

Prof. dr hab. Andrzej Kozłowski
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Katedra Fizyki Ciała Stałego
Akademia Górniczo-Hutnicza
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30

Kraków, 19 czerwca 2019

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr Magdaleny Marii Majewicz

“Wytwarzanie nanostruktur i badanie zjawisk transportu w dwuwymiarowych izolatorach topologicznych”

wykonanej w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie pod opieką prof. dr. hab. Tomasza Dietla.

Rozprawa doktorska mgr Majewicz dotyczy eksperymentalnego badania prądów krawędziowych w dwuwymiarowym izolatorze topologicznym HgTe.

Izolatory topologiczne (TI) zostały przewidziane teoretycznie już w ramach podstawowej teorii pasmowej ciał stałych. Konsekwencją tej teorii jest, że na brzegu, gdzie materiał-izolator o nietrywialnej topologii styka się z materiałem o topologii trywialnej pojawia się przewodnictwo. Przewodnictwo nie jest standardowe: spin jest ściśle skorelowany z pędem, a rozpraszanie nośników prądu do symetrycznego stanu, lecz z odwróconymi pędem i spinem nie jest możliwe: transport jest bezdyssypatywny mimo, że kanały przewodzące mogą nie być idealne. Inaczej mówiąc, przewodzenie krawędziowe (czy to będzie powierzchnia jak w TI 3 wymiarowych, czy krawędź w TI 2D) nie jest zaburzone przez defekty. I właśnie pomiarami prądów w dwuwymiarowym topologicznym izolatorze, studni kwantowej CdTe/HgTe/CdTe, zajmowała się Autorka. Celem było sprawdzenie przewidywań teorii dotyczących skwantowania przewodnictwa krawędziowego.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do Pracy; wydaje mi się, że, zważywszy na ambitny cel, wszystkie niuanse dotyczące badanego materiału, jak też i przegląd prac wykonanych nad nim powinien być szerszy. Poza stwierdzeniem o odwróceniu pasm nie ma słowa na temat topologii tego materiału, a to przecież stanowi podstawowy przedmiot badań. Co prawda materiał jest znany, ale przydałaby się jawna informacja o symetrii zapewniającej ochronę topologii; działania eksperymentalne, jak np. pole magnetyczne, może przecież wyeliminować tę symetrię, co może prowadzić do zmiany topologii.

We Wprowadzeniu zawarty jest też cel:

„... określenie związku między oporem indywidualnych kanałów krawędziowych w izolatorze topologicznym wytworzonym ze studni kwantowej tellurku rtęci, a długością kanału krawędziowego oraz geometria badanych mikrostruktur. Dodatkowym zamysłem doświadczalnej części badań było określenie wpływu warunków wytwarzania mikrostruktur na obserwowane własności transportowe.”

W Rozdziale 2, Metodyka badawcza, Autorka opisuje zarówno modele przepływu prądu (w tym kwantowy model Landauera-Büttikera, adekwatny w przypadku bezdyssypatywnych, koherentnych prądów krawędziowych, jak i te właściwości ogólne TI, które są ważne z uwagi na cel (np. uzasadnia konieczności użycia bramki dla umieszczenia poziomu Fermiego w

przerwie, a więc wytworzenia wyłącznie prądów krawędziowych). Muszę powiedzieć, że opis modelu Landauera-Büttikera nie jest jasny i, w moim przekonaniu, powinien być przedstawiony dokładniej.

W tym rozdziale przedyskutowane są też możliwe wyniki oraz zasugerowana geometria eksperymentu, wynikająca z celu, który Autorka chce osiągnąć (część 2.3). Autorka udowadnia jak skomplikowany technicznie jest eksperyment i jak finezyjne powinny być struktury zbudowane na bazie studni kwantowej CdTe/HgTe/CdTe.

Rozdział 3 jest naturalną konsekwencją tych argumentów: Autorka bardzo dokładnie, ze szczegółami, opisuje projektowanie struktur, oraz ich nanoszenie różnymi technikami, w szczególności metodą litografii elektronowej. Widać wyraźnie dużą biegłość w posługiwaniu się techniką, precyzję i dokładność wykonania. Stosunkowo obszerny rozdział 3 (37 stron) najprawdopodobniej odzwierciedla wysiłek Autorki i czas pracy wymagany do uzyskania satysfakcjonujących struktur.

