



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii AGH

Kraków, 28.07.2022

dr hab. inż. Michał Nowak, prof. AGH
Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii
Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie

Recenzja osiągnięcia naukowego pt. „Stworzenie pionierskiej czasowo-rozdzielczej metody pomiaru niskiej temperatury i użycie jej do badania dynamiki procesów cieplnych w nanoskali” dr. inż. Macieja Zgirskiego

1) Sylwetka kandydata

Pan dr inż. Maciej Zgirski ukończył studia magisterskie na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej w 2003 roku. Następnie spędził cztery lata w Nanoscience Center na Uniwersytecie Jyväskylä w Finlandii realizując pracę doktorską zatytułowaną „Eksperymentalne badania fluktuacji w ultracienkich drutach nadprzewodzących”, którą obronił w 2008 roku. W latach 2008-2010 odbył staż podoktorski w Quantronics Group w CEA Saclay we Francji zajmując się spektroskopią stanów Andreeva w atomowym kontakcie nadprzewodzącym. Od 2010 zatrudniony jest jako badacz w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie. W trakcie zatrudnienia kontynuuje swoją aktywność w zagranicznych jednostkach – odbył dwie, wizyty naukowe w Laboratorium Niskich Temperatur Uniwersytetu Aalto w Finlandii.

Dr Zgirski zajmuje się fizyką eksperymentalną badając nanoskopowe układy nadprzewodzące. Jego zainteresowania badawcze koncentrują się wokół procesów stochastycznych zachodzących w złączach Josephsona. Przedstawiona dokumentacja świadczy o bogatym doświadczeniu w pracy naukowej, zdobytym w kilku dobrych ośrodkach badawczych, zarówno zagranicznych jak i krajowych. Swoje doświadczenie, którego owocem jest przedłożone osiągnięcie, dr Zgirski zdobywał współpracując z bardzo dobrymi specjalistami w dziedzinie

takimi jak J. P. Pekola czy C. Urbina. Osiągnięciem naukowym przedstawionym do oceny jest „stworzenie pionierskiej czasowo-rozdzielczej metody pomiaru niskiej temperatury i użycie jej do badania dynamiki procesów cieplnych w nanoskali”.

2) Ocena cyklu publikacji stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego

W skład osiągnięcia Habilitanta wchodzi cykl 5 powiązanych tematycznie artykułów, opublikowanych na przestrzeni 6 lat, zatytułowany „Stworzenie pionierskiej czasowo-rozdzielczej metody pomiaru niskiej temperatury i użycie jej do badania dynamiki procesów cieplnych w nanoskali”. Prace wchodzące w skład cyklu zostały opublikowane w bardzo dobrych czasopismach, 4 prace w *Physical Review Applied* i jedna w *Physical Review B*. Jak deklaruje Habilitant i co znajduje potwierdzenie w oświadczeniach pozostałych współautorów prac, jego wkład w powstanie tych artykułów był wiodący. Jest korespondującym autorem we wszystkich pracach a prace zostały napisane w pełni przez niego. Artykuły te powstały w ramach realizacji własnych grantów Habilitanta, w większości w laboratorium, które zostało zbudowane przez niego. Prace wchodzące w skład osiągnięcia zostały zacytowane dotychczas 38 razy (za bazą WoS).

Badania, których wyniki wchodzi w skład osiągnięcia motywowane są potrzebą stworzenia ultra-szybkich termometrów, które mogłyby śledzić własności termiczne ciał w nanoskali. Pomiaru takie mają istotne znaczenie dla dalszego rozwoju zarówno układów nanokalorymetrycznych, bolometrycznych ale także realizacji kubitów będących podstawą działania ciało-stałowymi komputerów kwantowych.

