domieszkowe a kinetyka reakcji przeniesienia elektronu

Strukturę elektronową grafenu i nanorurek przedstawiłem w rozdziale 2.1 monografii, zaś klasyfikacja defektów oraz ich wpływ na funkcję gęstości stanów elektronowych opisana została przeze mnie w rozdziale 2.2 monografii. Najważniejsza część teoretyczna, która stanowi omówienie wyników przeprowadzonych przeze mnie symulacji kinetyki reakcji elektrodowych, zawarta została w rozdziale 3.3 monografii.

Symulacje kinetyki reakcji elektrodowych przeprowadzałem w oparciu o model Gerischera, który opisałem w rozdziale 1.3.2 monografii. Obliczenia wykonywałem dla reakcji anodowej, w której zachodzi przenoszenie elektronów od formy zredukowanej depolaryzatora $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ do grafenu bądź nanorurki węglowej.

Na rys. 1 przedstawiona została obliczona przeze mnie zależność stałej reakcji anodowej od potencjału elektrody dla grafenu idealnego i grafenu z defektami. Z badań przedstawionych przeze mnie w rozdziale 2.2 monografii oraz obliczeń wykonanych przez Jaskólskiego i in. [7] wynika, że krawędzie zygzakowe i defekty punktowe indukują dodatkowe stany zlokalizowane o energiach bliskich energii punktu neutralności ładunku ($\epsilon = 0$).



Rys. 1: Zależność stałej szybkości reakcji anodowej pomiędzy jonami depolaryzatora i grafenem w funkcji potencjału elektrody grafenowej. We wstawce przedstawiono funkcje gęstości stanów elektronowych grafenu idealnego i grafenu z defektami

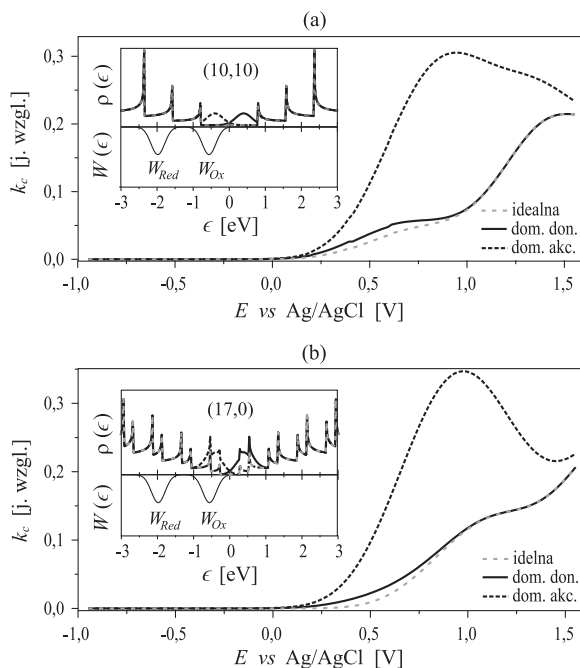
Wpływ stanów indukowanych przez nieporządek zbadałem wprowadzając do funkcji gęstości stanów elektronowych stany defektowe o rozkładzie gaussowskim i szerokości połówkowej 0,1 eV. Wartość stałej standardowej reakcji przeniesienia elektronu¹ po wprowadzeniu stanów defektowych wzrasta piętnastokrotnie.

W celu określenia wpływu domieszkowania nanorurek na kinetykę reakcji anodowej, do funkcji gęstości stanów idealnych nanorurek metalicznych i półprzewodzących wprowadzałem pasma donorowe i akceptorowe o szerokości 0,5 eV (wstawka do rys. 2a i b). Pasma o porównywalnej szerokości obserwowano w eksperymentach spektroskopii tunelowania elektronów dla nanorurek domieszkowanych azotem i borem przeprowadzanych przez Czerwa i in. [8, 9]. Wyniki wykonanych przeze mnie symulacji stałej szybkości reakcji anodowej dla nanorurek domieszkowanych przedstawiłem na rys. 2.

Z wykonanych przeze mnie obliczeń wynika, że:

- stany akceptorowe znacznie silniej niż donorowe stymulują przebieg reakcji elektrodowej;

¹Stała standardowa jest stałą szybkości reakcji przy potencjale formalnym, przy którym stałe reakcji anodowej i katodowej są sobie równe. W przypadku reakcji odwracalnych z dobrym przybliżeniem można przyjąć, że potencjał formalny jest równy potencjałowi półfali. Potencjał półfali wyznaczyłem eksperymentalnie z pomiarów woltamperometrycznych dla reakcji $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} + e^- \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ ($E_{1/2} = 0,2$ V vs Ag/AgCl).



Rys. 2: Zależność stałej szybkości reakcji anodowej z udziałem idealnych nanorurek węglowych oraz nanorurek z domieszką donorową i akceptorową: (a) nanorurka metaliczna, (b) nanorurka półprzewodząca. We wstawkach do rysunków przedstawiłem funkcje gęstości stanów elektronowych, dla których przeprowadzałem obliczenia

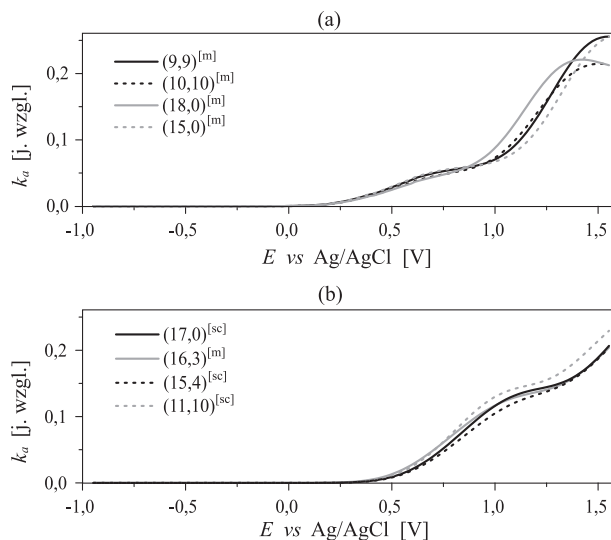
- stała standardowa reakcji z udziałem nanorurki metalicznej wzrasta niemal dwukrotnie po wprowadzeniu domieszki donorowej i ponad trzykrotnie po wprowadzeniu domieszki akceptorowej;
- znacznie silniejszy wpływ domieszkowania widoczny jest w nanorurkach półprzewodzących. Stała standardowa po wprowadzeniu domieszki donorowej do nanorurki półprzewodzącej wzrasta osiemnastokrotnie, zaś po wprowadzeniu domieszki akceptorowej wzrasta aż czterdziestokrotnie.

Pozytywny wpływ domieszki donorowej (atomów azotu) na kinetykę reakcji elektrodowej potwierdziłem w eksperymentach (rozdział 3.1.2 monografii). Stała standardowa uzyskana dla domieszkowanych MN-CNTs jest czterokrotnie wyższa, niż dla niedomieszkowanych MCNTs (por. tab. 1, punkt 4.3.6 autoreferatu).

Brak jest danych, które pozwoliłyby na stwierdzenie wpływu domieszki akceptorowej. Publikowane dotąd wyniki eksperymentów wykonanych przez Salazara i in. [10] wskazują wręcz na hamujący wpływ domieszkowania akceptorowego na kinetykę reakcji przeniesienia elektronu, co pozostaje w sprzeczności z wynikami symulacji. Wpływ domieszkowania akceptorowego na kinetykę reakcji elektrodowych wymaga dalszych, bardziej rozstrzygających badań.

4.3.2. Chiralność nanorurek a kinetyka reakcji przeniesienia elektronu

Kolejnym zagadnieniem analizowanym przeze mnie w oparciu o model Gerischera był wpływ parametrów geometrycznych idealnych nanorurek, które zadawane są przez wektor chiralny (M, N), na kinetykę reakcji przeniesienia elektronu z $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ do nanorurki. Wstępne wyniki obliczeń przedstawiłem w pracy [3]. Dokładniejsze rezultaty symulacji zależności stałej reakcji anodowej od potencjału elektrody zawarłem w rozdziale 3.3 monografii.



