

Prof. dr hab. inż. Vitalii Dugaev
Wydział Matematyki i Fizyki Stosowanej
Politechniki Rzeszowskiej
Al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów

Rzeszów, 18 sierpnia 2020 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Ewy Bobko
pt. "Wytwarzanie i transport w kwantowych niskowymiarowych
nanostrukturach półprzewodnikowych z materiałów II-VI "**

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Ewy Bobko jest wytwarzanie oraz badania właściwości magneto-transportowych struktur kwantowych na bazie materiałów półprzewodnikowych typu II-VI domieszkowanych Mn. Materiały objętościowe tego rodzaju z uwagi na możliwość wystąpienia gigantycznego wzmocnienia polaryzacji spinowej elektronów przewodnictwa w polu magnetycznym od dawna wzbudzały duże zainteresowanie. W ostatnich latach jeden z najważniejszych kierunków rozwoju fizyki tych materiałów związany był z możliwością odnalezienia nowych zjawisk kwantowych w strukturach niskowymiarowych związków z grupy II-VI domieszkowanych Mn lub inną domieszką magnetyczną.

Praca doktorska Pani Bobko jest pracą eksperymentalną, która składa się z ośmiu rozdziałów, z których pierwszy jest wstępem, natomiast pozostałe siedem podzielone są na trzy części: zjawiska transportowe, litografia i transport, i trzecia część to – wyniki badań eksperymentalnych. Faktycznie rozdział pierwszy – to jest przegląd literatury na temat transportu kwantowego i kwantowego zjawiska Halla. Druga część (litografia i próbki) zawiera opis metody wytwarzania próbek, wykonania kontaktów elektrycznych oraz wykonania struktur kwantowych dwóch typów, tak zwanych typu T i H. Trzeci rozdział (wyniki pomiarów) zawiera opis metody pomiarowej i przedstawia wyniki badań: rezystancji hallowskiej i przewodności różniczkowej w funkcji pola magnetycznego i napięcia źródło-dren. Ostatni rozdział 8 jest podsumowaniem. Praca zawiera jeden dodatek, w którym podano parametry litografii dla struktur typu T i H. Bibliografia przedstawia 111 źródeł, w tym jedno cytowanie na 75-tym miejscu – to właśnie praca Pani Bobko ze współautorami, opublikowana w Opto-Electronics Review w 2017 roku (drugiej pracy Pani Bobko opublikowanej w Physical Review B, 2019-go roku i bezpośrednio związanej z tematem pracy doktorskiej, nie znalazłem w bibliografii). Cała praca zawiera 117 stron tekstu, w tym 64 rysunki.

Praca doktorska wykonana została w Centrum Mikroelektroniki i Nanotechnologii Uniwersytetu Rzeszowskiego pod kierunkiem profesora Jerzego Wróbla. Mogę stwierdzić, że jest ona napisana bardzo dobrze, czyta się ją łatwo ze stałym zainteresowaniem. Widać również, że Pani Bobko doskonale orientuje się w literaturze na temat zjawisk kwantowych w materiałach półprzewodnikowych, zna aktualny stan wiedzy na ten temat, rozumie fizykę zjawisk transportowych w strukturach kwantowych i podstawowe właściwości półprzewodników półmagnetycznych. Trzeba podkreślić, że, jak wynika to z cytowanych prac, informacja na temat zjawisk kwantowych w materiałach magnetycznych, powiązany z tematem pracy, została opublikowana w

ostatnich latach w takich wiodących czasopismach jak Nature, Nature Materials, Phys. Rev. Letters i inne. Fakt ten potwierdza, że temat pracy przyciąga obecnie dużą uwagę i zainteresowanie fizyków. O ile wiem, najważniejsze wyniki pracy zostały opublikowane w dwóch wysokopunktowanych czasopismach. Niestety, nie znalazłem w samej pracy informacji o uczestnictwie doktorantki w konferencjach naukowych na temat transportu kwantowego, których w ostatnich latach było dość sporo.

Wstęp do pracy (oznaczony jak rozdział 1) zawiera krótki opis kwantyzacji stanów elektrónowych w nanostrukturach półprzewodnikowych oraz opis wpływu domieszek magnetycznych Mn na właściwości półprzewodników II-VI, czyli półprzewodników półmagnetycznych. W pierwszym rozdziale został sformułowany cel pracy i przedstawiono krótki opis wyników pracy: wytworzenie struktur różnej geometrii, w tym także typu T i H (trój-zondowa i sześć-zondowa próbka), zaobserwowano zjawisko ogniskowania magnetycznego, oscylacje Shubnikova-de Haasa, rozszczepienie spinowe w strukturach nanoskopowych, rezonanse przewodnictwa w silnych polach magnetycznych, przejście do stanu kwantowego hallowskiego ferromagnetyka i indukowanie przecinania kanałów przewodnictwa na krawędziach próbki. Zauważmy, że do przedstawienia głównych wyników Pani Bobko wraca jeszcze raz na samym końcu pracy (rozdział 8: Podsumowanie).