Kluczową cechą termometru powinna być możliwość rejestracji zjawisk zachodzących w skalach czasowych krótszych niż termiczne czasy relaksacji. W tym celu Habilitant zaproponował wykorzystanie złącza Josephsona, którego dynamika sięga aż do częstotliwości terahercowych. Sama idea wydaje się dosyć prosta – złącze przez które przepływa prąd elektryczny może znajdować się w jednym z dwóch stanów: dyssypatywnym – zachowując się jak opornik, bądź może przewodzić prąd bez spadku napięcia. Prawdopodobieństwo przełączenia pomiędzy tymi dwoma stanami jest zależne od temperatury i może zostać wykorzystane do realizacji czujnika temperatury. Dodatkową, niebagatelną zaletą zaproponowanej metody, jest fakt, że samo złącze może być rozmiarów mezoskopowych, dzięki czemu może być integrowane z obecnie badanymi nanostrukturami. Habilitant zademonstrował, że zrealizowane w trakcie jego badań urządzenia mogą zostać wykorzystane do analizy mechanizmów relaksacji ciepła, takich jak sprzężenie elektron-fonon czy też dyfuzji wzbudzonych termicznie elektronów. Zaproponowana metoda może znaleźć również zastosowanie w termodynamice kwantowej czy też nanokalorymetrii. Termometria w nanoskali

wyduje się również nabierać coraz większego znaczenia wraz z rozwojem praktycznego stosowania nanostruktur kwantowych, których pracę zaburzają termiczne wzbudzenia kwazicząstkowe. Ma to znaczenie np. dla doskonalenia funkcjonowania kubitów nadprzewodzących czy źródeł pojedynczych elektronów wykorzystujących zjawisko blokady Coulombowskiej. Przedstawiony cykl publikacji dokumentuje drogę od demonstracji zależnego od temperatury stochastycznego przełączania złącza Josephsona, przez demonstrację wykorzystania takiego układu jako generatora liczb losowych aż po praktyczne zastosowania układu jako szybkiego nanoskopowego termometru. Poniżej pokrótce omówię przedstawione przez Habilitanta osiągnięcia.

W pracy H1 Habilitant przedstawia ideę stochastycznego przełączania złącza Josephsona w postaci nanomostka aluminiowego. Kiedy przez złącze przepuszczany jest prąd o amplitudzie bliskiej prądowi krytycznemu, prawdopodobieństwo przełączenia (czyli prawdopodobieństwo tego, że na złączu pojawi się spadek napięcia) jest wprost proporcjonalne do temperatury. Wyjaśnienie tego efektu przedstawione jest na bazie modelu RCSJ, gdzie stan złącza określany jest przez pozycję (określającą różnicę faz nadprzewodzących) cząstki w tak zwanym pochylonym potencjale „washboard”. Fluktuacje termiczne mogą doprowadzić do przeskoku cząstki do kolejnego lokalnego minimum potencjału, co wiąże się ze skokiem fazy, co z kolei prowadzi do powstania skoku napięcia na złączu. Proces przełączenia się złącza jest wewnątrznie stochastyczny. W pracy H1, złącze próbkowane było impulsami prądu elektrycznego. Habilitant zaobserwował, że w zależności od amplitudy prądu zmienia się prawdopodobieństwo przejścia a losowa natura przejść złącza wykorzystana została do budowy nanoskopowego generatora liczb losowych.

Zależność prawdopodobieństwa przełączania od temperatury układu pozwoliło kolejno na wykorzystanie badanych struktur do termometrii. W pracy H2 dr Zgirski demonstruje wykorzystanie złącza Josephsona jako szybkiego termometru. Zmierzył zmieniającą się w czasie temperaturę elektronów w długim nanodrucie kwantowym, po przyłożeniu zewnętrznego impulsu grzejącego. Zarejestrowana czasowa ewolucja temperatury odpowiada modelowi teoretycznemu, który uwzględnia dwa kanały relaksacji: rozpraszanie elektron-fonon oraz elektroniczną dyfuzję ciepła w układzie. Istotnym osiągnięciem pracy jest zademonstrowanie rozdzielczości czasowej poniżej 10 ns, co jak przyznaje Habilitant jest wartością lepszą o dwa rzędy wielkości od rozdzielczości uzyskiwanych w konkurencyjnych metodach.