Rys. 3: Zależność stałej szybkości reakcji przeniesienia elektronu z $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ do nanorurki obliczona w oparciu o model Gerischera: (a) nanorurki metaliczne niechiralne, (b) nanorurki półprzewodzące oraz metaliczne chiralne

Z uzyskanych przeze mnie zależności przedstawionych na rys. 3 wynika, że:

- wszystkie metaliczne nanorurki niechiralne, czyli nanorurki krzeselkowe o współrzędnych wektora chiralnego (M, M) oraz nanorurki zygzakowe o współrzędnych $(3M, 0)$, wykazują w przybliżeniu jeden typ zależności (rys. 3a);
- wyraźnie inny typ zależności wykazują wszystkie nanorurki chiralne, w tym metaliczne, typu (M, N) , gdzie $M \neq N$, oraz nanorurki niechiralne półprzewodzące (rys. 3b);
- stała standardowa reakcji przeniesienia elektronu dla nanorurek charakteryzujących się drugim typem zależności jest o rząd wielkości niższa niż dla nanorurek o pierwszym typie zależności.

Uzyskanych wyników symulacji nie mogłem zweryfikować wprost, ponieważ bardzo trudno jest wyizolować pojedyncze nanorurki ze sznurów, w których są one powiązane siłami van der Waalsa. Z analizy widm rozpraszania ramanowskiego (rozdział 2.4.5 monografii) wynika, że w BP dominują nanorurki półprzewodzące. Uzyskane eksperymentalnie charakterystyki CV dla makroskopowego BP są zatem wynikiem uśrednienia zależności stałej reakcji przedstawionych na rys. 3b.

4.3.3. Wpływ podłoża i nanocząstek metali na kinetykę reakcji elektrodowych

Z danych przedstawionych w części 4.3.1 autoreferatu wynika, że różnice wartości eksperymentalnych stałej standardowej są o dwa rzędy wielkości większe niż wynikałoby to z symulacji procesów elektrodowych. Powodem tego stanu rzeczy jest hydrofobowa natura węgli o strukturze plastra miodu. Warstwy wody międzyfazowej na powierzchni grafenu tworzą dodatkową barierę dla jonów depolaryzatora (rozdział 2.3 monografii).

Na poparcie tej tezy warto przywołać wyniki, które uzyskane zostały przez innych autorów. Teoretyczna wartość stałej standardowej reakcji elektrodowej obliczona przez Royea [11] dla układu złożonego z idealnego półmetal i pary redoks $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-/4-}$ wynosi $2,8 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Natomiast wartość eksperymentalna wyznaczona przez Cline'a i in. [12] dla niemodyfikowanego HOPG jest mniejsza od wartości teoretycznej o dwa rzędy wielkości

($k_s = 1 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$). Z kolei stała wyznaczona przeze mnie dla anodyzowanego HOPG ($6,7 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$), w którym struktura wody międzyfazowej została zaburzona, jest porównywalna co do rzędu wielkości z wartością teoretyczną dla półmetalów.

W moim przekonaniu zmiana natury HOPG z hydrofobowej na bardziej hydrofilową jest głównym czynnikiem odblokowującym reakcje elektrodowe. Zmiany te obserwowałem nieuzbrojonym okiem. HOPG oraz EG po anodyzacji można było bez trudu zwilżać. Zmiany struktury elektronowej elektrody spowodowane przyłączaniem w procesie anodyzacji do warstwy powierzchniowej grafitu grup funkcyjnych i defektów mają raczej drugorzędne znaczenie.

Uzyskane przeze mnie wyniki wskazują, że podobny wpływ na kinetykę reakcji elektrodowej jak anodyzacja ma podłoże. Hydrofobowa natura grafenu zmienia się na bardziej hydrofilową na skutek oddziaływania podłoża, co pokazał na podstawie pomiarów kąta zwilżania grafenu na różnych podłożach Rafiee i in. [13].

W badanych przeze mnie układach wspomagającą rolę w reakcjach elektrodowych odgrywają:

- podłoże SiC, które zmienia właściwości anodyzowanego EG na jeszcze bardziej hydrofilowe. Dlatego stała standardowa reakcji przeniesienia elektronu z udziałem EG ($27 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) jest czterokrotnie większa niż dla anodyzowanego HOPG ($6,7 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$). Na stymulujący wpływ podłoża wskazują wyniki badań opublikowane przez innych autorów. Badany przez Valotę i in. [14] grafen na podłożu SiO_2 charakteryzował się również większą w porównaniu z HOPG wartością stałej standardowej ($12 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$);
- nanocząstki Fe w kanałach centralnych nanorurek wielościennych (rys. 2.16d w monografii). Wskazują na to uzyskane przeze mnie wartości stałych standardowych dla próbek MCNTs ($110 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) i MN-CNTs ($440 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$). Wartości te są większe o niemal dwa rzędy wielkości od wartości uzyskanej dla anodyzowanego HOPG.

Kinetyka reakcji elektrodowych jest również wspomagana przez nanocząsteczki złota osadzone na zewnętrznych ścianach MCNTs i MN-CNTs. Wyniki prac eksperymentalnych, w których brałem udział, nie są ujęte w przedstawionej monografii. Zostały one opublikowane w pracach [15, 16].

4.3.4. EG jako częściowo blokowana elektroda

Z wyników eksperymentów opublikowanych przez grupy Biedermanna [17] i Ohty [18] wynika, że EG nie jest strukturą jednorodną, lecz współwystępują w nim obszary pokryte jedynie warstwami grafenu buforowego G_0 oraz obszary, w których na warstwie G_0 odłożyły się kolejne warstwy grafenu właściwego G_n . Niejednorodną, tarasową strukturę EG obserwowałem na obrazach AFM.

Wykazałem, że widma EIS uzyskane dla elektrod EG są charakterystyczne dla matrycy aktywnych mikroelektrod. Mikroelektrody stanowią warstwy grafenu właściwego, otoczone obszarami nieaktywnego grafenu buforowego (rozdział 3.2.3 monografii).

Uzyskane przeze mnie krzywe modelowe dobrze odzwierciedlają eksperymentalne zależności impedancji od zadawanej częstotliwości składowej zmiennej potencjału elektrody. Dopasowanie krzywych modelowych do eksperymentalnych widm EIS pozwoliło mi na wyznaczenie

wartości stałej standardowej reakcji przeniesienia elektronu dla obszarów aktywnych, która wynosi $27 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

4.3.5. Nanorurki domieszkowane azotem jako katalizatory reakcji redukcji tlenu i jako bioczuJNIKI

Z punktu widzenia zastosowania węgli niskowymiarowych w konstrukcji ogniw paliwowych istotna jest zdolność do katalizowania reakcji redukcji tlenu. Wykonałem stosowne testy dla MCNTs i MN-CNTs w roztworach wodnych KOH i H₂SO₄. Rezultaty badań przedstawiłem w rozdziale 3.1.2 monografii oraz opublikowałem w pracy [5].

Uzyskane wyniki dla medium zasadowego mogę streścić w następujących punktach:

- domieszkowanie azotem obniża wartość nadpotencjału, przy której zachodzi reakcja redukcji tlenu;
- domieszkowanie powoduje ponad dwukrotny wzrost prądu piku redukcyjnego. Jest on porównywalny z wartościami uzyskanymi dla elektrod z metali szlachetnych;
- pozytywny wpływ domieszkowania azotem na aktywność katalityczną nanorurek potwierdzają eksperymenty EIS. Wartość oporu przeniesienia elektronu R_{et} wyznaczona z widm EIS jest wyraźnie mniejsza w przypadku elektrody MN-CNTs;
- wysoka wydajność nanorurek domieszkowanych azotem w katalizowaniu reakcji redukcji tlenu wynika z dużego powinowactwa elektronowego domieszki azotowej w sieci krystalicznej nanorurek.

Natomiast testy kinetyki reakcji redukcji tlenu przeprowadzone przeze mnie w roztworze wodnym H₂SO₄ dały następujące rezultaty:

- na krzywych woltamperometrycznych uzyskanych w obecności gazu osłonowego obserwowałem znaczące prądy tła przy wzrastającym i malejącym potencjale elektrody pracującej, które związane są z dużą pojemnością właściwą MCNTs i MN-CNTs;
- wyraźny pik związany z zachodzeniem reakcji redukcji tlenu widoczny jest jedynie na elektrodzie MN-CNTs. Gęstość prądu piku redukcyjnego jest trzykrotnie niższa niż w medium zasadowym;
- wartości oporu R_{et} uzyskane z pomiarów EIS w medium kwaśnym są większe niż 1 MΩ, co świadczy o małej sprawności katalizowania reakcji redukcji tlenu przez elektrody MCNTs i MN-CNTs w tym środowisku.

Z wykonanych przeze mnie analiz widm impedancyjnych wynika, że na dywanach nanorurek zachodzą dodatkowo procesy akumulacji jonów OH⁻ (środowisko zasadowe) oraz H⁺ (środowisko kwaśne). Z procesami tymi wiąże się pojawienie pojemności C_{ad} i oporu R_{sf} . Stanowią one dodatkowy czynnik blokujący reakcję redukcji tlenu. Dotyczy to zwłaszcza reakcji w środowisku kwaśnym, w którym pojemności C_{ad} są o dwa rzędy wielkości większe niż w medium zasadowym.

