

Kraków, dnia 18 listopada 2018 r.

dr hab. Przemysław Piekarczyk
Zakład Komputerowych Badań Materiałów
Instytut Fizyki Jądrowej
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152
31-342 Kraków

Ocena osiągnięć naukowych oraz istotnej aktywności naukowej doktora Macieja Wołoszyna

Dr Maciej Wołoszyn pracuje na stanowisku adiunkta na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej, Akademii Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie. Studia magisterskie z fizyki technicznej ukończył w roku 2000 na tym samym wydziale. W roku 2005, obronił pracę doktorską pt. „Badanie struktury elektronowej w nieuporządkowanych układach niskowymiarowych”. W latach 2005-2006 był asystentem na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH.

Ocena osiągnięć naukowo-badawczych na podstawie przedstawionego cyklu wybranych publikacji

Przedstawiona do recenzji rozprawa habilitacyjna zatytułowana „*Symulacje komputerowe transportu elektronowego w nanostrukturach niejednorodnych*” obejmuje cykl 8 prac (oznaczonych numerami od **H1** do **H8**) opublikowanych w latach 2009-2017 w czasopiśmie o zasięgu ogólnosięciowym: *Physical Review B* (2 prace), *European Physical Journal B*, *Physica Status Solidi RRL*, *Journal of Computational Electronics*, *Journal of Applied Physics*, *Journal of Physics: Condensed Matter* i *Physica E*. Prace te mają od dwóch do czterech autorów, w sześciu pracach dr Maciej Wołoszyn jest pierwszym autorem.

Główna tematyka badawcza przedstawionego cyklu prac dotyczy struktury elektronowej i własności transportowych układów aperiodycznych i nanostrukturalnych. Pierwsze trzy prace (**H1-H3**) przedstawiają badania teoretyczne układów, w których rozkłady barier, studni kwantowych lub centrów rozpraszania określone są przez ciągi kwasi-periodyczne lub przypadkowe. W pierwszej pracy zbadano układy, w których położenia studni kwantowych opisane są ciągiem Fibonacciego lub Thue-Morse'a. W takich układach, stany elektronowe w zewnętrznym polu elektrycznym tworzą

oddzielne podpasma, tzw. drabiny Wanniera-Starka. Zastosowanie funkcji rozkładu Wignera, która zawiera informację o efektach kwantowych, pokazuje nieklasyczne zachowanie w pobliżu antycrossingów stanów elektronowych, gdzie zjawiska interferencji kwantowej odgrywają ważną rolę. Pokazano również, że stopień lokalizacji stanów elektronowych zależy od pola elektrycznego i wykazuje silne zmiany w pobliżu antycrossingów. Praca **H2** dotyczy supersieci zbudowanej z warstw półprzewodników $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ oraz GaAs, ułożonych według binarnego ciągu Fibonacciego. Wyliczona gęstość stanów elektronowych składa się z minipasm i posiada strukturę fraktalną. Podobnie jak w pracy **H1**, w obecności pola elektrycznego pojawiają się antycrossingi, które powodują zmniejszenie stopnia lokalizacji stanów elektronowych. Dla kilku najniższych stanów, wyznaczono wskaźnik osobliwości i odpowiadające mu spektrum multifraktalne. Pokazano również, że wymiar uogólniony, będący wymiarem korelacyjnym funkcji falowej posiada maksima dla wartości pola elektrycznego powodującej wystąpienie antycrossingów. Praca **H3**, opisuje wpływ nieporządku na dynamikę elektronów w układzie jednowymiarowym. Pokazano, że transport elektronowy w badanym układzie ma charakter subdyfuzyjny z powodu wielokrotnych rozprośnień i słabej lokalizacji elektronów.

