

Prof. dr hab. Dariusz Wasik
Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski
ul. Pasteura 5,
02-093 Warszawa

Warszawa, 21 sierpnia 2023r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej magistra Dawida Śnieżka zatytułowanej:
„Transport kwantowy w nano-strukturach wykonanych z
trójwymiarowego krystalicznego izolatora topologicznego SnTe”**

Rozprawa doktorska pana mgr. Dawida Śnieżka poświęcona jest badaniom transportu elektronowego w polu magnetycznym w heterozłączach półprzewodnikowych SnTe/PbTe oraz studniach kwantowych CdTe/SnTe/CdTe. Praca ma głównie charakter doświadczalny, ale zawiera również analizę teoretyczną wyników pomiarów magnetotransportowych, w tym zaawansowane obliczenia numeryczne w ramach analizy spektrum ruchliwości (*mobility spectrum analysis, MSA*). Rozprawa jest napisana w języku polskim, liczy 104 strony, składa się z krótkiego wstępu opisującego przedmiot i cel prowadzonych badań, ośmiu rozdziałów, zwięzłego podsumowania i spisu literatury liczącego 69 pozycji.

Rozprawa doktorska mgr. Dawida Śnieżka jest w pełni oryginalna, a jej tematyka wpisuje się w jeden z obecnie najważniejszych nurtów badań podstawowych fizyki materii skondensowanej, tj. badań izolatorów topologicznych. Doktorant zebrał bardzo bogaty materiał doświadczalny oraz przeprowadził zaawansowaną analizę teoretyczną uzyskanych wyników. Rezultaty otrzymane w ramach pracy doktorskiej są bardzo interesujące a co najważniejsze nie tylko poszerzają one wiedzę na temat powstawania stanów topologicznych w heterostrukturach półprzewodnikowych, ale mają także istotny wkład w rozwój metodologii badań tej nowej klasy materiałów - izolatorów topologicznych. Obserwacja powierzchniowych stanów topologicznych metodami transportu elektronowego w SnTe jest bardzo trudna ze względu na silne samoistne przewodnictwo objętościowe typu *p*. Niewątpliwym osiągnięciem rozprawy doktorskiej jest potwierdzenie, że metodę analizy widma ruchliwości wyników pomiarów magnetotransportowych można stosować do badania stanów topologicznych. Rezultaty badań transportu kwantowego w heterozłączach SnTe/PbTe

zostały opublikowane w prestiżowym czasopiśmie naukowym *Physical Review B*: *D. Śnieżek, J. Wróbel, M. Kojdecki, C. Śliwa, S. Schreyeck, K. Brunner, L.W. Molekamp, G. Karczewski, and J. Wróbel, Phys. Rev. B 107, 045103 (2023)*. Doktorant jest pierwszym autorem tego artykułu. Jestem przekonany, że publikacja ta będzie cieszyć się zainteresowaniem w środowisku specjalistów materii skondensowanej. Pozostałe wyniki badań przeprowadzonych w ramach pracy doktorskiej, jak rozumiem zostaną opublikowane w przygotowywanej pracy.

Rozprawę doktorską mgr. Dawida Śnieżka oceniam bardzo wysoko pod względem merytorycznym. Uzyskane przez Doktoranta rezultaty są oryginalne i wartościowe. Celem pracy doktorskiej było zbadanie metodą pomiarów magnetotransportu efektów pochodzących od powierzchniowych stanów topologicznych w heterozłączach SnTe/PbTe oraz studniach kwantowych CdTe/SnTe/CdTe. W strukturach tych SnTe jest tzw. krystalicznym izolatorem topologicznym, pozostałe związki są tzw. trywialnymi półprzewodnikami. Za najważniejsze osiągnięcie rozprawy uważam pokazanie, że występujące w widmach ruchliwości złącz SnTe/PbTe podwójne linie widmowe o wysokiej ruchliwości – symetrycznie po stronie elektronowej (elektrono-podobne) i po stronie dziurowej (dziuro-podobne) są związane z jedno-nośnikowym transportem w pojedynczym paśmie topologicznym. Do tej pory tradycyjnie obserwowane oddzielone piki w widmie ruchliwości były interpretowane jako obecność różnych kanałów przewodnictwa. Przedstawiony w pracy doktorskiej przypadek widm ruchliwości jest inny – jednocześnie występujące dwie linie pochodzą od jednego kanału przewodnictwa nośników topologicznych i związane są z kształtem pasma energetycznego tj. wklęsłą i wypukłą częścią powierzchni stałej energii. Jak wspominałem już wcześniej wynik ten zarówno poszerza wiedzę na temat stanów topologicznych w materiałach półprzewodnikowych jak i metodologii badania materii skondensowanej.