Badalem również odpowiedź elektrochemiczną niemodyfikowanych chemicznie elektrod MCNTs i MN-CNTs na obecność glukozy i kwasu moczowego w roztworze wodnym KCl.

Nie stwierdziłem odpowiedzi elektrochemicznej dla glukozy. Natomiast w obecności kwasu moczowego na krzywych CV pojawiał się pik oksydacyjny. W elektrodzie MN-CNTs jego natężenie było dwukrotnie wyższe niż w MCNTs. Wyniki eksperymentów opublikowałem w pracy [1] oraz w rozdziale 3.1.2 monografii.

4.3.6. Widma rozpraszania ramanowskiego a kinetyka reakcji przeniesienia elektronu

Widma rozpraszania ramanowskiego BP, MCNTs, MN-CNTs, EG oraz HOPG uzyskiwałem przy wzbudzeniu światłem laserowym o energiach 2,54 eV (488 nm) oraz 1,17 eV (1064 nm). Wyniki badań opublikowałem w pracy [3] oraz przedstawiłem w rozdziale 2.4 monografii.

Do określenia nieporządku strukturalnego w badanej przeze mnie grupie materiałów wykorzystywałem stosunek natężeń pasm D i G. Część wyników badań opublikowałem w pracy [2]. Całość przedstawiłem w rozdziale 2.4.7 monografii.

W oparciu o model Lucchese'a [19], który omówiłem w rozdziale 2.4.7 monografii, oszacowałem uśrednioną odległość pomiędzy defektami L_D . Odwrotność kwadratu L_D jest proporcjonalna do powierzchniowej gęstości defektów, $\sigma_D \sim L_D^{-2}$, co zostało wykorzystane przeze mnie do szacowania liczby defektów N_D na komórkę elementarną grafenu, której obszar wynosi $5,24 \times 10^{-2} \text{ nm}^2$. Wartości N_D zestawione zostały w drugiej kolumnie tab. 1.

Wartości stałej standardowej reakcji przeniesienia elektronu (trzecia kolumna tab. 1) wyznaczałem dla jonów $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-/4-}$ w roztworach wodnych oraz dla jonów $\text{FeCp}_2^{+/0}$ w roztworach organicznych w oparciu o techniki voltamperometrii cyklicznej (CV) oraz spektroskopii zmiennoprądowej impedancji elektrochemicznej (EIS). Wartości stałej standardowej wyznaczałem bądź w oparciu o procedurę Nicholsona (rozdział 1.4 monografii), bądź z wyznaczonego z widm EIS oporu przeniesienia elektronu (rozdział 3.2 monografii). Szczegółowy opis tych technik oraz rezultaty badań zawarłem w rozdziałach 3.1 i 3.2 monografii. Część wyników opublikowałem w pracach [1,3], w których jestem pierwszym autorem, oraz w pracach [20,21].

Moje własne wyniki eksperymentalne porównałem z wartością teoretyczną dla półmetal obliczoną przez Royea [11], wartością eksperymentalną uzyskaną dla niemodyfikowanego HOPG przez Cline'a [12] oraz stałą standardową uzyskaną dla grafenu eksfoliowanego przez Valotę [14].

Dane w tabeli 1 wskazują na występowanie następujących współzależności pomiędzy gęstością defektów, strukturą warstwy międzyfazowej roztworu jonowego, a aktywnością elektrokatalityczną węgla niskowymiarowych:

- teoretyczna wartość stałej standardowej reakcji przeniesienia elektronu wyznaczona przez Royea i in. [11] dla idealnego półmetal jest o dwa rzędy wielkości większa niż wartość eksperymentalna uzyskana przez grupę Cline'a [12] dla niemodyfikowanego HOPG. Oznacza to, że hydrofobowe właściwości grafitu i grafenu stanowią istotny czynnik blokujący reakcję przeniesienia elektronu przez granicę faz;
- wyznaczona przeze mnie wartość stałej standardowej dla BP o bardzo małej gęstości defektów jest porównywalna z wartością uzyskaną dla niemodyfikowanego HOPG;
- wartość stałej standardowej, którą wyznaczyłem dla anodyzowanego HOPG, jest większa o ponad dwa rzędy wielkości od wartości stałej uzyskanej przez Cline'a dla niemo-

Tabela 1: Zestawienie wartości liczby defektów N_D na komórkę elementarną z wartościami stałej standardowej szybkości reakcji elektrodowej k_s . Dane przedstawione w tabeli stanowią moje własne wyniki eksperymentalne z wyjątkiem półmetalicznej elektrody, niemodyfikowanego HOPG oraz grafenu na podłożu SiO₂. Wszystkie wyniki dotyczą układu redoks Fe(CN)₆^{3-/4-}. Wyniki dotyczące MCNTs i M-NCNTs uzyskałem dla FeCp₂⁺⁰

	$N_D [\times 10^{-2}]$	$k_s [\times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}]$	Ref.
Półmetal (teoria)	0	2,8	[11]
HOPG	~ 0	0,01	[12]
BP	1,6 \pm 0,3	0,03	
Anodyzowany HOPG	~ 0	6,7	
Grafen na podłożu SiO ₂	b.d.	12	[14]
Anodyzowany EG	36,8 \pm 3,6	27	
MCNTs	10,3 \pm 0,4	110	
MN-CNTs	12,6 \pm 0,4	440	

dyfikowanego HOPG. Proces anodyzacji zaburza strukturę wody międzyfazowej na powierzchni HOPG, przez co anodyzowany HOPG staje się bardziej hydrofilowy. Zmiany strukturalne w zewnętrznej płaszczyźnie grafenowej HOPG nie są jednakże odzwierciedlane w widmach rozpraszania ramanowskiego;

- EG jest częściowo zablokowaną elektrodą (porównaj część 4.3.4 autoreferatu). Zatem gęstość nieporządku N_D nie odzwierciedla wprost związku pomiędzy gęstością defektów i aktywnością elektrokatalityczną elektrody EG;
- z porównania stałych standardowych dla anodyzowanego HOPG i anodyzowanego EG wynika, że kolejnym czynnikiem wspomagającym kinetykę reakcji przeniesienia elektronu jest podłoże (porównaj część 4.3.3 autoreferatu);
- najlepszą kinetykę reakcji elektrodowej wykazują MCNTs i MN-CNTs o dużej gęstości defektów. Stałe standardowe reakcji przeniesienia elektronu są dla nich o rząd wielkości wyższe niż dla anodyzowanego EG, niemal o dwa rzędy wielkości wyższe niż dla anodyzowanego HOPG i cztery rzędy wielkości wyższe niż dla BP i niemodyfikowanego HOPG;
- wyznaczone przeze mnie gęstości defektów dla MCNTs i MN-CNTs są porównywalne, mimo to stała standardowa k_s jest czterokrotnie wyższa dla nanorurek z domieszką donorową. Wynik ten potwierdza dodatkowy, stymulujący wpływ domieszki donorowej na kinetykę reakcji elektrodowej;
- kolejnym czynnikiem, który ma pozytywny wpływ na kinetykę reakcji elektrodowej z udziałem MCNTs i MN-CNTs, jest obecność nanocząstek żelaza uwięzionych w kanałach centralnych nanorurek (rys. 2.16d, rozdziały 3.1.2 i 3.2.2 monografii).