W rozdziale 2 pierwszej części podane zostały najważniejsze definicje i podstawowe pojęcia dla opisu transportu kwantowego w strukturach niskowymiarowych: droga swobodna i droga koherencji nośników, kwantyzacja stanów w cienkich warstwach i drutach kwantowych, kanały kwantowe przewodnictwa, transport balistyczny, metoda i wzór Landauera-Büttikera dla obliczenia przewodnictwa w transporcie kwantowym.

Rozdział 3 zawiera opis kwantowego zjawiska Halla. Trzeba zaznaczyć, że podany opis jest bardzo uproszczony ponieważ nie uwzględnia wpływ domieszek i dlatego wcale nie wyjaśnia istnienia plato w zależności oporu Halla od pola magnetycznego. Natomiast w części tej zostały dobrze przedstawione stany krawędziowe oraz związek tych stanów z obserwowanym oporem Halla. Opisano także wpływ oddziaływania elektron-elektron, zasady elektrostatyki prądów krawędziowych oraz wymienne wzmocnienie rozszczepienia spinowego w półprzewodnikach. Najważniejszym jest rozdział 3.3 tej części, w którym przedstawiono rekonstrukcję prądów krawędziowych w wyniku oddziaływania kulombowskiego i rozszczepienia Zeemana.

W drugiej części zatytułowanej «Litografia i próbki» opisana została metoda litografii elektrónowej i przedstawiono sprzęt wykorzystany do kontrolowania procesu (skaningowy mikroskop elektrónowy). Dokładnie określono poszczególne etapy przygotowania próbek i wytwarzanie struktur kwantowych CdMnTe, takich jak studni i druty kwantowe. Zostały przedstawione zdjęcia z mikroskopu optycznego i topografia powierzchni wykonana za pomocą mikroskopu sił atomowych (AFM), które świadczą o dobrej jakości przygotowanych próbek i struktur. Opisano także proces przygotowania kontaktów omowych z wykorzystaniem nowej metody napylenia tellurku rtęci, który pozwala na niską rezystywność kontaktu w temperaturze 4.2K. Moim zdaniem wyniki badań właściwości kontaktów z wykorzystaniem HgTe zasługują na oddzielną publikację.

W **rozdziale 5** opisana została geometria, podstawowe parametry i właściwości elektryczne struktur nanoskopowych typu T i H. Na tych strukturach można obserwować kwantyzację przewodnictwa w polu magnetycznym w niskich temperaturach, rozszczepienie spinowe oraz zjawisko ogniskowania magnetycznego. Na przykład, na rys. 5.2 są przedstawione zależności oporu hallowskiego od pola magnetycznego, na których dobrze widać kwantyzację oporu Halla. Pokazano również charakterystyki prądowo-napięciowe dla kontaktów w strukturach T i H, przewodność w funkcji pola magnetycznego – na tych wykresach są oscylacje Shubnikova-de Haasa i modulację amplitudy oscylacji. Prócz zależności przewodnictwa od pola magnetycznego przedstawiono także zależności od napięcia źródło-dren dla różnych wartości pola magnetycznego. Pokazane w tym rozdziale wyniki zostały przedstawione jak przykładowe i chyba dlatego nie były dokładnie przeanalizowane, chociaż zostało zaznaczone, że najważniejsze wyniki będą przeanalizowane w trzeciej części pracy, natomiast w tym rozdziale (5-tym) uwagę przede wszystkim zwrócono na jakość wytworzonych struktur różnych typów i na możliwości ich wykorzystania dla badania zjawisk transportu kwantowego.

W **trzeciej części** przedstawiono główne wyniki pomiarów. Rozdział 6 zawiera opis układu kriogenicznego i metody pomiarowej. Najważniejszym z całej pracy jest rozdział 7, w którym przedstawiono zależności przewodnictwa od pola magnetycznego i od napięcia źródło-dren, które potwierdzają istnienie stanu kwantowego ferromagnetyka Halla na krawędzi próbki, przejścia fazowego z tego stanu do stanu magnetycznie niespolaryzowanego i związaną z tym rekonstrukcją prądów krawędziowych oraz możliwość manipulowania prądami krawędziowymi. Jak widać, na przykład, z rys. 7.9, na którym pokazano nałożenie krzywych zależności przewodnictwa od pola na krzywe zależności od pola energii stanów kwantowych o różnych orientacjach spinów i położenia poziomu Fermiego. To potwierdza, że stan kwantowego ferromagnetyka Halla tworzy się przy przecinaniu poziomów energii i poziomu Fermiego w tym samym punkcie, co ma miejsce dla pewnej wartości pola magnetycznego 1,5 T. Trzeba zaznaczyć, że wyniki całego rozdziału 7 są bardzo ciekawe i ważne dla rozwinięcia fizyki kwantowego efektu Halla.