Cztery kolejne prace (**H4-H7**) dotyczą wpływu rezonansów Starka na własności transportowe układów nanostrukturalnych. W pracy **H4**, badane były własności przewodzące nanodrutu półprzewodnikowego z podwójną barierą potencjału. Przepływ prądu przez ten układ związany jest z tunelowaniem rezonansowym przez centralną studnię kwantową. Wyliczone natężenie prądu wykazuje oscylacje w funkcji grubości warstwy buforowej, co związane jest występowaniem rezonansów Starka. Tworzenie się tych rezonansów zbadano w uproszczonym modelu trójkątnej studni potencjału, która występuje w warstwie buforowej między źródłem prądu i pierwszą barierą potencjału. Podobne badania przeprowadzono dla nanodrutu z przewężeniem, które powoduje powstanie efektywnej studni potencjału i występowanie rezonansów Starka (**H5**). Zbadano charakterystyki prądowe w zależności od przyłożonego napięcia i parametrów definiujących geometrię przewężenia. Dodatkowo układ znajdował się w zewnętrznym polu magnetycznym skierowanym wzdłuż osi nanodrutu. Wyliczony magnetoopór wykazuje duże zmiany wartości i zmienia znak przy pewnych wartościach napięcia. W pracy zaproponowano możliwość eksperymentalnej realizacji sterowania magnetooporem przy pomocy dodatkowej bocznej bramki. Następna praca (**H6**) kontynuuje badania własności nanodrutu z przewężeniem. Rozszerzeniem modelu teoretycznego jest wyraz opisujący rozszczepienie Zeemana stanów elektronowych o różnych kierunkach spinu. Wprowadzony został również efektywny czynnik Landego, który pozwala uwzględnić oddziaływanie spin-orbita pochodzenia materiałowego. Pokazano, że przy niezerowym zewnętrznym polu magnetycznym, przewodnictwo elektronów jest różne dla przeciwnych kierunków spinu i wartość przewodnictwa spinowego zależy od promienia

przewężenia nanodrutu. Zbadano również zależność magnetooporu od pola magnetycznego i pokazano, że znak magnetooporu zmienia się dla określonej wartości promienia przewężenia. Praca **H7** dotyczy nanodrutu GaN, w którym znajdują się dwie bariery potencjału wykonane z materiału $\text{Al}_c\text{Ga}_{1-c}\text{N}$. W modelu teoretycznym uwzględniono akumulację ładunku na styku dwóch materiałów i powstanie spontanicznej polaryzacji elektrycznej. Do potencjału jednocząstkowego dodano również oddziaływanie wymienne między elektronami. Wyliczono średnie natężenie prądu przepływającego przez układ oraz przyczynę pochodzący od fluktuacji w funkcji koncentracji atomów Al i długości warstwy buforowej. Pokazano, że prąd płynący przez nanodrut osiąga maksimum dla takich rozmiarów warstwy buforowej, które odpowiadają rezonansom Starka. Ważną rolę odgrywa oddziaływanie wymienne, które kompensuje efekt akumulacji ładunku w studni potencjału, prowadzący do obniżenia jej głębokości. Ostatnia praca cyklu (**H8**) zajmuje się badaniem wpływu procesów dyssypacyjnych na przepływ prądu w układzie złożonym z kontaktów i nanodrutu z podwójną barierą potencjału. Ciekawym pomysłem jest uwzględnienie zarówno rozpraszania nośników w kontaktach, poprzez wprowadzenie zmodyfikowanych warunków brzegowych, jak i w obszarze aktywnym nanourządzenia. Transport ładunku opisany został w ramach niezależnego od czasu kinetycznego równania Wignera, z uwzględnieniem całki rozpraszania w przybliżeniu czasu relaksacji. Pokazano, że zmodyfikowane warunki brzegowe redukują maksymalną wartość natężenia prądu nawet o 35%. Rozpraszanie elektronów wewnątrz urządzenia prowadzi do dalszej redukcji natężenia prądu, którego wartość zależy od czasu relaksacji.

Według deklaracji habilitanta, wszystkie obliczenia zaprezentowane w cyklu prac, wykonał przy pomocy programów napisanych lub zaimplementowanych przez siebie. Wykonał również wszystkie obliczenia samodzielnie. Brał udział we wszystkich etapach tworzenia prac należących do cyklu: w opracowaniu koncepcji badań, analizie danych i przygotowaniu publikacji. W ośmiu pracach habilitant ocenia swój udział na 75% lub więcej. W dwóch pracach ocenia udział na 50% i 45%. Oświadczenia współautorów prac dołączone do rozprawy wskazują jednoznacznie na wiodącą rolę habilitanta we wszystkich artykułach.