4.4. Wnioski

Wyniki symulacji przedstawione w punktach 4.3.1 i 4.3.2 zestawione z wynikami eksperymentów CV, EIS oraz spektroskopii rozpraszania Ramana pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- na poprawę kinetyki reakcji przeniesienia elektronu mają wpływ stany domieszkowe i defektowe, co potwierdzają wykonane przeze mnie symulacje w modelu Gerischera;
- stałe standardowe szybkości heterogenicznej reakcji przeniesienia elektronu wyznaczone dla mat nanorurek jednościennych, dywanów nanorurek wielościennych oraz grafenu epitaksjalnego wykazują duży rozrzut wartości od $3 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ do $2,7 \times 10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Widoczne są korelacje pomiędzy gęstością defektów a kinetyką reakcji elektrodowych;
- czynnikiem hamującym wydajność procesów elektrodowych z udziałem węgla niskowymiarowych jest hydrofobowa natura grafenu. Warstwy wody międzyfazowej stanowią dodatkową barierę dla ładunku przenieszonego przez granicę międzyfazową;
- struktura wody międzyfazowej na powierzchni grafenu i grafitu ulega zaburzeniu w procesie anodyzacji, przez co materiały te stają się bardziej hydrofilowe;
- czynnikiem wspomagającym wydajność procesów elektrodowych jest podłoże. Stała standardowa reakcji elektrodowej z udziałem anodyzowanego EG jest czterokrotnie większa niż z udziałem HOPG;
- kinetyka reakcji przeniesienia elektronu z udziałem dywanów nanorurek wielościennych jest wyraźnie lepsza niż w przypadku EG i HOPG. Czynnikiem poprawiającym elektrokatalityczne właściwości nanorurek jest obecność nanocząstek żelaza uwięzionych w kanałach centralnych nanorurek;
- węgle niskowymiarowe domieszkowane azotem katalizują reakcję redukcji tlenu. Dotyczy to zwłaszcza elektrolitu o odczynie zasadowym. Wprawdzie nadpotencjał reakcji jest wyższy niż dla platyny, niemniej jednak obserwuje się duże gęstości prądu piku redukcyjnego. Dlatego MN-CNTs stanowią alternatywę dla metali szlachetnych w konstrukcji alkalicznych ogniw paliwowych;
- grafen epitaksjalny ma obszary o zablokowanej aktywności elektrokatalitycznej. Obszary nieaktywne stanowią domeny pokryte warstwą grafenu buforowego o dużej zawartości atomów węgla w hybrydyzacji sp^1 i sp^3 ;
- struktura submikroskopowa warstwy podwójnej jest odzwierciedlana przez wielkości makroskopowe wyznaczone przeze mnie przy użyciu techniki spektroskopii impedancyjnej. Najważniejsze parametry obszaru międzyfazowego to opór przeniesienia elektronu przez powierzchnię międzyfazową oraz pojemność warstwy podwójnej.

Z przedstawionych w monografii zagadnień, które nie są moimi osiągnięciami, lecz stanowią istotny kontekst dla prowadzonych przeze mnie badań wynika że:

- struktura wody międzyfazowej adsorbowanej na grafenie jest typowa dla powierzchni hydrofobowych (rozdział 2.3.1 monografii). W jej kształtowaniu główną rolę odgrywają wiązania wodorowe pomiędzy molekułami wody i brak niewysyconych wiązań w idealnym grafenie i nanorurkach;

- z pomiarów kąta zwilżania wykonanych przez Rafiee'go i in. [13] wynika, że obecność podłoża może zmieniać hydrofobowe właściwości grafenu na hydrofilowe (rozdział 2.3.1 monografii). Wynik ten dobrze tłumaczy uzyskane przeze mnie wyniki badań kinetyki reakcji przeniesienia elektronu dla grafenu i nanorurek z nanocząstkami Fe w kanałach centralnych;
- warstwa buforowa grafenu epitaksjalnego zawierająca liczne wtrącenia atomów węgla w hybrydyzacji sp oraz sp^3 wiąże ze sobą chemicznie molekuly wody (rozdział 2.3.1 monografii). Zagadnienie to było badane przez Zhou i in. [22];
- nanorurki węglowe i grafen mogą być wykorzystane do: konstrukcji bioczuJNIKÓW nieenzymatycznych (rozdział 3.4.2 monografii), bioczuJNIKÓW enzymatycznych (rozdział 3.4.3 monografii), badania reakcji redoks w białkach (rozdział 3.4.4 monografii), detekcji oligonukleotydów DNA (rozdział 3.4.5 monografii), konstrukcji elektrod w superkondensatorach (rozdział 3.5 monografii).

4.5. Podsumowanie i perspektywy

Monografia, którą przedstawiłem jako główne osiągnięcie naukowe, poświęcona jest zjawiskom zachodzącym na powierzchni międzyfazowej węgla niskowymiarowych o strukturze plastra miodu i roztworów jonowych. Do badania tych zjawisk zastosowałem techniki eksperymentalne, takie jak woltamperometria cykliczna oraz elektrochemiczna spektroskopia impedancyjna. Techniki te stosowałem do wyznaczania kinetyki reakcji przeniesienia elektronu przez powierzchnię międzyfazową oraz do określania takich parametrów obszaru międzyfazowego, jak opór przeniesienia elektronu oraz pojemność warstwy podwójnej. Uzyskane wyniki badań konfrontowałem z symulacjami kinetyki reakcji elektrodowych, które wykonywałem w oparciu o model Gerischera.

Część moich oryginalnych wyników przedstawionych w monografii została opublikowana w pracach [1–5, 20, 21]. Najważniejsze wyniki, które dotąd nie zostały opublikowane nigdzie poza monografią, dotyczą symulacji kinetyki reakcji przeniesienia elektronu przez powierzchnię międzyfazową.

W mojej ocenie znaczący wkład przedstawionej rozprawy w badania fizyki zjawisk międzypowierzchniowych węgla niskowymiarowych i roztworów jonowych polega na **zbadaniu powiązań kinetyki reakcji przeniesienia elektronu przez powierzchnię międzyfazową ze strukturą elektronową węgla niskowymiarowych i strukturą roztworu jonowego w obszarze międzyfazowym**. Najważniejsze części tego wkładu mogą streścić w następujących punktach:

- (i) zbadałem wpływ stanów defektowych i domieszkowych na kinetykę reakcji przeniesienia ładunku przez granicę międzyfazową roztworu jonowego i węgla niskowymiarowych (punkt 4.3.1 autoreferatu);
- (ii) zbadałem wpływ chiralności nanorurek jednościennych na kinetykę reakcji przeniesienia elektronu (punkt 4.3.2 autoreferatu);
- (iii) wykazałem, że podłoże grafenu oraz obecność nanocząstek żelaza w kanałach centralnych nanorurek wielościennych wpływają stymulująco na kinetykę reakcji elektrodowych (punkt 4.3.3 autoreferatu);

- (iv) określiłem mechanizm i zakres blokowania reakcji elektrodowych na grafenie epitaksjalnym (punkt 4.3.4 autoreferatu);
- (v) wykazałem, że nanorurki domieszkowane azotem są katalizatorami reakcji redukcji zarówno w elektrolicie zasadowym, jak i kwaśnym. Do tej pory rozważano możliwość stosowania węgla niskowymiarowych jedynie w konstrukcji alkalicznych ogniw paliwowych (punkt 4.3.5 autoreferatu);
- (vi) zademonstrowałem współzależność pomiędzy natężeniem indukowanego defektami ramanowskiego pasma D i kinetyką heterogenicznej reakcji przeniesienia elektronu (punkt 4.3.6 autoreferatu).

Zaprezentowane w niniejszej rozprawie habilitacyjnej wyniki stanowią punkt wyjścia dla dalszych prac. Planuję rozszerzyć tematykę badawczą o zagadnienia dotyczące:

- zjawiska przełączania elektrycznego w układach węgla niskowymiarowych i elektrolitów. Efekt przełączania elektrycznego zaobserwowany został w cienkich warstwach węgla amorficznego przez prof. Antonowicza w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku [23]. Spodziewam się, że indukowane przez nieporządek stany zlokalizowane w sąsiedztwie poziomu Fermiego grafenu i nanorurek mogą odgrywać istotną rolę w modulowaniu przewodnictwa elektrycznego;
- elektrochromizmu, który polega na odwracalnych zmianach właściwości optycznych towarzyszących odwracalnym reakcjom redoks. Planowane przeze mnie badania będą dotyczyły układów elektrochemicznych, w których materiałem elektrochromowym będzie tlenek grafenu, błękit pruski, polimery przewodzące nanoszone na grafen i nanorurki węglowe;
- właściwości elektrochemicznych układów węgla niskowymiarowych z osadzonymi nanocząstkami metali oraz układów hybrydowych węgla niskowymiarowych i makromolekuł biologicznych;
- wpływu stanów indukowanych przez defekty krawędziowe na kinetykę reakcji elektrodowych z udziałem EG. Schodkowy kształt powierzchni EG wskazuje, że defekty krawędziowe mogą mieć istotny wpływ na kinetykę przeniesienia elektronu;
- wpływu stanów indukowanych przez defekty punktowe na kinetykę reakcji elektrodowych z udziałem grafitu, grafenu i nanorurek węglowych. Defekty punktowe wprowadzane będą do struktury poprzez bombardowanie tych materiałów wysokoenergetycznymi jonami (współpraca z National Taras Shevchenko University of Kyiv).

Pełne wykorzystanie potencjału aplikacyjnego węgla niskowymiarowych wymaga rozwiązania szeregu problemów praktycznych. Należy do nich rozwijanie technologii wzrostu węgla,

grafenu i nanorurek węglowych wprost na podłożach. Zamierzam kontynuować prace eksperymentalne w tym obszarze.

Planowane tematy realizowane będą w oparciu o istniejącą i nawiązywaną przeze mnie współpracę międzynarodową, opisaną w punkcie 5.3 autoreferatu.

