

Warszawa, 28 sierpnia 2019

prof. dr hab. Michał Baj
Instytut Fizyki Doświadczalnej,
Wydział Fizyki UW

Recenzja rozprawy doktorskiej magister Magdaleny Majewicz pt. *"Wytwarzanie nanostruktur i badanie zjawisk transportu w dwuwymiarowych izolatorach topologicznych"*.

Rozprawa doktorska magister Magdaleny Majewicz wpisuje się w nurt bardzo intensywnie prowadzonych badań tzw. izolatorów topologicznych, w szczególności dwuwymiarowych izolatorów topologicznych w których wewnątrz dwuwymiarowej próbki jest izolujące, zaś na brzegu występują spinowo spolaryzowane jednowymiarowe stany krawędziowe (spinowy kwantowy efekt Halla). Pierwsza sugestia, że dwuwymiarowym izolatorem topologicznym powinna być np. studnia kwantowa HgTe o grubości przekraczającej 6,5 nm z barierami (Hg,Cd)Te została sformułowana w pracy B. A. Bernevig et al., *Science* **314**, 1757 (2006) i już w następnym roku doczekała się ona doświadczalnej weryfikacji – M. König et al., *Science* **318**, 766 (2007). Od tego czasu powstało bardzo wiele prac teoretycznych przewidujących stan dwuwymiarowego izolatora topologicznego w wielu różnych materiałach, z których w kilku udało się potwierdzić doświadczalnie jego występowanie – np. w pojedynczej warstwie Sn (stanen) na Bi₂Te₃, studniach InAs/GaSb, czy dwuwarstwie Bi. Chociaż studnie HgTe są kanonicznym dwuwymiarowym izolatorem topologicznym, to jednak nie jedynym. W związku z tym mam zastrzeżenie do zbyt ogólnego sformułowania tytułu rozprawy, gdzie jest mowa o „badaniach zjawisk transportu w dwuwymiarowych izolatorach topologicznych”, podczas gdy doktorantka zajmowała się wyłącznie studniami HgTe/(Hg,Cd)Te. Podobnie „badanie zjawisk transportu” to też za ogólne sformułowanie. Przedstawiono prawie wyłącznie wyniki pomiarów oporów (lokalnych i nielokalnych) i to wyłącznie w temperaturach helowych 1,5 – 5 K oraz jedynie szczątkowe wyniki pomiarów hallowskich.

Określając cel swojej pracy, doktorantka pisze: „Głównym celem niniejszej rozprawy było systematyczne zbadanie oporów poszczególnych kanałów krawędziowych w strukturach wykonanych ze studni kwantowej HgTe oraz określenie ich zależności od długości. W pracy posłużono się studniami HgTe o grubości 8 nm. Grubość ta odpowiada odwróconej strukturze energetycznej, a zatem powinna umożliwić obserwację kwantowego spinowego efektu Halla (QSHE)”. Takie określenie celu rozprawy ma źródło w fakcie, że tylko dla najkrótszych kanałów krawędziowych (o długościach pojedynczych mikrometrów) obserwowano dotychczas zgodne z teoretycznymi przewidywaniami skwantowane ich opory, zaś dla dłuższych kanałów opory te były istotnie większe. Wiązano to (np. Grabecki et al., praca [8] ze spisu literatury, czy Väyrynen et al., praca [72]) ze szczególną wrażliwością bardzo wąsko-przerwowych próbek HgTe na wszelkie niejednorodności składu i szerokości studni, mogące prowadzić do powstawania „przewodzących jezior” przy globalnie izolującym wnętrzu obszaru studni. Możliwość sprzężenia, poprzez tunelowanie, stanów krawędziowych z tymi jeziorami miałyby właśnie prowadzić do rozprożeń do tyłu i tym samym naruszenia ochrony topologicznej. Doktorantka chciała więc włączyć się w nurt dyskusji na temat przyczyn takiego stanu rzeczy, przy czym jej zadanie było niewdzięczne i niełatwe, bo już wcześniej istniały wyniki pomiarów oporów dla różnych długości kanałów krawędziowych (np. prace [5], [6], [8]