Przedstawione w rozprawie habilitacyjnej dra Macieja Wołoszyna osiągnięcia naukowo-badawcze oceniam jako bardzo dobre. Wyniki przedstawionych badań w dużym stopniu poszerzają wiedzę na temat własności elektronowych i transportowych niejednorodnych układów nanostrukturalnych. Tematyka podjęta w rozprawie dotyczy zarówno podstawowych problemów badawczych takich jak własności kwantowe i struktura multifrakalna pasm elektronowych, jak również własności transportowych istotnych z punktu widzenia zastosowań w nanoelektronice. Przedstawione wyniki pozwalają lepiej zrozumieć te własności, co może przyczynić się do dalszego rozwoju i rozszerzenia obszarów stosowania tych układów. Do najważniejszych osiągnięć należy

zaliczyć: (1) zbadanie kwantowych własności stanów elektronowych w układach aperiodycznych i kwaziperiodycznych, (2) wyjaśnienie roli rezonansów Starka w mechanizmie oscylacyjnych charakterystyk prądowo-napięciowych i anomalnego zachowania magnetooporu w nanodrutach zawierających podwójną barierę potencjału i geometryczne przewężenie, (3) zastosowanie uogólnionych warunków brzegowych do opisu procesów rozpraszania nośników ładunku w nanourządzeniach.

Ocena dorobku naukowego i aktywności naukowo-dydaktycznej habilitanta

Dr Maciej Wołoszyn jest współautorem łącznie 40 prac, w tym 36 artykułów z bazy JCR. Przy tak dużym dorobku naukowym, parametry określające cytowalność prac (całkowita ilość cytowań to 131, bez autocytowań 74, indeks Hirsha $h = 6$) należy uznać za przeciętne. Habilitant brał udział jako wykonawca w dwóch projektach badawczych oraz w projekcie międzynarodowym COST. Jak dotąd nie kierował żadnym projektem naukowo-badawczym. Tematyka w pracach nie włączonych do cyklu habilitacyjnego dotyczy głównie własności układów nanoelektronicznych, takich jak warstwowe układy półprzewodnikowe, diody tunelowe RTD, urządzenia rezonansowo-tunelowe i nanourządzenia spintroniczne (filtry spinowe, generatory spinowo spolaryzowanego prądu). W pracach tych badane były własności związane z oscylacjami prądu, polaryzacją spinową prądu oraz wpływem oddziaływania spin-orbita na transport elektronów (tranzystor spinowy). Zajmował się również interdyscyplinarnymi badaniami dotyczącymi symulacjom dynamiki opinii oraz sieci społecznych we współpracy z prof. D. Staufferem (Instytut Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu w Kolonii) oraz prof. K. Kułakowskim (WFiIS AGH). Przebywał na dwóch krótkich pobytach zagranicznych na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Liege (2006) i w Instytucie Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu w Regensburgu (2015). Wyniki swoich badań zaprezentował na konferencjach krajowych i międzynarodowych (4 referaty i 14 plakatów).

Jeżeli chodzi o aktywność dydaktyczną, dr Maciej Wołoszyn prowadził w latach 2005-2018 zajęcia dla studentów Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. Były to m.in. wykłady, ćwiczenia i laboratoria z fizyki, wykłady i ćwiczenia z projektowania obiektowego, ćwiczenia z metod numerycznych i podstaw programowania oraz seminarium z matematycznych metod fizyki dla doktorantów. Należy podkreślić dużą aktywność habilitanta w prowadzeniu prac magisterskich (15) i inżynierskich (27) oraz ich recenzowaniu (w sumie 90). Obecnie jest również promotorem pomocniczym pracy doktorskiej na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH.

Podsumowując stwierdzam, że zarówno osiągnięcia naukowe przedstawione w rozprawie habilitacyjnej, jak również pozostałe prace z dorobku dra Macieja Wołoszyna reprezentują wysoki poziom badawczy i wnoszą istotny wkład do badań w dziedzinie fizyki ciała stałego. Bardzo dobrze

oceniam działalność dydaktyczną habilitanta oraz aktywny udział w konferencjach naukowych. Osiągnięcia naukowo-badawcze spełniają warunki określone w ustawie o stopniach i tytule naukowym dla osób ubiegających się o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego (z dnia 14 marca 2003 r. z późniejszymi zmianami). Wniosuję o przyjęcie rozprawy habilitacyjnej i o dopuszczenie dra Macieja Wołoszyna do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.

dr hab. Przemysław Piekarczyk