Literatura do punktu 4

- [1] P. Szroeder, N. G. Tsierkezos, P. Scharff, U. Ritter, Electrochemical properties of carbon nanotube carpets grown on Si-wafers, *Carbon* 48 (15) (2010) 4489–4496.
- [2] P. Szroeder, A. Górka, N. G. Tsierkezos, U. Ritter, W. Strupiński, The role of bandstructure in electron transfer kinetics, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 44 (2-3) (2013) 226–230.
- [3] P. Szroeder, Electron transfer kinetics at single-walled carbon nanotube paper: The role of band structure, *Physica E* 44 (2) (2011) 470–475.
- [4] P. Szroeder, N. G. Tsierkezos, M. Walczyk, W. Strupiński, A. Górska-Pukownik, J. Strzelecki, K. Wiwatowski, P. Scharff, U. Ritter, Insights into electrocatalytic activity of epitaxial graphene on SiC from cyclic voltammetry and ac impedance spectroscopy, *Journal of Solid State Electrochemistry* (2014) doi:10.1007/s10008-014-2512-1.
- [5] P. Szroeder, N. G. Tsierkezos, U. Ritter, W. Strupiński, Nitrogen-doped carbon nanotubes as metal-free catalysts for the oxygen reduction in alkaline and acidic media, *Journal of Nanoscience Letters* 3 (2013) 9.
- [6] W. Strupinski, K. Grodecki, A. Wyszomolka, R. Stepniowski, T. Szkopek, P. E. Gaskell, A. Gruneis, D. Haberer, R. Bozek, J. Krupka, J. M. Baranowski, Graphene epitaxy by chemical vapor deposition on SiC, *Nano Letters* 11 (4) (2009) 1786–1791.
- [7] W. Jaskólski, A. Ayuela, M. Pelc, H. Santos, L. Chico, Edge states and flat bands in graphene nanoribbons with arbitrary geometries, *Physical Review B* 83 (23) (2011) 235424(9).
- [8] R. Czerw, M. Terrones, J.-C. Charlier, X. Blase, B. Foley, R. Kamalakaran, N. Grobert, H. Terrones, D. Tekleab, P. M. Ajayan, W. Blau, M. Rühle, D. L. Carroll, Identification of electron donor states in N-doped carbon nanotubes, *Nano Letters* 1 (9) (2001) 457–460.
- [9] R. Czerw, P.-W. Chiu, Y.-M. Choi, D.-S. Lee, D. Carroll, S. Roth, Y.-W. Park, Substitutional boron-doping of carbon nanotubes, *Current Applied Physics* 2 (6) (2002) 473–477.
- [10] P. F. Salazar, S. Kumar, B. A. Cola, Nitrogen- and boron-doped carbon nanotube electrodes in a thermo-electrochemical cell, *Journal of The Electrochemical Society* 159 (5) (2012) B483–B488.
- [11] W. J. Royea, T. W. Hamann, B. S. Brunschwig, L. S. Lewis, A comparison between interfacial electron-transfer rate constants at metallic and graphite electrodes, *Journal of Physical Chemistry B* 110 (39) (2006) 19433–42.
- [12] K. K. Cline, M. T. McDermott, R. L. McCreery, Anomalously slow electron transfer at ordered graphite electrodes: Influence of electronic factors and reactive sites, *Journal of Physical Chemistry* 98 (20) (1994) 5314–5319.
- [13] J. Rafiee, X. Mi, H. Gullapalli, A. V. Thomas, F. Yavari, Y. Shi, P. M. Ajayan, N. A. Koratkar, Wetting transparency of graphene, *Nature Materials* 11 (3) (2012) 217–222.
- [14] A. T. Valota, I. A. Kinloch, K. S. Novoselov, C. Casiraghi, A. Eckmann, E. Hill, R. A. W. Dryfe, Electrochemical behavior of monolayer and bilayer graphene, *ACS Nano* 5 (11) (2011) 8809–8815.
- [15] N. G. Tsierkezos, P. Szroeder, U. Ritter, Voltammetric study on pristine and nitrogen-doped multi-walled carbon nanotubes decorated with gold nanoparticles, *Micrichimica Acta* 181 (3-4) (2014) 329–337.
- [16] N. G. Tsierkezos, U. Ritter, A. Knauer, P. Szroeder, Electrochemical activity of nitrogen-doped carbon nanotubes decorated with gold nanoparticles, *Electrocatalysis* 5 (1) (2014) 87–95.

- [17] L. B. Biedermann, M. L. Bolen, M. A. Capano, D. Zemlyanov, R. G. Reifenberger, Insights into few-layer epitaxial graphene growth on 4H-SiC(0001) substrates from STM studies, *Physical Review B* 79 (12) (2009) 125411(10).
- [18] T. Ohta, N. C. Bartelt, S. Nie, K. Thürmer, G. L. Kellogg, Role of carbon surface diffusion on the growth of epitaxial graphene on SiC, *Physical Review B* 81 (12) (2010) 121411(4).
- [19] M. Lucchese, F. Stavale, E. Martins Ferreira, C. Vilani, M. Moutinho, R. Capaz, C. Achete, A. Jorio, Quantifying ion-induced defects and Raman relaxation length in graphene, *Carbon* 48 (5) (2010) 1592–1597.
- [20] N. G. Tsierkezos, P. Szroeder, U. Ritter, Application of films consisting of carbon nanoparticles for electrochemical detection of redox systems in organic solvent media, *Fullerens, Nanotubes, and Carbon Nanostructures* 19 (6) (2011) 505–516.
- [21] N. G. Tsierkezos, P. Szroeder, U. Ritter, Multi-walled carbon nanotubes as electrode materials for electrochemical studies of organometallic compounds in organic solvent media, *Monatshefte für Chemie* 142 (3) (2011) 233–242.
- [22] H. Zhou, P. Ganesh, V. Presser, M. C. F. Wander, P. Fenter, P. R. C. Kent, D. en Jiang, A. A. Chialvo, J. McDonough, K. L. Shuford, Y. Gogotsi, Understanding controls on interfacial wetting at epitaxial graphene: Experiment and theory, *Physical Review B* 85 (3) (2012) 035406(11).
- [23] K. Antonowicz, Possible superconductivity at room temperature, *Nature* 247 (5440) (1974) 358–360.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

5.1. Opis działalności naukowej przed uzyskaniem stopnia doktora

Pracę badawczą, a jednocześnie pracę magisterką, rozpocząłem na czwartym roku studiów w Zakładzie Radiospektroskopii i Fizyki Węgla Instytutu Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu pod kierunkiem prof. dr. hab. Franciszka Rozpłocha. Tematem mojej pracy była synteza i analiza widm absorpcyjnych w podczerwieni fullerenów uzyskiwanych poprzez odparowywanie grafitu metodą elektrołukową [A1]. Studia magisterskie ukończyłem w 1992 r. Przed ukończeniem studiów fizyki podjąłem studia filozoficzne. Pracę magisterką dotyczącą ontologicznych konsekwencji wynikających z nierówności Bella złożyłem i obroniłem w 1999 r. [A2].

We wrześniu 1995 r. podjąłem studia doktoranckie w Instytucie Fizyki UMK i wkrótce potem (XII 1995) zostałem przyjęty na stanowisko asystenta w Zakładzie Radiospektroskopii i Fizyki Węgla. Tematyka mojej pracy naukowej obejmowała syntezę i charakteryzowanie jedno- i wielościennych nanorurek węglowych oraz badania ich właściwości elektronowych. Technika syntezy obejmowała metodę odparowywania grafitu w łuku elektrycznym, stosowaną wcześniej do syntezy fullerenów. Jeszcze przed doktoratem wykonywałem udane eksperymenty z otrzymywaniem nanorurek na podłożach kanthalu metodą CVD.

Uzyskiwane materiały charakteryzowałem za pomocą elektronowej mikroskopii skaningowej i transmisyjnej, spektroskopii rozpraszania ramanowskiego i spektroskopii absorpcji w podczerwieni oraz dyfrakcji rentgenowskiej. Zjawiska lokalizacji elektronów przewodnictwa w uzyskiwanych materiałach badałem metodami elektronowego rezonansu paramagnetycznego. Uzyskane wyniki przedstawiane były w publikacjach [A3–A8].

Do uzyskania stopnia doktora realizowałem trzy uniwersyteckie granty badawcze, w tym dwa jako kierownik. W tym czasie odbyłem krótki staż badawczy na Uniwersytecie Technicznym w Chemnitz finansowany ze środków DAAD.