W podsumowaniu całej pracy (rozdział 8) zaznaczono, że postawione cele pracy doktorskiej są zrealizowane. Natomiast głównym wynikiem jest to, że zaobserwowano przejście do stanu kwantowego ferromagnetyka Halla na krawędzi i związana z tym rekonstrukcja prądów krawędziowych.

Cała praca doktorska sprawiła na mnie bardzo dobre wrażenie, ponieważ jest logicznie skoncentrowana na rozwiązaniu pewnych dobrze sformułowanych i, trzeba to zaznaczyć, bardzo trudnych zadań. Praca jest dobrze napisana, a przedstawione wyniki są bardzo dobrze zaprezentowane i opisane, dlatego nie mam żadnych wątpliwości co do ich wiarygodności.

Moje uwagi krytyczne dotyczą przede wszystkim:

(1) braku opisu mechanizmów fizycznych, związanych ze wzmocnieniem współczynnika Landego w półprzewodnikach półmagnetycznych oraz (uważam, że jest to ważniejsze)

brak opisu fizyki stanu ferromagnetycznego w kwantowym efekcie Halla. Niestety na ten temat praktycznie niczego w pracy nie znalazłem prócz cytowania niektórych prac. Moim zdaniem, trzeba było to przedstawić w drugiej części pracy.

(2) Byłoby dobrze podać więcej szczegółów, w jaki sposób zostały wykonane obliczenia energii poziomów Landaua oraz energii Fermiego w funkcji pola magnetycznego na rys.7.2?

(3) Są w pracy drobne mankamenty. Na przykład, na niektórych stronach (s.61,84,85,88) brakuje jakiegoś numeru rozdziału (na str. 84 napisano «...zostały szczegółowo opisane w rozdziale ??»).

W rozdziale 7.3 na samym początku napisano «...szersze druty kwantowe (1) i (8) zostały użyte...». Nie znalazłem gdzie były podane oznaczenia dla drutów kwantowych (1) i (8)? Może chodziło o kontakty (1) i (8) na rys.7.3?

W bibliografii cytowanie [13] pracy prof. R. Gałązki i T. Wojtowicza podano nieprawdłowo: książka, w której znajduje się cytowana praca, ma tytuł «CdTe and related compounds; Physics, Defects, Hetero- and Nano-structures, crystal Growth, Surfaces and Applications, edited by R. Triboulet and P. Siffert, EMRS Series, 2010»

Konkluzja

Reasumując, pragnę stanowczo stwierdzić, iż wymienione powyżej z obowiązku recenzenta mankamenty rozprawy Pani mgr inż Ewy Bobko nie wpływają na moją bardzo wysoką ocenę tej pracy. Rozprawa napisana jest w swojej zasadniczej części jasno i zrozumiale.

Szczegółowe zapoznanie się z treścią rozprawy oraz pokaźny dorobek naukowy Pani magistr inżynier utwierdziły mnie w przekonaniu o jej wysokich kwalifikacjach. Praca doktorska Pani mgr inż. Ewy Bobko, wykonana pod opieką naukową promotora - Pana Profesora Jerzego Wróbla - jest oryginalnym rozwiązaniem kilku zagadnień naukowych, stanowiących **istotny wkład** do obszaru wiedzy, który można określić jako **eksperymentalne potwierdzenie lokalnego stanu kwantowego ferromagnetyka Halla i rekonstrukcja spinowo-spolaryzowanych prądów krawędziowych w nanostrukturach półprzewodnikowych**. Pokazuje ona także jej ogólną wiedzę w dziedzinie nowoczesnej fizyki ciała stałego i fizyki kwantowego efektu Halla. Rozprawa charakteryzuje się indywidualnym wkładem Autora do rozwiązania omówionych wyżej zagadnień, a zatem spełnia wszystkie wymagania Ustawy o Stopniach i Tytułach Naukowych. Niniejszym wnoszę o dopuszczenie Pani **mgr inż. Ewy Bobko do dalszych kroków przewodu doktorskiego**.