Za kolejne ważne osiągnięcia rozprawy doktorskiej uważam:

- Badania stanów topologicznych w studniach kwantowych CdTe/SnTe/CdTe w sytuacji ograniczenia ruchu nośników topologicznych do quasi-jednego wymiaru i pokazanie, że otrzymane wyniki można interpretować jako obserwacja efektu Gurzhi, związanego z hydrodynamicznym przepływem cieczy fermionowej.
- Analizę kwantowych poprawek do przewodnictwa złącz SnTe/PbTe i w szczególności pokazanie, że efekt słabej antylokalizacji (w próbkach o grubości SnTe 10 i 20 nm) pochodzi od fermionów bezprzerwowych.

Dużym walorem pracy jest wykorzystanie przy analizie wyników doświadczalnych obliczeń teoretycznych. Niektóre z nich co prawda nie zostały wykonane przez samego Doktoranta, jak np. obliczenia tensorów przewodnictwa, nie umniejsza to jednak roli mgr. Dawida Śnieżka w przeprowadzeniu kompleksowej, spójnej analizy otrzymanych rezultatów.

Rozprawę doktorską można podzielić na dwie części: część opisowo-informacyjną, stanowiącą wprowadzenie do tematyki badawczej i część drugą – zasadniczą, zawierającą oryginalne wyniki doświadczalne i ich analizę teoretyczną.

Część pierwsza pracy składa się z trzech rozdziałów poprzedzonych krótkim wstępem. W rozdziale 2 i 3 mgr D. Śnieżek zawarł podstawowe informacje na temat transportu klasycznego i kwantowego w strukturach półprzewodnikowych. Doktorant pokrótce opisał problemy związane z analizą wyników pomiarów tensora rezystywności, szczególnie skupiając uwagę na metodzie analizy widma ruchliwości oraz modelu hydrodynamicznego przepływu elektronów. Rozdział 4 stanowi krótki przegląd informacji na temat tellurku cyny ze szczególnym uwzględnieniem wiedzy na temat struktury pasmowej topologicznych stanów powierzchniowych. Ta część rozprawy doktorskiej jest zwięzła – Doktorant zwrócił uwagę na zagadnienia, które były istotne z punktu widzenia planowanych pomiarów, co świadczy o jego głębokim zrozumieniu tematyki badawczej i postawionych celów rozprawy.

Drugą część pracy doktorskiej otwiera Rozdział 5 poświęcony metodom badawczym. Mgr Dawid Śnieżek w przejrzysty sposób opisał struktury półprzewodnikowe będące przedmiotem badań, ich przygotowanie za pomocą litografii elektronowej do pomiarów elektrycznych oraz metodologię wykonywanych eksperymentów. Pomiary transportu elektronowego w wysokich polach magnetycznych i w niskich temperaturach, zwłaszcza poniżej 0.5 K nie należą do łatwych. Bardzo ważny jest etap przygotowania próbek, tzn. wykonania ohmowych kontaktów elektrycznych oraz litograficzne nadanie właściwego kształtu mierzonym obszarom próbek. Uzyskane w ramach pracy doktorskiej wyniki doświadczalne pokazują, że Doktorant bardzo dobrze opanował stosowane techniki pomiarowe oraz metodę przygotowania struktur do pomiarów.

Rozdziały 6, 7 i 8 stanowią zasadniczą część rozprawy doktorskiej; zawierają oryginalny, bogaty materiał doświadczalny oraz zaawansowaną analizę teoretyczną uzyskanych rezultatów. Rozdział 6 poświęcony jest badaniom złącz PbTe/SnTe. W pierwszej części rozdziału mgr Śnieżek przedstawia wyniki pomiarów tensora rezystywności w funkcji pola magnetycznego dla różnych temperatur. Rezultaty te są interesujące chociaż w mojej opinii trochę zbyt skrótowo i pobieżnie opisane w rozprawie. Na przykład z rysunków 6.2 i

6.3 (str. 53) wynika, że nachylenie oporu Hallowskiego R_{xy} w funkcji pola magnetycznego dla warstwy o grubości 10 nm jest inne (inny znak pochodnej) niż w warstwach o grubości 5 nm i 20 nm. Przydałby się komentarz na ten temat. Kolejny przykład: na str. 52 mgr Śniezek pisze o wygładzaniu krzywych $R_{xy}(B)$. Na czym to „wygładzanie” polegało? Na podstawie analizy efektu słabej antylokalizacji i efektu słabej lokalizacji Doktorant przeprowadził wartościową analizę teoretyczną wyników wyciągając ważne wnioski odnośnie udziału nośników w stanie topologicznym w mechanizmie transportu elektronowego. Jednak najważniejszą częścią rozdziału jak i całej pracy jest analiza tensora przewodnictwa metodą widma ruchliwości. W literaturze można znaleźć prace w których tę metodę stosowano do badania stanów topologicznych ale obserwowane w widmie ruchliwości pojedyncze, rozdzielone linie były tradycyjnie przypisywane różnym kanałom przewodnictwa. W tej pracy wyniki i ich interpretacja jest inna: od jednego kanału przewodnictwa - jednego nośnika topologicznego pochodzą dwa piki, jeden po stronie dziurowej, drugi po stronie elektronowej. Oba piki są związane z nośnikiem poruszającym się po powierzchni stałej energii, która zawiera część wklęsłą i część wypukłą. Wniosek ten został poparty obliczeniami numerycznymi składowych tensora przewodnictwa zakładając postulowany w literaturze kształt pasm energetycznych stanów topologicznych. Jest to nowy, oryginalny wynik rozprawy doktorskiej mgr. Dawida Śniezka, mający duże znaczenie dla metodologii badań struktur półprzewodnikowych.

