

Warszawa, 11 listopada 2020

dr hab. Marta Borysiewicz
Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski
ul. Pasteura 5
02-093 Warszawa

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Ewy Bobko zatytułowanej " Wytwarzanie i transport w kwantowych niskowymiarowych nanostrukturach półprzewodnikowych z materiałów II-VI"

Przedstawiona do recenzji praca mgr E. Bobko jest pracą eksperymentalną, poświęconą otrzymywaniu i badaniom własności fizycznych struktur zawierających gaz elektronowy w studni CdMnTe. Praca napisana jest w języku polskim. Zawiera 8 rozdziałów, pogrupowanych na III działy i wraz z odnośnikami liczy 117 stron. Praca wpisuje się w nurt badań dotyczący właściwości transportowych struktur półprzewodnikowych II-VI o rekordowych ruchliwościach, z przewodnictwem o charakterze balistycznym.

Działaniom mgr inż. Ewy Bobko przyświecały dwa podstawowe cele. Pierwszym było zbadanie wpływu efektów korelacyjnych na transport ładunku i spinu w dwuwymiarowych strukturach kwazibalistycznych oraz w jednowymiarowych prądach krawędziowych. Drugim - było opracowanie metod wytwarzania nanostruktur półprzewodnikowych z materiałów II-VI oraz taka optymalizacja procesu litografii elektronowej, aby zachować wysoką ruchliwość gazu elektronowego w próbkach.

W recenzji omówię po kolei rozdziały i uwagi do nich, które zakończę podsumowaniem.

Pierwszy rozdział, to krótki, 4-stronicowy wstęp, w którym opisane jest tło badań, wprowadzone nanostruktury półprzewodnikowe oraz półprzewodniki pólmagnetyczne. Przedstawiony jest cel oraz wyniki pracy. Cześć ta obfituje w nieprecyzyjne, bądź żargonowe sformułowania, np. "napięcie źródło-dren staje się porównywalne do energii Fermiego", „obróbka polegająca na trawieniu”, „wysokie parametry 2 DEG” (zamiast słowa ruchliwość).

Dwa kolejne rozdziały: drugi "Transport kwantowy" i trzeci "Kwantowy efekt Halla" stanowią dział I pracy pt. "zjawiska transportu". Taki podział nie jest najszczęśliwszy, wszak kwantowy efekt Halla jest zjawiskiem transportu kwantowego, więc raczej powinien być podrozdziałem rozdziału "Transport kwantowy" niż osobnym rozdziałem. Rozdział drugi zaczyna się od zwięzłego omówienia transportu klasycznego (tu znów, można by dyskutować nad układem). W klasycznym transporcie pomyłona jest dyfuzja z unoszeniem ładunku w polu elektrycznym. Ponadto, nie rozróżniono czasu kwantowego - charakterystycznego dla wszelkich rozpraszania nośników oraz czasu transportowego, odpowiadającego tylko za rozproszenia wysokokątowe, z którym związana jest ruchliwość. Następnie Autorka wprowadza

pojęcie transportu balistycznego. Dość niefortunnie pomyłone zostały warunki definiujące transport dyfuzyjny i balistyczny (ten drugi zachodzi dla średniej odległości między zderzeniami elastycznymi większej niż typowe rozmiary próbki, czyli $l_e > W, L$ - przeciwnie niż zostało to opisane w tekście). Następnie opisany jest transport w strukturach balistycznych dwusondowych, zjawisko kwantyzacji przewodnictwa oraz opis transportu z udziałem wielu kanałów przewodnictwa. Zdefiniowano kwant przewodnictwa G_0 , jak $2e^2/h$, który jest dalej używany w różnych miejscach pracy. Mam wątpliwość, czy faktycznie wprowadzona definicja G_0 jest wygodna do przedstawionych tu rozważań, wszak dwójka odpowiada za degenerację spinową, a dla elektronów w studni CdMnTe owa degeneracja jest zniesiona. Z kolei, w części z opisem prądu, we wzorach tej dwójki nie ma, co jest niekonsekwencją. Dwójka jest też przyczyną błędu na rys.2.4, który co prawda pochodzi z ref. 32, ale ma nieoryginalne osie. Wielkość przewodnictwa na osi pionowej powinna być wyrażona w e^2/h (bez czynnika 2).