W rozdziale brakuje mi pełnej charakteryzacji próbek. Autorka w Podziękowaniach wspomina o obserwacji próbek metodą mikroskopu sił atomowych i choćby takie wyniki powinny się tu znaleźć. W szczególności, nie jestem przekonany, czy badane próbki w istocie są TI, a także jakie są ich właściwości (oczywiście poza właściwościami elektrycznymi, których dotyczy Praca). A przecież jest wiele prac, w których używane przez Autorkę próbki są opisane, jak chociażby cytowana praca twórców próbek [54].

Równie obszerny, 39 stron, jest najważniejszy, czwarty rozdział Pracy „Wyniki doświadczalne”. Poprzez obserwację oporu lokalnego, definiowanego jako opór tej części, przez którą, w zwykłym oporniku, przepływa prąd, oraz obserwację oporu nielokalnego, czyli tej części próbki dla której spadek napięcia między sondami napięciowymi byłby zerowy w zwykłym oporniku, Autorka dowodzi istnienia prądów krawędziowych oraz, posługując się oboma modelami, oblicza opory poszczególnych krawędzi. To, że te opory nie są równe ich wartościom przewidywanym teoretycznie (są dużo większe) Autorka przypisuje, nie wdając się jednak w szczegóły, mechanizmom łamiącym ochronę topologiczną, np. „jeziorkom ładunkowym”. Fakt, że modelowy wręcz materiał, ma inne niż te wynikające z teorii właściwości jest na tyle intrygujący, że potencjalny mechanizm psujący koherencję, a właściwie łamiący topologię, czyli ów model „jezierek ładunkowych”, powinno się trochę szerzej przedyskutować. Zresztą uważam, że mierzona struktura jest na tyle skomplikowana (np. rys 3.2), że brak zgodności z teorią może wynikać z niekontrolowanych prądów płynących poza HgTe. Co prawda przerwa w CdTe jest dużo większa od tej w HgTe, to jednak nawet stosunkowo niska temperatura badań, 1.8K, może być zbyt duża dla założenia, że brak jest zwierania przez podłoże. W końcu pierwsze pomiary takich próbek, poszerzone w stosunku do tych prezentowanych w Pracy o pole magnetyczne 18T, były prowadzone w temperaturze od 30mK (praca Königa [20] na którą powołuje się Autorka).

Trochę bardziej optymistyczne są wyniki dla krótkich ($< 2 \mu\text{m}$) kanałów przewodzących dla których opór w kilku przypadkach tylko nieznacznie przewyższa teoretyczną wartość 25.8 k Ω .

Rozdział piąty jest wynikiem dążenia Autorki do zrozumienia sposobu rozptyłu prądów w całej strukturze. Ponieważ wyniki z rozdziału 4 są kontrowersyjne, to Autorka zasymulowała rozkład prądów w strukturze przy pomocy dostępnego pakietu QuickField. Używany przez Autorkę pakiet obliczeniowy oczywiście nie uwzględnia kwantowego przewodnictwa w TI. Jednak Autorka, omawiając wyniki w rozdziale 4 udowodniła, że konsekwencji modelu kwantowego nie widać w wynikach, a zatem uprawnione jest sięgnięcie po uzasadnienia klasyczne. A te, w postaci właśnie rezultatów symulacji, pokazują, że najbliższe, zaburzone,

otoczenie kanałów krawędziowych, może prowadzić do tego, że "uzyskiwane doświadczalnie opory czterosondowe wskażą wartości zawyżone względem wartości skwantowanych wynikających z modelu Ladauera-Büttikera. Efekt ten powinien być obserwowany nawet w przypadku całkowitej ochrony topologicznej w obrębie wszystkich segmentów kanałów krawędziowych w układzie". Inaczej mówiąc, rozbieżności w stosunku do idealnego przypadku topologicznie chronionych prądów krawędziowych można się spodziewać i ich źródłem są doprowadzenia elektryczne i przejściowy charakter oporu wokół kanałów krawędziowych.

Praca podsumowana jest w rozdziale 6. W trakcie jej realizacji Autorka wyznaczyła opory indywidualnych kanałów krawędziowych w zależności od ich długości i udowodniła, że są one większe niż przewiduje to teoria. Jednocześnie pokazała, że dla długości kanału krawędziowego poniżej 2 μm możliwa jest całkowita ochrona topologiczna. Klasyczne symulacje rozptyłu prądów pozwoliły zrozumieć, że kontakty mogą być źródłem zwiększonego oporu o kilkanaście procent w stosunku do teorii. Oznacza to, że pozostała nadwyżka oporu musi wynikać z istnienia efektu łamiącego ochronę topologiczną. Poszukiwania tego efektu trwają w MagTop z którym Autorka współpracowała.