i [20] ze spisu literatury), a także zaproponowano możliwe wyjaśnienie tego zjawiska. Z tego punktu widzenia szkoda, że niniejsza praca nie powstała dobrych kilka lat wcześniej... To, że zadanie doktorantki rzeczywiście nie było łatwe i trudno było uzyskać publikowalne wyniki, świadczy także i to, że spośród sześciu publikacji pani Majewicz żadna nie dotyczy bezpośrednio wyników pomiarów transportowych przeprowadzonych w ramach rozprawy doktorskiej, jedna zawiera opis niskotemperaturowych procesów litografii elektronowej, stosowanych także przy realizacji badań objętych rozprawą, oraz jedna, bardzo interesująca praca w *npj Quantum Materials* (jedyna wspólna praca z promotorem rozprawy, prof. Tomaszem Dietlem), dotyczy wprawdzie badań studni HgTe, ale udział doktorantki w jej realizacji ograniczał się do prac przy przygotowaniu próbek.

Rozprawa zawiera 141 stron, składa się z 5 zasadniczych rozdziałów: 1 – „Wstęp”, który krótko wprowadza w tematykę badań izolatorów topologicznych, w szczególności dwuwymiarowych, oraz definiuje cel pracy, 2 – „Metodyka badawcza” (26 stron), 3 – „Wytwarzanie struktur” (38 stron), 4 – „Wyniki doświadczalne” (39 stron) i 5 – „Symulacje klasyczne” (19 stron). Podsumowanie i spis literatury obejmują dalszych 9 stron, bibliografia zawiera 72 pozycje. Poniżej odniosę się bardziej szczegółowo do zawartości poszczególnych rozdziałów.

Rozdział 2 – „Metodyka badawcza”:

1. przypomina formalizm Landauera-Büttikera stosowany do analizy czterosondowej konfiguracji pomiarowej próbek z wielosondowymi strukturami,
2. opisuje spodziewany wpływ elektrod bramkowych o geometrii palcowej oraz globalnej na przepływ prądu w próbkach o geometrii mostka hallowskiego – zarówno w przypadku, kiedy mamy do czynienia z wymuszonym polaryzacją bramki stanem trywialnego izolatora, jak i z izolatorem topologicznym z przewodzącymi kanałami brzegowymi,
3. przedstawia tzw. model opornikowy, za pomocą którego można opisywać zachowanie się próbek w sytuacji braku koherencji fazowej pomiędzy poszczególnymi częściami próbki,
4. analizuje czynniki mające potencjalny wpływ na możliwość potwierdzenia przewodnictwa krawędziowego i wyznaczenia oporów poszczególnych kanałów krawędziowych. Analiza ta umożliwiła optymalizację (pod względem geometrii i wielkości) projektów struktur zarówno z bramkami palcowymi, jak i globalnymi. Zaprojektowane struktury były następnie wytworzone i zbadane.

Rozdział ten czyta się dobrze. Stanowi on interesujące wprowadzenie w tematykę badań transportowych topologicznych studni kwantowych HgTe oraz jest zgrabnym uzasadnieniem sensowności podjętych badań.

Rozdział 3 – „Wytwarzanie struktur”.

Rozdział ten szczegółowo opisuje techniki stosowane do przygotowania badanych próbek ze studniami HgTe bez konieczności stosowania wygrzewań w temperaturach powyżej 85 °C, co jest w przypadku tego materiału istotne ze względu na dyfuzję atomów rtęci. Jako niespecjaliście trudno jest mi się zorientować na ile szczegóły stosowanych technik są oryginalne, w których rozwijaniu doktorantka wniosła coś nowego. Wydaje się, że przynajmniej pomysł wstępnego wygrzewania rezystów w próżni jest autorstwa/współautorstwa doktorantki (M. Majewicz et al., „Low Temperature Processing of Nanostructures Based on II_VI Semiconductors Quantum Wells”, *Acta Physica Polonica A*, 126, 1174 (2014)). Według mnie, niespecjalisty, w Rozdziale 3 za szczegółowo opisane są