Do najważniejszych wyników kolejnych prac zaliczyć należy:

Obserwację dwóch czasów relaksacji dla przegrzanych mostków nadprzewodzących. W pracy H3 dr Zgirski wykazał, że szybka relaksacja (zachodząca w skali $10 < \mu\text{s}$) ma taki sam charakter dla słabo nagrzanego mostka (takiego, dla którego fonony są w równowadze

termicznej z fononami otoczenia) jak i mostka silnie rozgrzanego 600 impulsami przełączającymi. Jednakże dla mostka przegrzanego relaksacja do temperatury podłoża przebiega znacznie dłużej (milisekundy) i związana jest z termalizacją fononów krzemowego podłoża. W pracy H3 wykazano również, że charakter losowych przełączeń złącza w pełni zgodny jest z oczekiwaniem statystycznym – opisany jest rozkładem dwumianowym. Habilitant zauważa, że odchylenie standardowe tego rozkładu może zostać wykorzystane do wyznaczenia niepewności wyznaczania temperatury i pozwala określić najmniejszą mierzalną różnicę temperatur co przedyskutował w pracy H4.

Bardzo ciekawy wynik przedstawia Habilitant w pracy H4, gdzie zmierzono propagację termicznych kwazicząstek – termicznie wzbudzonych niesparowanych elektronów – w pasku nadprzewodnika. Złącze Josephsona umieszczone nieopodal mikroskopowej grzałki zarejestrowało zmieniającą się w czasie temperaturę elektronów. Rozdzielczy czasowo pomiar pozwolił na oszacowanie stałej dyfuzji kwazicząstek. W pracy H4 Habilitant ponadto stara się odpowiedzieć na pytanie czy temperaturę elektronów można rozumieć jako własność termodynamiczną, określającą ich rozkład Fermiego-Diraca czy też należy rozważyć ją jako własność dynamiczną jawnie określając liczbę i energie cząstek. Jak zauważa Habilitant jest to zależne od szybkości oddziaływania elektron-elektron względem szybkości relaksacji elektron-fonon. Jego badania w pracy H4 pokazują, że temperatura dynamiczna – mierzona dla stanów nieustalonych jest taka sama jak temperatura termodynamiczna co jest odzwierciedlone w pomiarach takich samych krzywych przełączania w obu przypadkach. Sugeruje to, że w obu pomiarach elektrony zajmowały dostępne stany zgodnie z rozkładem Fermiego-Diraca a więc podejście termodynamiczne jest uzasadnione w rozważanym przypadku.

Finalnie w pracy H5 Habilitant bada skorelowane przełączenia złącza wzbudzanego ciągiem impulsów prądowych. Kiedy zredukowany jest przedział czasowy pomiędzy pulsami fakt przełączania zależy od wyniku poprzedniego „rzutu monetą”. Wprowadza teoretyczny model, w którym uwzględnia przegrzewanie elektronów, które prowadzi do krótkozasięgowych korelacji pomiędzy przełączeniami oraz przegrzewanie fononów, które prowadzi do korelacji długozasięgowych. Układ ewoluje wzdłuż dwóch stochastycznych trajektorii z różnymi prawdopodobieństwami przełączenia, aż do całkowitego kolektywnego przejścia do stanu o prawdopodobieństwie przejścia równym 1. Habilitant proponuje wykorzystanie metody wzbudzania złącza ciągami impulsów do realizacji czujników zmieniającego się strumienia pola magnetycznego, prądu bądź temperatury.