Niezależnie od piękna teorii topologicznych izolatorów i jej przewidywań dających nadzieję na tanie, bez konieczności zapewnienia czystości materiałów, wytwarzanie materiałów spintronicznych, przewidywane przez teorię właściwości muszą być eksperymentalnie zweryfikowane. Taką weryfikację, sprawdzenie oporu przewodnictwa krawędziowego, postawiła przed sobą p. Majewicz. Nie jest więc Praca p. Majewicz propozycją praktycznego wykorzystania wiedzy o nietrywialnych własnościach TI, ani też badaniem innych ich właściwości. Obecny trend jest właśnie taki: jako pewnik przyjąć, że coś jest TI i starać się badać coraz to nowe właściwości np. poszukując fermionów Majorany. Takie działanie przynosi szybkie publikacje w prestiżowych czasopismach, ale, w moim przekonaniu, czasem nie dotyka podstaw problemu. Praca Pani Majewicz ma inny charakter: jest żmudnym badaniem podstawowych konsekwencji teoretycznych: jeśli materiał jest TI 2D, to ma bezdysypatywne stany krawędziowe, które, w przypadku wykorzystywanych przez Panią Majewicz materiałów, studni kwantowej CdTe/HgTe/CdTe o odpowiedniej grubości (8nm), powinny się w określony sposób zachowywać. Muszę powiedzieć, że takie podejście bardzo mi odpowiada.

Dlatego najbardziej ogólne wrażenie, które mi się nasuwa po przeczytaniu Pracy, to jej rzetelność, dokładność z jaką Autorka stara się wyjaśnić zaobserwowane opory i jak szuka wyjaśnień czemu nie są one takie jak przewiduje teoria. Zresztą Praca jest modelowa: Autorka dostaje próbkę, robi z niej mikrostrukturę stosując metodę litografii elektronowej, z istotną z punktu widzenia właściwości próbki modyfikacją, następnie ją mierzy, interpretuje wyniki rozważając dwa podejścia, a wreszcie, będąc zainteresowaną rozptyłami prądu, te rozptyły modeluje.

Topologiczne izolatory, to ciągle nowa problematyka: doświadczalnie mająca trochę ponad 10 lat, i wiele jest tu do zrobienia i zrozumienia. Wyniki Autorki prowokują do pytań: jak sprawdzić, że badany materiał jest rzeczywiście TI 2D (może trzeba by zrobić badanie ARPES wykorzystując chociażby mikro wiązkę na synchrotronie Solaris? Może warto by sprawdzić, jak pole magnetyczne wpływa na stany krawędziowe: czy złamanie symetrii TRS polem magnetycznym zmieni opory, czyli np. powie, że materiał nie jest już topologicznie chroniony? Czy samo wymuszenie prądu w jednym kierunku już samo nie zaburza topologii materiału? Takie pytania i niuanse można mnożyć, ale ważne jest, że takie drobiazgowo podejście zostało zrobione.

Na koniec, z obowiązku recenzenta, muszę powiedzieć, że Pracy nie czyta się łatwo i że spora jest liczba „literówek”. Niektóre, oczywiście szczegóły rysunków zostały w nadmiarze wyjaśnione, inne, ważne, mają bardzo skąpe wyjaśnienie. Ale najważniejsza jest treść i widoczna w każdym miejscu samodzielna praca i wielki wysiłek Autorki.

Zasugerowałem wyżej dodatkowe pomiary i weryfikacje eksperymentalne, ale jednocześnie zdaję sobie sprawę, że każda taka sugestia oznacza tygodnie, jeśli nie miesiące pracy. I dlatego uważam, że Pani mgr Magdalena Maria Majewicz dowiodła w swojej Pracy opanowania podstaw teorii izolatorów topologicznych, techniki ich pomiarów i interpretacji. **Przeprowadzenie pomiarów oporu elektrycznego mikrostruktur topologicznego izolatora 2D, t.j. studni kwantowej CdTe/HgTe/CdTe, w celu sprawdzenia przewidywań teoretycznych i wykonanie w tym celu struktur, w których takie pomiary mogą być wykonane, a także opracowanie wyników wraz z ich zamodelowaniem stanowią oryginalne rozwiązanie problemu naukowego ustawowo wymagane w rozprawie doktorskiej. Cała Praca dowodzi perfekcji Autorki w pomiarach właściwości elektrycznych TI, ich interpretacji i modelowania, a także znajomości metod litografii elektronowej niezbędnych przy wytworzeniu próbek, a także umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wnioskuje o dopuszczenie mgr Magdalenę Marię Majewicz do publicznej obrony Pracy.**

Andrzej Kutowski