W rozdziale 3 został omówiony kwantowy efekt Halla. Zjawisko zostaje klarownie wyjaśnione przy pomocy opisu prądów krawędziowych Landauera-Büttikera. Następnie Autorka opisuje oddziaływanie elektron-elektron w gazie elektronowym, które prowadzi do wymiennego wzmocnienia rozszczepienia spinowego. W podrozdziale poświęconym oddziaływaniu elektron-elektron znajduje się też opis elektrostatycznej redystrybucji prądów krawędziowych prowadzącej do powstania obszarów ściślej i nieściślej cieczy elektronowej. Zjawisko to nie jest związane z oddziaływaniem elektron-elektron i takie zakwalifikowanie go jest błędem. Ostatnia część rozdziału poświęcona jest opisowi zjawiska "rekonstrukcji prądów krawędziowych", kiedy zostaje zniesiona przypadkowa degeneracja energetyczna stanów o przeciwnych spinach i pojawia się przestrzenna separacja stanów krawędziowych.

Kolejne dwa rozdziały "Wytwarzanie nanostruktur Cd(Mn)Te" i "Struktury typu T i H" stanowią część działu II, zatytułowanego "Litografia i próbki". W pierwszej części Autorka wprowadza technikę litografii elektronowej, omawia pojęcie dawki i przebieg procesu, technikę przygotowania próbek oraz modelowanie dawek. Następnie omówione są procedury dedykowane CdMnTe i optymalizacja zaproponowana w tej pracy: 1) zastąpienie górnej metalicznej bramki bramką boczną z gazu 2DEG, 2) zastosowanie tej samej maski do trawienia półprzewodnika co do napyłania metalu. Na tym etapie można by wskazać, jak te pomysły się zweryfikowały - w szczególności ciekawa jestem skuteczności bramkowania. Ta część pracy jest w moim odczuciu chaotyczna: jest w niej wiele dygresji - owszem, ciekawych - ale które ostatecznie zaciemniają przebieg procedur technologicznych. Pojawiają się też sformułowania żargonowe "metalizacja (napyłanie) metodą lift-off", czy "siła potencjału", które w rozprawie doktorskiej nie powinny się pojawiać. Ponadto, w części dotyczącej rozdzielczości elektronolitografii warto byłoby wspomnieć o roli elektronów wtórnych (ang. proximity effects), których zasięg potrafi wielokrotnie przewyższać szerokość samej wiązki elektronów. Czy te efekty udało się jakimiś sposobami ograniczyć? Inne uwagi szczegółowe to: obrazek na rys.4.5 a) jest nieczytelny, podpis do rys. 4.6 jest nieprawdziwy.

Druga część działu II dotyczy struktur typu T i H. Przedstawione wyniki dotyczą dwóch najlepszych z wielu wykonanych struktur, jednej typu H (czyli w formie tzw. hallbara) i jednej typu T, z bramką boczną, z podłoża 090914A. Narysowane są schematy dwóch heterostruktur, jednakże wydaje się że ta przedstawiona na rys.5.1.b (nr 121812A) w ogóle nie była wykorzystywana w tej pracy! Poza opisem geometrii próbki umieszczono tu wyniki eksperymentalne dotyczące badanych waferów. Nie jest dla mnie