poszczególne etapy: przygotowania rezystów, naświetlań wiązką elektronów, wykonywania i rozpoznawania znaczników w przypadku wielopoziomowej elektronolitografii, procesów trawienia, wytwarzania warstw dielektrycznych oraz elektrod bramkowych. Wydaje się, że większość z tych opisywanych szczegółowo etapów processingu próbek jest standardowa i w związku z tym nie wymaga tak drobiazgowych opisów. Brakuje przynajmniej jasnej deklaracji które ze stosowanych technik były jakoś zmodyfikowane przez doktorantkę, a które były w pełni standardowe. Czytanie tego rozdziału jest męczące (np. wielokrotnie powtarzającego się fragmentu dotyczącego oczyszczania powierzchni). Być może zamiarem doktorantki było napisanie szczegółowej instrukcji dla „nowicjuszy”, na podstawie której byliby w stanie szybko wdrożyć się w skomplikowane procedury przygotowania próbek, ale jeśli już rzeczywiście tak było, trzeba było zasadniczą część tego rozdziału przenieść do dodatków.

Rozdział 4 – „Wyniki doświadczalne”.

Rozdział 4 składa się z szeregu części, które opisują badane mikrostruktury, układ eksperymentalny, przedstawiają wyniki testów funkcjonowania elektrod bramkowych, po kolei przedstawiają wyniki pomiarów oporów lokalnych (próbki z elektrodami palcowymi i globalnymi) i nielokalnych (próbki z elektrodami globalnymi) poszczególnych próbek oraz prezentują procedurę i wyniki oszacowań oporów kanałów krawędziowych badanych struktur. Można zaryzykować stwierdzenie, że chcąc w telegraficznym skrócie podsumować wynik badań przeprowadzonych w recenzowanej rozprawie, trzeba się odnieść do Rys. 4.32 i 4.42. Przedstawiają one opory indywidualnych kanałów krawędziowych dla, odpowiednio, próbek z bramkami palcowymi ($F_1 - F_3$) i globalnymi (G_2 i G_3) w funkcji ich długości. Widoczna jest wyraźna tendencja do wzrostu oporu wraz z długością kanału oraz znaczny rozrzut oporów indywidualnych kanałów przy ich stałej długości (najbardziej widoczny dla kanałów o długości 2 μm). Pozwoliło to p. Majewicz na sformułowanie w podsumowaniu rozdziału 4 zdania: „Przedstawione dane wskazują na lokalny charakter mechanizmu powodującego rozpraszanie w obrębie kanałów krawędziowych”. Ten główny wynik rozprawy jest więc zgodny z wcześniejszymi pracami. Z jednej strony to dobrze, ale z drugiej oznacza, że niniejsza praca nie wnosi bardzo wiele oryginalnych elementów do tematu, chociaż ***główny cel rozprawy, sformułowany na jej początku, został zrealizowany...***

Mam szereg uwag/wątpliwości do zawartości Rozdziału 4:

1. Razi mnie pokazywanie projektów centralnych części poszczególnych próbek (Rys. 4.1, 4.3, 4.7, 4.10, 4.13), a także schematów centralnej części wszystkich struktur (Rys. 4.5, 4.9, 4.12, 4.15), podczas gdy pojawiają się także w pracy zdjęcia tych mikrostruktur. Co najwyżej można było pokazać 2 wybrane schematy (np. 4.5 i 4.9) i w ogóle zrezygnować z przedstawiania projektów.
2. Nie wydaje mi się uzasadnione szczegółowe omawianie zasady działania kriostatu helowego i insertu zmiennie-temperaturowego. Są to rzeczy powszechnie znane.
3. W odróżnieniu od powyższej uwagi w kilku miejscach brakowało mi pewnych danych – np. na str. 77 jest stwierdzenie, że „Pomiar oporu próbki P w funkcji napięcia przyłożonego do elektrod bramkowych struktur $P_1 - P_4$ wskazywały na to, że wybrany zakres szerokości przewężeń jest nieodpowiedni dla badanej heterostruktury. Bez względu bowiem na wybór sond pomiarowych opory uzyskane w konfiguracjach czterosondowych sięgały kilku $\text{M}\Omega$ ”. Dlaczego autorka nie pokazała tych wyników?
4. Nie rozumiem dlaczego autorka, w odróżnieniu od niepotrzebnego opisu konstrukcji kriostatu, nie napisała żadnych szczegółów dotyczących samych pomiarów