Pracę doktorską pt. *Własności elektronowe nanorurek węglowych* wykonaną pod opieką prof. dr. hab. Franciszka Rozpłocha ukończyłem i obroniłem w marcu 2004 r [A9].

Przed uzyskaniem stopnia doktora nawiązałem również współpracę naukową z pracownikami Instytutu Zabytkoznawstwa i Konserwatorstwa Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu. Na finansowanie badań uzyskaliśmy środki w ramach grantu KBN „Opracowanie metody datowania niektórych materiałów zabytkowych pochodzenia organicznego przy użyciu elektronowego rezonansu paramagnetycznego oraz spektroskopii ramanowskiej”, który realizowany był pod kierunkiem prof. dr. art. kons. Józefa Flika. Owocem współpracy były 4 wspólne prace [A10–A13].

Na mój dorobek naukowy przed uzyskaniem stopnia doktora składa się z 9 artykułów w recenzowanych czasopismach naukowych (1 w bazie WoS) oraz 6 prac konferencyjnych. Zostały one zestawione w *Wykazie publikacji* (załącznik 8). Wyniki moich badań zostały przedstawione podczas 16 konferencji naukowych. Podczas 5 z nich wygłosiłem referaty. Moja działalność badawcza została nagrodzona przez Rektora UMK w 2004 roku (nagroda indywidualna).

5.2. Opis działalności po uzyskaniu stopnia doktora

Po obronie pracy doktorskiej w 2004 roku kontynuowałem swoją pracę w Instytucie Fizyki UMK. W 2005 roku zostałem zatrudniony na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego w Zakładzie Fizyki Półprzewodników i Fizyki Węgla, którym kierował i kieruje do dnia dzisiejszego prof. dr hab. Franciszek Firszt. Tematyka mojej pracy naukowej była związana głównie z badaniami transportu elektronowego w węglach niskowymiarowych oraz badaniem właściwości powierzchniowych grafitu. W badaniach wykorzystywałem techniki spektroskopii elektronowego rezonansu paramagnetycznego, spektroskopii rozpraszania ramanowskiego oraz absorpcji w podczerwieni. Wyniki badań opublikowane zostały w pracach [A14–A16]. We współpracy z pracownikami Zespołu Datowania Luminescencyjnego Instytutu Fizyki UMK podjąłem badania wpływu promieniowania β na właściwości powierzchniowych warstw grafenowych w HOPG. Efektem współpracy są publikacje [A17, A18]. Inny nurt badań prowadzonych we współpracy z pracownikami Instytutu Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu dotyczył wpływu kompresji warstw grafenowych na zachowanie czynnika rozszczepienia spektroskopowego g w HOPG. Wyniki badań przedstawiłem w pracach [A19, A20].

W tym też czasie kontynuowałem współpracę naukową z pracownikami Instytutu Zabytkoznawstwa i Konserwatorstwa w ramach Specjalnego Programu Badawczego „Konserwacja dzieł sztuki za pomocą laserów – analiza zabytków średniowiecznego malarstwa ściennego technikami spektroskopowymi i chemicznymi dla potrzeb konserwacji”. Wyniki badań prowadzonych w ramach tego programu opublikowane zostały w pracach [A21–A23]. Po zakończeniu programu powstały kolejne prace interdyscyplinarne [A24–A27]. Owocem współpracy był udział w 22 dokumentacjach konserwatorskich i 3 ekspertyzach, w których mój wkład polegał na analizach widm oscylacyjnych próbek materiałów zabytkowych, analizach profili radarowych uzyskanych techniką GPR oraz analizach obrazów uzyskanych w różnych pasmach promieniowania elektromagnetycznego.

W 2009 roku odbyłem staż podoktorski na Uniwersytecie Technicznym w Ilmenau, w trakcie którego podjąłem badania właściwości powierzchni międzyfazowej łączącej fazę stałą (warstwy diamentowe, nanorurki węglowe) z fazą ciekłą (roztwory jonowe). W badaniach

wykorzystałem techniki voltamperometrii cyklicznej oraz zmiennoprądowej spektroskopii impedancyjnej. Wyniki badań opublikowane zostały w pracach [A28–A30]. Po powrocie do kraju kontynuowałem tę tematykę rozszerzając ją o modelowanie zjawisk międzypowierzchniowych [A31, A32]. W 2012 roku odbyłem kolejny staż w Ilmenau, podczas którego rozszerzyłem zakres badań kinetyki reakcji przeniesienia elektronu przez powierzchnię fazową o grafen [A33]. W trakcie pobytu w Ilmenau przeprowadziłem też serię testów na wydajność heterogenicznej reakcji redukcji tlenu z udziałem węgla niskowymiarowych. Reakcje te zachodzą w ogniwach paliwowych. Wyniki badań przedstawiłem w pracy [A34].

Podsumowaniem mojej działalności naukowej w kilku ostatnich latach jest monografia [A35], która stanowi główne osiągnięcie naukowe zgłoszone do niniejszego postępowania habilitacyjnego.

Na mój dorobek naukowy po doktoracie składa się wspomniana wyżej monografia, 23 recenzowane artykuły w czasopismach naukowych (15 w bazie WoS), 13 artykułów w materiałach konferencyjnych, 1 recenzowany rozdział w książce wydanej w języku polskim i rosyjskim oraz 1 recenzowany rozdział w książce nie dotyczącej fizyki (por. *Wykaz publikacji*, załącznik 8). Po uzyskaniu stopnia doktora wygłosiłem 13 referatów podczas międzynarodowych konferencji. Wyniki moich badań zostały przedstawione w formie plakatów bądź referatów wygłaszanych przez innych autorów podczas kolejnych 11 konferencji. Brałem udział w czterech grantach uniwersyteckich, trzy z nich koordynowałem.

5.3. Współpraca międzynarodowa

Owocem stażów podoktorskich na Uniwersytecie Technicznym w Ilmenau (TUI) jest moja współpraca naukowa z tamtejszym ośrodkiem. W ramach tej współpracy w lipcu 2013 r. gościłem w Toruniu dra Nikosa Tsierkezosa z TUI. Pobyt zaowocował dwiema publikacjami dotyczącymi wpływu nanocząstek złota naniesionych na węgle niskowymiarowe na ich wydajność elektrokatalityczną [A36, A37]. Kolejny pobyt dra Tsierkezosa planowany jest na wrzesień br. przed Toruńskim Sympozjum Węglowym.

Drugim ośrodkiem, z którym nawiązałem współpracę, jest Technische Universität Chemnitz (TUCh). Prof. Arved Hübler oraz dr Nora Wetzold, którzy specjalizują się w opracowywaniu technologii nadrukowywania nanorurek węglowych na podłoża polimerowe, byli koordynatorami wniosku *Integrated mass printed carbon nanotube sensors for environmental monitoring* (FP7-NMP-2013-SMALL-7). Projekt nie uzyskał wprawdzie rekomendacji Komisji Europejskiej, tym niemniej owocem współpracy jest praca [A38].

Kolejnym partnerem, z którym nawiązałem współpracę, jest prof. Yuriy Prylutskyi (National Taras Shevchenko University of Kyiv), który jest wybitnym specjalistą-teoretykiem w dziedzinie nanofizyki i nanobiotechnologii. Z profesorem Prylutskyim zamierzamy modelować zjawiska przeniesienia elektronu w układach hybrydowych węgla niskowymiarowych i makromolekuł biologicznych, jak również testować je eksperymentalnie.

We wrześniu br. odbędzie się 9 Toruńskie Sympozjum Węglowe <http://www.fizyka.umk.pl/~tcs/2014/>, w którym pełnię rolę przewodniczącego komitetu organizacyjnego. Sympozjum będzie okazją do pogłębienia i rozszerzenia współpracy międzynarodowej.