3) Pozostała aktywność naukowa Habilitanta

Poza pracami H1-H5 dr Zgirski wymienia 6 publikacji, stworzonych po doktoracie, których jest współautorem. Tematyka tych prac jest różnorodna, chociaż związana z eksperymentalnymi badaniami układów nanoskopowych, w szczególności nadprzewodzących. Habilitant uczestniczył w badaniach, których celem było m.in. stworzenie miniaturowych cewek do generowania impulsowego pola magnetycznego, zmierzenie widma stanów Andreeva, termometria w złączu Josephsona sprzężonym z rezonatorem, określenie własności magnetycznych czy spektroskopowych materiałów półprzewodnikowych i topologicznych. Należy nadmienić, że wyniki części z tych badań ukazały się w bardzo dobrych czasopismach takich jak Physical Review Letters czy Nature Communications. Wszystkie prace Habilitanta zostały zacytowane 579 razy, a jego indeks Hirsha wynosi 11 na dzień pisania recenzji (za bazą WoS). Habilitant jest również współautorem 3 patentów, w których jego udział wynosi powyżej 50%.

Aktywności Habilitanta na polu konferencyjnym jest również wysoka. Na uwagę zasługuje wygłoszenie po doktoracie 10 wykładów konferencyjnych, w tym 6 wykładów zaproszonych. Pan Zgirski prezentował również swoje wyniki w ramach wykładów proszonych na krajowych i zagranicznych uniwersytetach (8 razy). Świadczy to o tym, że środowisko już doceniło wagę wyników badań dr. Zgirskiego.

Szczególną uwagę należy zwrócić na prestiżowe granty, o które dr Zgirski z powodzeniem aplikował i które realizował. Były to Homing Plus czy First Team Fundacji na rzecz Nauki Polskiej czy też SONATA BIS Narodowego Centrum Nauki. Realizacja z sukcesem tych projektów dowodzi umiejętności dr. Zgirskiego do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej i pełnienia funkcji lidera zespołu badawczego. Doktor Zgirski uczestniczył również w realizacji projektu europejskiego w ramach 7 Programu Ramowego. Na uwagę zasługuje również fakt, że Habilitant wykorzystując środki pochodzące z realizowanych projektów stworzył laboratorium, które umożliwiło przeprowadzenie badań będących przedmiotem osiągnięcia.

Doktor Zgirski jest również aktywny dydaktycznie, prowadził wykłady w ramach Współczesnych Problemów Fizyki na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej i był promotorem 4 prac magisterskich i jednej licencjackiej. Opiekuje się również jednym doktorantem i nadzorował prace jednego badacza na stażu podoktorskim (co ważne zatrudnionego w projekcie Habilitanta).

Finalnie należy nadmienić, że ekspercka wiedza Habilitanta ma również swoje odzwierciedlenie w pełnieniu funkcji recenzenta w m.in. renomowanych czasopismach z grupy APS Physical Review.

4) Wnioski i rekomendacje

Cykl prac stanowi opis realizacji nowego rodzaju termometru działającego w nanoskali i charakteryzującego się bezprecedensową rozdzielczością czasową. Układ ten został przez Habilitanta zaproponowany, eksperymentalnie zrealizowany i wykorzystany do pomiarów cieplnych w przykładowych układach, co zostało opisane w pracach H1-H5. Wyniki przedstawione w pracach demonstrują stworzenie nowej i przydatnej techniki badawczej i wnoszą istotny wkład w rozwój eksperymentalnej fizyki nanostruktur. Propozycja wykorzystania złącza Josephsona jako sterowalnego generatora liczb losowych może znaleźć praktyczne zastosowanie. Finalnie charakteryzacja termalizacji nanoskopowych nadprzewodników wnosi istotny wkład w zrozumienie fizyki nanostruktur. Stwierdzam, że przedstawione mi do oceny osiągnięcia naukowe dr. inż. Macieja Zgirskiego, ujęte w postaci cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych spełniają ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane kandydatom do nadania stopnia doktora habilitowanego.

Naukowa sylwetka Habilitanta, która wyłania się z opisanych osiągnięć, sposobu prowadzenia pracy naukowej, ilości i jakości realizowanych projektów oraz naukowego prowadzenia studentów, doktorantów i stażystów, jasno przedstawia badacza, który nie tylko jest gotowy do samodzielnej pracy naukowej co już w praktyce ją prowadzi.

Wnioskuje o nadanie dr. inż. Maciejowi Zgirskiemu stopnia doktora habilitowanego nauk fizycznych.