- transportowych – czy to były pomiary DC, czy może AC, a jeśli tak, to na jakiej częstotliwości? Jakich przyrządów pomiarowych używała doktorantka? Jakie były natężenia prądu używane w pomiarach? Jak wyglądały charakterystyki prądowo-napięciowe (czy były liniowe?) w poszczególnych konfiguracjach badanych próbek? Jak sprawdzano, czy natężenie prądu płynącego przez próbkę nie było za duże?
5. W podrozdziale 4.3.1 podano suche dane na temat koncentracji i ruchliwości hallowskiej wyjściowego materiału, ale w ogóle nie wiadomo jakiej temperatury to dotyczy i w jakim polu magnetycznym wykonano pomiar. Najchętniej zobaczyłbym zależność tensora przewodnictwa od pola magnetycznego.
 6. W podrozdziale 4.3.2 autorka pisze o pomiarach natężenia prądu upływności bramek, ale żadnego wykresu nie pokazuje.
 7. Autorka w ogóle nie zajmuje się analizą fluktuacji oporu (np. Rys. 4.18 czy 4.19) oraz koncentracji hallowskiej (Rys. 4.23) badanych próbek w obszarze napięć odpowiadających zubożeniu wnętrza obszaru studni HgTe. Najprawdopodobniej w obszarze tym daje o sobie znać konkretny rozkład przestrzenny obiektów (jeziorek?) odpowiedzialnych za rozpraszanie w konkretnych kanałach krawędziowych. Myślę, że interesujące byłoby obliczenie korelacji pomiędzy zależnościami poszczególnych oporów od napięcia bramki $R(V)$, otrzymanymi w różnych pomiarach dla danego kanału, jak i korelacji pomiędzy zależnościami otrzymanymi dla różnych kanałów.
 8. W kilku miejscach autorka pisze, że argumentami na potwierdzenie, iż przewodnictwo jest zdominowane przez stany krawędziowe są: (1) – zgodny znak spadków napięć mierzonych na kolejnych sąsiednich parach sond oraz (2) – addytywność kolejnych spadków napięć. Nie zgadzam się z taką tezą. Być może czegoś zupełnie nie rozumiem, ale przecież dokładnie tego samego można się spodziewać dla dyfuzyjnego, objętościowego transportu w dwuwymiarowej próbce z kontaktami rozmieszczonymi na jej brzegu! Moim zdaniem najlepszym argumentem za krawędziowym przewodnictwem mogą być pomiary oporów nielokalnych na próbkach o umiejętnie dobranej geometrii. I rzeczywiście wyniki pomiarów doktorantki wskazują na dominację transportu krawędziowego w sytuacji, kiedy wewnątrz studni jest zubożone.
 9. Bardzo brakuje mi tabeli z danymi dotyczącymi różnych próbek (wymiary, geometria próbek, stosowane techniki w wytwarzaniu bramek, najważniejsze wyniki etc.) Czytając rozdział opisujący wyniki trudno jest przebrnąć przez szczegóły i nie jest łatwo przeprowadzić jakąkolwiek syntezę.
 10. Nie rozumiem, co doktorantka miała na myśli pisząc (str. 104, fragment zatytułowany „Nieliniowość oporów kanałów krawędziowych w strukturze G_1 ”): „Dokładna analiza wyników uzyskanych na mikrostrukturze G_1 wskazuje jednak na to, że opór przynajmniej jednego kanału krawędziowego obecnego w strukturze nie zależy liniowo od przepływającego przez niego prądu”. Tuż obok autorka pisze także o „znacznym odstępstwie od prawa Ohma”, chociaż w ogóle nie pokazuje jakichkolwiek charakterystyk prądowo-napięciowych – nie wiem skąd wniosek o niespełnieniu prawa Ohma.

Jak widać mam szereg zastrzeżeń do tego rozdziału, niemniej jednak wydaje się, że cały projekt został skonstruowany poprawnie – różne typy struktur, które zostały zaprojektowane miały umożliwić odpowiedzi na różne konkretne pytania (o optymalną szerokość struktur hallowskich, długości kanałów krawędziowych, dla których można byłoby obserwować skwantowane przewodnictwo związane z krawędziami, etc.). Dlatego też, doceniając ogromny

wysilek doktorantki w zaprojektowaniu i wykonaniu próbek, pomimo dość skromnego materiału doświadczalnego uzyskanego na tych próbkach, oceniam całość wyników doświadczalnych pozytywnie.

Rozdział 5 – „Symulacje klasyczne”.