Literatura do punktu 5

- [A1] P. Szroeder, Otrzymywanie i badanie widm absorpcyjnych fullerenów uzyskanych w łuku węglowym w obecności argonu, Master's thesis, Wydział Matematyki, Fizyki i Chemii UMK, Toruń (1992).
- [A2] P. Szroeder, Nierówności Bella. O mających swe źródło w ontologii sprzecznościach w fizyce współczesnej, Master's thesis, Wydział Humanistyczny UMK, Toruń (1999).
- [A3] F. Rozpłoch, S. Jagielski, L. Nowak, J. Patyk, P. Szroeder, EPR of cationic forms of fullerenes, *Molecular Physics Reports* 18–19 (1997) 53–55.
- [A4] W. Marciniak, P. Szroeder, F. Rozpłoch, Badanie cylindrycznych nanostruktur węglowych metodami mikroskopii elektronowej, *Karbo* 43 (1–2) (1998) 53–55.
- [A5] P. Szroeder, W. Marciniak, F. Rozpłoch, Raman and EPR spectra from carbon nanotubes, *Karbo* 45 (4–5) (2000) 132–136.
- [A6] P. Szroeder, F. Rozpłoch, W. Marciniak, J. Rogóż, J. Flik, R. Rogal, Badanie węgla zawartego w warstwach malarskich metodą spektroskopii ramanowskiej, *Karbo* 47 (9) (2002) 262–264.
- [A7] P. Szroeder, F. Rozpłoch, W. Marciniak, Two-temperature EPR measurements of multi-walled carbon nanotubes, *Solid State Phenomena* 94.
- [A8] F. Rozpłoch, J. Patyk, P. Szroeder, New point of view on EPR-line shift in carbon materials, *Molecular Physics Reports* 37 (2003) 24–28.
- [A9] P. Szroeder, Własności elektronowe nanorurek węglowych, Ph.D. thesis, Nicolaus Copernicus University, Toruń (Mar. 2004).
- [A10] P. Szroeder, F. Rozpłoch, R. Rogal, Electron paramagnetic resonance in aged charcoals from architecture sgraffitos, *Karbo* 46 (11) (2001) 404–407.
- [A11] R. Rogal, J. Rogóż, J. Flik, P. Szroeder, W. Marciniak, F. Rozpłoch, Zastosovannâ ramanívs'koí spektroskopíi dlâ viznačennâ víku tvorív žívopisu, in: Restavraciâ muzejnich pam'átok v sučasnih umovah. Problemi ta slâhi ih virišennâ. IV Mižnarodna naukowo-praktična konferenciâ, Nacional'nij Naukovo-Doslídnij Restavracijnij Centr Ukraïni, Kiïv, 2003, pp. 117–118.
- [A12] P. Szroeder, F. Rozpłoch, W. Marciniak, J. Flik, R. Rogal, J. Rogóż, Elektronowy rezonans paramagnetyczny i spektroskopia ramanowska w datowaniu materiałów zabytkowych pochodzenia organicznego, in: J. Flik (Ed.), *Ars Longa – Vita Brevis. Tradycyjne i nowoczesne metody badania dzieł sztuki*, Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 2003, pp. 489–502.
- [A13] P. Szroeder, R. Rogal, J. Rogóż, J. Flik, F. Rozpłoch, W. Marciniak, Electron paramagnetic resonance and Raman spectroscopy in dating of some monumental materials of organic provenience, in: *Colloque Archéométrie 2003*, Bordeaux, 2003, p. 196.
- [A14] P. Szroeder, F. Rozpłoch, g-factor in multi-walled carbon nanotubes, *Acta Physicae Superfiorum VI* (2004) 131–136.
- [A15] S. Kulesza, P. Szroeder, J. K. Patyk, J. Szatkowski, M. Kozanecki, High-temperature electrical transport properties of buckypapers composed of doped single-walled carbon nanotubes, *Carbon* 44 (11) (2006) 2178–2183.
- [A16] F. Rozpłoch, J. Patyk, J. Stankowski, P. Szroeder, Siły wiązania metalicznego między płaszczyznami grafenowymi w graficie, *Karbo* LIII (1) (2008) 9–12.
- [A17] A. Chruścińska, K. R. Przegiętka, P. Szroeder, H. O. F. Rozpłoch, Luminescence from β -irradiated graphene layers, *Acta Physical Polonica A* 110 (1) (2006) 71–80.
- [A18] P. Szroeder, A. Chruścińska, K. Przegiętka, S. Kulesza, β irradiation effects in graphite and applications to material engineering, *Energy Conversion and Management* 49 (9) (2008) 2494–2498.

- [A19] A. Krupska, W. Jurga, L. Piekara-Sady, P. Szroeder, F. Rozpłoch, L. Nowak, High pressure EPR studies of graphite compounds, in: W. Macyk, K. Szaciłowski (Eds.), *Supramolecular Chemistry and Advanced Materials. 9-th Polish Supramolecular Chemistry Network Conference Nano 2007*, Jagiellonian University, Kraków, Kraków, 2007, pp. 78–81.
- [A20] A. Krupska, W. Jurga, L. Piekara-Sady, P. Szroeder, F. Rozpłoch, Effect of lattice compression on g-factor in graphite, *Solid State Communications* 148 (3–4) (2008) 148–150.
- [A21] J. Rogóż, J. Flik, P. Szroeder, J. Gryczewski, F. Rozpłoch, M. Pastorczak, M. Kozanecki, Micro-Raman spectroscopy for the study of wall-painting: An application to the Malbork castle, in: *Problemi zberežennâ, konservacii ta ekspertizi muzejnich pam'âtok - V Mižnarodna naukovo-praktična konferenciâ, Nacional'nij Naukovo-Doslđnij Restavracijnij Centr Ukraïni, Kiiïv, 2005*, pp. 397–399.
- [A22] P. Szroeder, Spektroskopia molekularna w konserwacji dzieł sztuki, in: G. Śliwiński (Ed.), *Techniki analityczne w konserwacji zabytków. Seminarium i warsztaty Gdańsk 8-9 czerwca 2006*, Wydawnictwo IMP PAN, Gdańsk, 2006, pp. 51–61.
- [A23] J. Rogoz, P. Szroeder, J. Flik, R. Rogal, E. Basiul, Techniki analityczne w datowaniu obrazów olejnych, *Acta Universitatis Nicolai Copernici: ZK 386* (2008) 103–110.
- [A24] W. Bartz, J. Rogoz, R. Rogal, A. Cupa, P. Szroeder, Characterization of historical plasters from the sgraffito in Boznów (SW Poland): preliminary results, *Mineralogia* 37 (2010) 73.
- [A25] P. Szroeder, J. Rogoz, Badania nieinwazyjne malowideł ściennych w prezbiterium kościoła pw. św. Jerzego w Ostropie, in: A. Żaba (Ed.), *Monografia Spotkanie z Zabytkiem, Vol. 4(V)*, Wydawnictwo Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2011, Ch. Badania nieinwazyjne malowideł ściennych w prezbiterium kościoła pw. św. Jerzego w Ostropie, pp. 83–96.
- [A26] A. Cupa, P. Szroeder, Badania inwazyjne malowideł ściennych w kościele pw. św. Jerzego w Ostropie, in: A. Żaba (Ed.), *Monografia Spotkanie z Zabytkiem, Vol. 4(V)*, Wydawnictwo Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2011, Ch. Badania inwazyjne malowideł ściennych w kościele pw. św. Jerzego w Ostropie, pp. 65–82.
- [A27] W. Bartz, J. Rogoz, R. Rogal, A. Cupa, P. Szroeder, Characterization of historical lime plasters by combined non-destructive and destructive tests: The case of the sgraffito in Boznów (SW Poland), *Construction and Building Materials* 30 (2012) 439–446.
- [A28] P. Szroeder, N. G. Tsierkezos, P. Scharff, U. Ritter, Electrocatalytic properties of carbon nanotube carpets grown on Si-wafers, *Carbon* 48 (15) (2010) 4489–4496.
- [A29] N. G. Tsierkezos, P. Szroeder, U. Ritter, Application of films consisting of carbon nanoparticles for electrochemical detection of redox systems in organic solvent media, *Fullerens, Nanotubes, and Carbon Nanostructures* 19 (6) (2011) 505–516.
- [A30] N. G. Tsierkezos, P. Szroeder, U. Ritter, Multi-walled carbon nanotubes as electrode materials for electrochemical studies of organometallic compounds in organic solvent media, *Monatshefte für Chemie* 142 (3) (2011) 233–242.
- [A31] P. Szroeder, Electron transfer kinetics at single-walled carbon nanotube paper: The role of band structure, *Physica E* 44 (2) (2011) 470–475.
- [A32] P. Szroeder, A. Górska, N. G. Tsierkezos, U. Ritter, W. Strupiński, The role of bandstructure in electron transfer kinetics, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 44 (2-3) (2013) 226–230.
- [A33] P. Szroeder, N. G. Tsierkezos, M. Walczyk, W. Strupiński, A. Górska-Pukownik, J. Strzelecki, K. Wiwatowski, P. Scharff, U. Ritter, Insights into electrocatalytic activity of epitaxial graphene on SiC from cyclic voltammetry and ac impedance spectroscopy, *Journal of Solid State Electrochemistry* (2014) doi: 1.10007/s10008-014-2512.
- [A34] P. Szroeder, N. G. Tsierkezos, U. Ritter, W. Strupiński, Nitrogen-doped carbon nanotubes as metal-free catalysts for the oxygen reduction in alkaline and acidic media, *Journal of Nanoscience Letters* 3 (2013) 9.