jasne, jaki jest udział Doktorantki w otrzymaniu przedstawionych wyników – uznałabym, że to część opisu próbki podarowana przez twórcę próbki, gdyby nie fakt, że ogniskowanie magnetyczne zostało wcześniej wymienione jako jedno z osiągnięć tej pracy doktorskiej. Jeśli to są pomiary wykonane przez mgr inż. Ewę Bobko, to brakuje tu informacji o układzie pomiarowym. W dalszej części pokazano dla struktur typu T zależność przewodnictwa od napięcia źródło-dren dla różnych pól magnetycznych oraz ogniskowanie magnetyczne: istnienie naprzemiennych minimów i maksimów w zależności przewodnictwa od pola, związanych z dopasowaniem promienia cyklotronowego do rozmiaru próbki. Jest to wynik interesujący i przydałoby się rozwinięcie tego tematu. Tymczasem brakuje nawet kilku zdań informacji, na czym polega ogniskowanie magnetyczne – pojawia się jedynie odniesienie do podręcznika. Dalsza część rozdziału poświęcona jest strukturom typu H. Pokazano geometrię próbki, wyniki wstępnej charakteryzacji (dwusondową charakterystykę kontaktów oraz niskopolewe wyniki pomiarów zjawiska Halla). Próbka ta, poza geometrią, różni się od poprzedniej sposobem wykonania kontaktów: zastosowano tu HgTe, który po wygrzaniu tworzy „siatkę mikro-kontaktów typu Corbino”. Ta nazwa pojawia się wielokrotnie, w szczególności w rozdziale 7, ale niestety ani tu ani nigdzie dalej specyfika tych kontaktów nie została wyjaśniona. Jest to szczególnie potrzebne, bo w dziedzinie znane jest pojęcie konfiguracji Corbino w odniesieniu do metody pomiaru magnetooporu. Pokazano tu również przeprowadzone w bardzo niskich, milikelwinowych temperaturach pomiary oscylacji Shubnikova-de-Haasa (SdH). Autorka opisuje ten efekt, zaznaczając cechy charakterystyczne dla CdMnTe, jakimi są dudnienia, związane z gigantycznym rozszczepieniem Zeemana. Oryginalnym wynikiem jest pokazanie, iż wzór dudnień ulega zmianie gdy zmienia się okno przewodnictwa (zmiana napięcia na kontaktach prądowych). Zastanawia mnie, dlaczego wątek ten nie został potraktowany szerzej i dlaczego nie pokazano wyników (o ile są) dla większej liczby napięć, nawet jeśli ich opis byłby na aktualnym etapie niekompletny. Również nie wiem, w jakim celu pisze się o rezultatach przeprowadzonej analizy fourierowskiej, bez przywoływania jej wyników. Jeśli to istotny element, należy to pokazać, jeśli nie istotny, trzeba go pominąć. Jeśli chodzi o uwagi szczegółowe to w sposób mylący podane są warunki potrzebne do obserwacji efektu SdH (str.70): w jednym zdaniu mamy przekaz: potrzebne jest coś, a w kolejnym: ponadto potrzebne jest to samo coś. Nie jest dla mnie jasny sens zdania „.. wraz ze powiększeniem się okna przewodnictwa, w badanym obszarze próbki mamy do czynienia z dwoma kwazi-poziomami Fermiego dla elektronów poruszających się w przeciwnych kierunkach”.

Część III pracy, pt. „Wyniki pomiarów” składa się z dwóch rozdziałów: 6: „Metody pomiarowe” oraz 7: „Przecinanie się prądów krawędziowych” (to dość nietypowy pomysł, aby metody pomiarowe opisywać de facto w trakcie przedstawiania wyników eksperymentalnych). W rozdziale 6 przedstawiono używane układy doświadczalne, Heliox z ^3He w obiegu zamkniętym oraz chłodziarkę rozcieńczalnikową $^3\text{He}/^4\text{He}$ Triton, udostępnione w Środowiskowym Laboratorium Badań Kriogenicznych i Spintronicznych, Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk. Przedstawione schematy zaczerpnięte z podręcznika Thomasa Heinzela przedstawiają, jak Autorka przyznaje, nieco inne układy niż były używane (w którym próbka umieszczona jest w cieczy kriogenicznej, a nie na tzw. zimnym palcu.). Nie wiem, co stało na przeszkodzie, aby pokazać właściwe schematy, uważam to za niedociągnięcie. Następnie przedstawiono metody pomiarowe w dziedzinie zmiennoprądowej: ze stałą amplitudą prądu oraz ze stałą amplitudą napięcia – stosowaną w przeprowadzonych badaniach. Przedstawiony schemat pomiarowy niestety zawiera błędy: wzmacniacz operacyjny z zerowym oporem w pętli sprzężenia zwrotnego z szeregowo podłączonym

nanoamperomierzem nie zmierzy prądu. Przypadłoby się też zaznaczyć na schemacie sygnał referencyjny.