Rozdziały 7 i 8 poświęcone są badaniom studni kwantowych CdTe/SnTe/CdTe. Otrzymane wyniki potwierdzają wnioski z Rozdziału 6 odnośnie interpretacji dwóch symetrycznych (względem ruchliwości zerowej) pików w widmie ruchliwości jako pochodzących od jednego nośnika topologicznego. Bardzo interesujące wyniki uzyskał Doktorant na próbkach z wąskim kanałem przewodnictwa – rzędu kilkuset nanometrów, które sugerują, że w tym przypadku w transporcie elektronowym biorą udział nośniki zlokalizowane na bocznych krawędziach kanału przewodnictwa. Ponadto, przy tym założeniu, mgr Śniezek zinterpretował wyniki zależności oporu od prądu stałego płynącego przez próbkę jako obserwacja tzw. efektu Gurzhi związanego z hydrodynamicznym przepływem cieczy fermionowej.

Rozprawę doktorską mgr. Dawida Śniezka oceniam pozytywnie pod względem formy edytorskiej. Praca jest napisana starannie, poprawnie pod względem językowym a podział jej treści na poszczególne rozdziały jest logiczny i przejrzysty zachowując właściwe proporcje między częścią opisowo-informacyjną a częścią zawierającą oryginalne rezultaty. Doktorant

nie ustrzegł się co prawda pomyłek (np. str. 71 odniesienie do Rys. 1, powinno być do Rys. 7.1, czy na str. 78 odniesienie do wzoru (*)), ale są one nieliczne i przy takiej objętości pracy nie do uniknięcia.

W rozprawie dostrzegam następujące mankamenty:

1. Całkowite pominięcie analizy niepewności pomiarowych oraz niepewności wyznaczonych parametrów.

2. W przypadku badania przewodnictwa nośników dwuwymiarowych – w tym również stanów topologicznych, standardowo sprawdzana jest dwuwymiarowość nośników przez pochylenie próbki względem kierunku zewnętrznego pola magnetycznego. Mogę się domyślać, że w pracy też dokonano tej weryfikacji, ale ją pominięto w opisie.

3. Uważam, że w przypadku rysunków składających się z kilku części - części te powinny być także odpowiednio ponumerowane np. a), b), c) etc. - wówczas łatwo się do nich odnieść w tekście. W kilku przypadkach tej numeracji brakuje (np. rysunki: 4.3, 6.5, 6.7, 6.8, 6.9, 6.12, 7.1, 7.2, itd.), a wyrażenia w tekście rozprawy: *górnny*, *dolny*, *lewy* etc. nie są najlepsze. Czasami też jest brak informacji do których rysunków odnosi się tekst, np. na str. 52 Doktorant pisze: „*Dodatkowo, po prawej stronie rysunków pokazano względne zmiany ...*” – jakie rysunki Doktorant ma na myśli?

Ponadto, w pracy Doktorant używał terminu: *podłoża epitaksjalne* (np. na str. 43) odnoszącego się do całej próbki z wyhodowanymi strukturami kwantowymi. Nie jest to błąd, ale ten termin stosowany jest raczej tylko w odniesieniu do tej części próbki, na której hodowane są struktury kwantowe.

Wymienione mankamenty uważam za drobne i nie obniżają one mojej bardzo dobrej opinii na temat pracy doktorskiej.

Podsumowując, uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. Dawida Śnieżka wyróżnia się bardzo wysokim poziomem naukowym. Zawiera bogaty i oryginalny materiał doświadczalny oraz zaawansowaną analizę teoretyczną uzyskanych wyników. Doktorant wykazał się zdolnościami fizyka eksperymentatora posługującego się profesjonalnie niełatwą techniką pomiarów magnetotransportowych w niskich temperaturach (do 0.240 K) oraz na etapie przygotowania próbek metodą litografii elektronowej. Otrzymane wyniki poszerzają wiedzę na temat tworzenia się dwuwymiarowych stanów topologicznych w strukturach półprzewodnikowych na bazie SnTe oraz wnoszą wkład w rozwój metodologii badania materii skondensowanej.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska spełnia wymogi formalne i zwyczajowe stawiane przez odnośne przepisy rozprawom doktorskim, a w szczególności stanowi oryginalne rozwiązanie przez Doktoranta zagadnienia naukowego oraz wykazuje jego ogólną wiedzę teoretyczną i umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Dlatego wnioskuję o dopuszczenie mgr. Dawida Śnieżka do publicznej obrony pracy.

Dawid Wasil