Rozdział ten jest udaną próbą wymodelowania, na podstawie klasycznych symulacji (przy założeniu transportu dyfuzyjnego), rozplywu prądu w układach w realistyczny sposób imitujących struktury badane w części doświadczalnej. Magister Magdalena Majewicz używała pakietu do obliczeń metodą elementów skończonych – *QuickField*. Autorka starała się zasymulować obecność polaryzowanych bramek oraz kanałów krawędziowych poprzez umiejętny dobór rozkładu oporności właściwej materiału (inna w obszarze cienkich pasków kanałów krawędziowych, inna w obszarze wewnętrznym studni – i to różna w zależności od tego czy był to obszar zubożony pod bramką, czy też nie pokryty metalizacją bramki). Głównym rezultatem przeprowadzonych symulacji jest stwierdzenie, że w przypadku struktur o niepomijalnym oporze właściwym najbliższego otoczenia „końców” kanałów krawędziowych w obszarze zubożonego wnętrza studni, a więc obszarów łączących poszczególne fragmenty kanałów krawędziowych, czterosondowy pomiar ich oporu daje zawyżone wyniki w stosunku do wartości przewidywanych w ramach formalizmu Landauera-Büttikera. Nie jest to może wynik niemożliwy do intuicyjnego przewidzenia, niemniej jednak należy uznać tę analizę za wartościową, chociaż nie zdającą sprawy z niedyfuzyjnego charakteru przewodnictwa kanałów krawędziowych. Za głupią wpadkę doktorantki należy uznać rysunek 5.3, gdzie linie prądu wychodzą na zewnątrz próbki (!) – na dole i na górze doprowadzenia elektrycznego. Przy takim kształcie doprowadzenia gęstość prądu nie ma prawa być jednorodna!

Na koniec jeszcze kilka drobniejszych błędów, głównie natury edytorskiej:

- Połowa str. 12 – w definicji współczynników transmisji T_{ij} zamieniona jest rola wskaźników i oraz j w porównaniu ze wzorem 2.3.
- Podobnie na Rys. 2.1, 2.2, 2.3.
- Na Rys. 3.4 – ograniczanie się do tzw. wzoru szkieletowego jest chyba przesadą...
- Na Rys. 4.4 – błędna szerokość wytrawienia – na oko widać, że nie może to być $8\ \mu\text{m}$, skoro właśnie tyle wynosi szerokość mostka hallowskiego.
- Wzór 4.29 – w trzeciej linijce powinno być $R_{12,65}$, a nie $R_{12,63}$.

Pomimo szeregu zastrzeżeń sformułowanych przy omawianiu poszczególnych rozdziałów, końcowy rezultat rozprawy oceniam pozytywnie:

- zaprojektowano struktury pod kątem możliwości potwierdzenia dominacji przewodnictwa krawędziowego w sytuacji zubożonego wnętrza studni HgTe i wyznaczenia oporów poszczególnych kanałów,
- starannie przeprowadzono skomplikowane procesy przygotowania próbek,
- wykonano pomiary oporów lokalnych i nielokalnych poszczególnych kanałów krawędziowych badanych struktur,
- uzyskano potwierdzenie dominacji przewodnictwa krawędziowego w próbkach z zubożonym wnętrzem studni HgTe,
- wykazano, że opory kanałów krawędziowych są większe niż wynikałoby to z formalizmu Landauera-Büttikera i są tym większe czym dłuższy kanał,

- uzyskane wyniki wskazują na to, że za zwiększenie tych oporów odpowiada jakiś lokalny mechanizm rozpraszania w obrębie kanałów krawędziowych (np. proponowany wcześniej mechanizm tunelowania pomiędzy stanami krawędziowymi i przewodzącymi „jeziorkami” związanymi z niejednorodnościami składu i/lub szerokości studni),
- na podstawie klasycznych symulacji zasugerowano, że w zwiększeniu oporów poszczególnych fragmentów kanałów krawędziowych ma także swój udział niezaniechany opór fragmentów doprowadzeń w obszarze bezpośrednio graniczącym z „końcami” kanałów.

Podsumowując stwierdzam, że wprawdzie nie bez szeregu zastrzeżeń, ale jednak oceniam recenzowaną pracę pozytywnie, uznaję, że spełnia ona podstawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do obrony.