- [A35] P. Szroeder, Fizyka powierzchni międzyfazowej węgla niskowymiarowych i roztworów jonowych, Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń, 2013.
- [A36] N. G. Tsierkezos, P. Szroeder, U. Ritter, Voltammetric study on pristine and nitrogen-doped multi-walled carbon nanotubes decorated with gold nanoparticles, *Micrichimica Acta* 181 (3-4) (2014) 329–337.
- [A37] N. G. Tsierkezos, U. Ritter, A. Knauer, P. Szroeder, Electrocatalytic activity of nitrogen-doped carbon nanotubes decorated with gold nanoparticles, *Electrocatalysis* 5 (1) (2014) 87–95.
- [A38] N. G. Tsierkezos, N. Wetzold, A. C. Hübler, U. Ritter, P. Szroeder, Multi-walled carbon nanotubes printed onto polycarbonate substrate for electrochemical sensing, *Sensor Letters* 11 (8) (2013) 1465–1471.

5.4. Pozostała działalność naukowa

Po uzyskaniu stopnia doktora byłem recenzentem dla następujących 11 czasopism z bazy WoS:

- Acta Physica Polonica A,
- Analytical Letters,
- Analytical Methods,
- Ionics,
- The Journal of Chemical Thermodynamics,
- Journal of Experimental Nanoscience,
- Journal of Nuclear Materials,
- Journal of Solution Chemistry,
- Nano,
- Physics and Chemistry of Liquids,
- Thermochemica Acta.

Ponadto doznałem zaszczytu zaproszenia do recenzowania jednego projektu badawczego przez prestiżową **U.S.–Israel Binational Science Foundation** (BSF). Liczni naukowcy uczestniczący w programach BSF zostali laureatami najbardziej prestiżowych nagród naukowych na świecie, takich jak Nagroda Nobla, Nagroda Laskera i Nagoda Wolfa (<http://www.bsf.org.il/>).

5.5. Osiągnięcia w obszarze dydaktyki

Jestem nauczycielem akademickim od grudnia 1995 roku. Do chwili obecnej prowadziłem zajęcia, które miały formę ćwiczeń rachunkowych, zajęć laboratoryjnych, pracowni komputerowych, konwersatoriów i wykładów. Prowadzone zajęcia wraz z kierunkiem studiów wymienione zostały poniżej.

1. Ćwiczenia rachunkowe:

- *Fizyka ogólna* dla studentów fizyki, fizyki technicznej i astronomii,
- *Fizyka* dla studentów chemii oraz studiów międzywydziałowych chemii i biologii,
- *Fizyka elementarna* dla studentów materiałów współczesnych technologii i fizyki technicznej,
- *Podstawy metod opracowywania pomiarów* dla studentów fizyki, fizyki technicznej oraz astronomii.

2. Zajęcia laboratoryjne:

- *I pracownia fizyczna* dla studentów fizyki, fizyki technicznej, astronomii, automatyki i robotyki,
- *II pracownia fizyczna* dla studentów fizyki,
- *Pracownia fizyczna* dla studentów chemii, biologii i ochrony środowiska,
- *I i II pracownia elektroniczna* dla studentów fizyki i fizyki technicznej.
- *Pracownia rezonansów i wybranych metod pomiarowych fizyki ciała stałego* dla studentów fizyki technicznej.

3. Pracownie komputerowe:

- DOS dla studentów fizyki,
- L^AT_EX dla studentów informatyki stosowanej.

4. Wykłady:

- *Rezonanse magnetyczne i wybrane techniki pomiarowe fizyki ciała stałego* dla studentów fizyki technicznej. Część dotycząca rezonansów magnetycznych przeznaczona również dla studentów fizyki doświadczalnej i medycznej,
- *Metodyka badań materiałów malarskich* dla studentów konserwacji dzieł sztuki.

5. Zajęcia konwersatoryjne z historii filozofii dla studentów fizyki, fizyki technicznej i astronomii.

Do największych osiągnięć dydaktycznych zaliczam przygotowanie i zrealizowanie kursu *Rezonanse magnetyczne i wybrane techniki pomiarowe fizyki ciała stałego* dla studentów fizyki technicznej. Kurs obejmuje 30 godzin wykładu oraz 30 godzin ćwiczeń laboratoryjnych. W ramach tego kursu studenci zapoznawani są od strony teoretycznej i praktycznej zarówno

z technikami stosowanymi rutynowo w przemyśle (np. XRD, spektroskopia absorpcyjna IR), jak też z bardzo trudno dostępnymi technikami ze względu na koszt aparatury (np. NMRI).

Drugim ważnym osiągnięciem jest przygotowanie i zrealizowanie wraz z prof. Jarosławem Rogóżem (Instytut Zabytkoznawstwa i Konserwatorstwa UMK) 15-godzinnego wykładu dla studentów konserwacji z *Metodyki Badań Materiałów Malarskich*. Ze względu na bardzo duże zainteresowanie tym wykładem, na którym studenci konserwacji dzieł sztuki dowiadują się o nowoczesnych technikach diagnostycznych, na Wydziale Sztuk Pięknych UMK planuje się rozszerzenie kursu do 30 godzin. Materiały do obu wyżej wymienionych kursów dostępne są na stronie www.fizyka.umk.pl/~psz/teaching.html.

Jestem autorem rozdziału podręcznika *Problemy konserwacji i badań zabytków architektury* wydanego w języku polskim i rosyjskim, który jest przeznaczony dla studentów architektury.

Byłem promotorem 14 prac dyplomowych (w tym 3 magisterskich, 3 inżynierskich i 8 licencjackich). W tej chwili opiekuję się jedną pracą licencjacką i jedną magisterską.

Byłem recenzentem 17 prac dyplomowych (5 prac magisterskich, 2 prac inżynierskich i 10 prac licencjackich).

5.6. Osiągnięcia w zakresie popularyzacji fizyki

W 2000 r. brałem udział w przygotowaniu i przeprowadzeniu pokazów z fizyki dla uczniów szkół średnich. Byłem współautorem następujących wykładów popularno-naukowych, które wygłaszane były podczas Toruńskich Festiwali Nauki i Sztuki (TFNiS):

- *Fizyka w służbie ochrony zabytków* (E. Basiul, R. Rogal, J. Rogóż, P. Szroeder, 2006 rok),
- *Gabinet węglowych osobliwości* (P. Szroeder, 2009 rok).

W 2013 r. oraz w roku bieżącym podczas TFNiS zrealizowany został z moim udziałem pokaz warsztatowy dla młodszych dzieci o barwach.

Za największe osiągnięcie w zakresie popularyzacji fizyki uważam pokaz *Czas, przestrzeń i ruch – teatralny esej o fizyce, fizyczny esej o teatrze* (M. Bylicki, M. Giedrojć, P. Szroeder), który został przygotowany na TFNiS w 2007 r. Podczas festiwalu obejrzało go 800 widzów. Po festiwalu do tej pory odbyło się 5 dodatkowych prezentacji w różnych miastach w Polsce, podczas których *Esej* obejrzało kolejne 2000 widzów, przede wszystkim młodzieży licealnej i gimnazjalnej. Prezentacja w Białej Synagodze w Sejnach (IV 2011 r.) odbywała się pod patronatem medialnym Programu 2 Polskiego Radia.

Byłem recenzentem zadań na XI wojewódzki konkurs przedmiotowy z fizyki dla uczniów gimnazjów województwa kujawsko-pomorskiego 2013/2014.

5.7. Dorobek organizacyjny

Do chwili obecnej prowadziłem następujące prace organizacyjne:

- od 2010 r. jestem koordynatorem kursu *Fizyki elementarnej*;
- od 2008 r. jestem koordynatorem kursu *Metodyka badań materiałów malarskich*;

- od 2007 r. jestem koordynatorem kursu *Rezonanse magnetyczne i wybrane metody pomiarowe fizyki ciała stałego*;
- od 2002 r. do 2009 r. byłem opiekunem kroniki Instytutu Fizyki.

Byłem członkiem Local Advisory Committee podczas ósmej edycji *The Annual World Conference on Carbon* w Krakowie w 2012 roku (800 uczestników). W czasie tej konferencji przewodniczyłem jednej z sesji.

Od 1995 roku uczestniczę w pracach komitetu organizacyjnego Toruńskich Sympozjów Węglowych. W chwili obecnej jestem przewodniczącym komitetu organizacyjnego 9 Toruńskiego Sympozjum Węglowego.

Jestem członkiem Polskiego Towarzystwa Fizycznego oraz Polskiego Towarzystwa Węglowego (PTW). W PTW od 2009 r. jestem członkiem zarządu, od 2013 roku wiceprezesem.

Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki znajduje się w załączniku 6.