Rozdział 7 zawiera opis efektów korelacyjnych w CdMnTe, konfigurację pomiarową oraz wyniki eksperymentalne. Pokazano tu wyznaczone spektrum energetyczne dla elektronów w studni CdMnTe, w modelu samouzgodnionym z uwzględnieniem wzmocnienia g^* -czynnika na skutek oddziaływania – stanowiące podstawę interpretacji wyników. Następnie przywołano konfigurację pomiarową (z błędem, konsekwentnie) i przedstawiono wyniki pomiaru rezystancji hallowskiej w zależności od pola magnetycznego. Przedstawiony opis tego wyniku, w szczególności dyskusja zachowania fazy, jest dla mnie niezrozumiała. Brakuje mi uzasadnienia wzoru (7.2), który sugeruje że sam pomiar fazy przy znajomości pojemności kabli, pozwala wyznaczyć opór hallowski, zatem koncentrację nośników. W dalszej części rozdziału Doktorantka przedstawia wyniki przewodnictwa w otrzymane w konfiguracji lokalnej. Zaobserwowano tu dwa interesujące efekty: 1) pojawienie się ostrych maksimów „rezonansów” przewodnictwa dla pewnych wartości pola magnetycznego 2) pojawienie się obszarów zerowego przewodnictwa, mimo niezerowego prądu, nazwanych „antyrezonansami”. Maksimum występuje dla pola magnetycznego, dla którego, zgodnie z obliczeniami poziomy Landaua o przeciwnych spinach są zdegenerowane. Jest to warunek konieczny do wystąpienia rekonstrukcji stanów krawędziowych. Ciekawym wynikiem eksperymentalnym jest pokazanie, że położenie pików zmienia się, gdy przyłożone jest stałe napięcie do próbki. Pokazano również, że w zależności przewodnictwa od polaryzacji występuje histereza, czego należy się spodziewać w przypadku rekonstrukcji prądów krawędziowych. O ile wyniki są bardzo ładne, o tyle ich opis jest chaotyczny i momentami nieprecyzyjny. Brakuje klarownej dyskusji poświęconej sprzęganiu się różnego rodzaju kontaktów (mikro i makroskopowych – pojęcia niezdefiniowane) z kanałami w próbce. W dyskusji przesunięć fazowych brakuje mi analizy roli pojemności kwantowych i ich wpływu na fazę. Pojawiają się też zdania, które wzbudzają konfuzję „pik przewodności zmierzony w $T=0.1$ K jest wyższy niż w niższych temperaturach, być może dlatego, że wzrasta jego szerokość” – str. 94, albo „... prądy krawędziowe są wyprowadzone ze stanu równowagi chemicznej” – str. 94. Ponownie pojawia się nawiązanie do wyniku niepokazanego w treści doktoratu, moim zdaniem to błąd. Należy podjąć decyzję, czy wynik wnosi coś istotnego do wyводу, jeśli tak, to należy go pokazać, jeśli nie, a jest ciekawostką - można go przedstawić ale np. w dodatku. Dodatkowo, interpretacja przecinania się prądów krawędziowych bazuje na różnicach w szerokości kanałów prądowych i napięciowych, o czym nie ma ani słowa ani w części dotyczącej próbek, ani czego nie widać na obrazkach. Odnoszę wrażenie, że w pracy mylone są hipotezy badawcze z faktami: zaproponowany opis ma szereg założeń i trudno tu być absolutnie pewnym, iż nie ma innego wyjaśnienia dla zaprezentowanych obserwacji. Niedociągnięciem ostatniej części pracy są odnośniki, gdzie czytelnik jest odnoszony do znaków zapytania, jak również pomyłki rzeczowe, np. prace 100 i 101 nie pokazują zapowiedzianych antyrezonansów przewodnictwa. Drobiazgiem, którego nie rozumiem, jest brak w referencjach autocytowania publikacji, której pierwszym autorem jest Doktorantka "Conductance resonances and crossing of the edge channels in the quantum Hall ferromagnetic state of Cd(Mn)Te microstructures", która zawiera znaczną część rozdziału 7.

Podsumowując, należy podkreślić, że praca obejmuje bardzo duży zakres materiału, od technologii od zjawisk kwantowych transportu krawędziowego i każdy z tych elementów mógłby być tematem osobnej pracy doktorskiej. Autorka zaproponowała optymalizację procesu litografii elektronowej dla struktur II-VI. Przeprowadziła pomiary na wykonanych przez siebie próbkach, w wyniku których zaobserwowano:

1) zjawisko ogniskowania magnetycznego, 2) możliwość sterowania rozszczepieniem spinowym przy pomocy stałego napięcia, 3) rekonstrukcję i przecinanie się prądów krawędziowych. Zatem cel pracy został osiągnięty. Niestety, praca ta ma dużo usterek. Jej struktura jest nieprzemyślana, co powoduje chaos i utrudnia lekturę. Niektóre fragmenty są napisane mało precyzyjnie, niektóre językiem żargonowym, a inne wręcz są merytorycznie niepoprawne. Szkoda, że kilka lat wcale niełatwej pracy eksperymentalnej zwieńczone jest pisemną pracą, która jest tak niedopracowana. Wiele z tych niedociągnięć można łatwo wyłapać podczas krytycznej lektury pracy, której najwyraźniej nie było.

Uchybieniem formalnym jest brak podpisu Autorki pod oświadczeniem autora.

Mimo tych licznych zastrzeżeń, stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Ewy Bobko spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim poprzez odnośne przepisy i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Marko Bonyniewicz