



UNIwersYTET
IM. ADAMA MICKIEWICZA
W POZNANIU

WYDZIAŁ FIZYKI
ZAKŁAD FIZYKI MEZOSKOPOWEJ

ul. Uniwersytetu Poznańskiego 2
61-614 Poznań

prof. dr hab. Ireneusz Weymann

www: weymann.home.amu.edu.pl
email: weymann@amu.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Bartłomieja Rzeszotarskiego zatytułowanej „Transport ładunku i spinu w nanoukładach na bazie silicenu”

Przedłożona rozprawa doktorska została przygotowana na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie pod opieką promotorów: prof. dr hab. inż. Bartłomieja Szafrana i prof. dr hab. inż. Andrzeja Koleżyńskiego oraz promotora pomocniczego: dr inż. Aliny Mreńcy-Kolasińskiej. Rozprawa jest oparta o monotematyczny cykl czterech publikacji zatytułowany „Transport ładunku i spinu w nanoukładach na bazie silicenu”. Głównym celem dysertacji było kompleksowe zbadanie charakterystyk transportowych dwuwymiarowych kryształów zbudowanych z atomów krzemu uporządkowanych w strukturze plastra miodu – silicenu. Własności fizyczne układów dwuwymiarowych, zwłaszcza grafenopodobnych, czyli takich jak silicenu, są przedmiotem intensywnych badań naukowych w czołowych ośrodkach badawczych na świecie nie tylko ze względu na fascynującą fizykę, ale także na potencjalne zastosowania w nanoelektronice i spintronice. Pod tym względem silicenu wydaje się dość obiecującym materiałem, ponieważ w przeciwieństwie do grafenu charakteryzuje się istotnym oddziaływaniem spinowo-orbitalnym o charakterze Rashby oraz Kane-Mele związanym z odchyleniem pomiędzy dwoma podsieciami tworzącymi kryształ. W dysertacji przeprowadzono numeryczne obliczenia własności transportowych silicenu oraz nano-wstęg silicenu w różnych konfiguracjach, skupiając się w szczególności na analizie wpływu oddziaływań spinowo-orbitalnych oraz zewnętrznych pól magnetycznych i elektrycznych na transport. Rozprawa doktorska zawiera wiele cennych wyników i przewidywań dotyczących własności fizycznych nanostruktur opartych na silicenu, a także kilka koncepcji realnych układów, które mogą być istotne dla inżynierii kwantowej oraz spintroniki.

Od strony formalnej dysertacja składa się z dwóch zasadniczych części: wprowadzenia do problematyki rozprawy oraz monotematycznego cyklu składającego się z czterech publikacji. W ramach wprowadzenia przedstawiono motywację oraz cel pracy, a następnie omówiono podstawowe własności silicenu, opisano hamiltonian, a także zjawiska fizyczne istotne z punktu widzenia rozprawy. W dalszej części omówiono własności silicenu na podłożu InSe, a także przedstawiono istotne parametry badanych struktur uzyskane w ramach obliczeń z pierwszych zasad. Kolejny rozdział zawiera krótkie streszczenia artykułów będących podstawą dysertacji. Wprowadzenie jest zakończone podsumowaniem i wnioskami, natomiast na końcu zamieszczono spis literatury oraz wykaz publikacji, a także spis konferencji naukowych, w których Doktorant brał czynny udział. Po ponad trzydziestostronicowym wprowadzeniu zamieszczono główną część rozprawy doktorskiej – cykl czterech publikacji naukowych przedstawiających oryginalne wyniki uzyskane przez Doktoranta. Warto podkreślić, że wszystkie publikacje ukazały się w *Physical Review B* – czasopiśmie, które należy do

wiodących czasopism fizycznych o zasięgu międzynarodowym. W trzech artykułach Doktorant jest pierwszym autorem, natomiast w jednej pracy mgr Rzeszotarski jest drugim autorem. Ponadto, jako dodatek załączono kolejną publikację, która znajduje się w bazie preprintów. Natomiast na końcu dysertacji zamieszczono odpowiednie oświadczenia współautorów dotyczące ich wkładu w powstanie publikacji wchodzących w skład dysertacji. Wynika z nich, że wkład Doktoranta w powstanie cyklu prac stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej jest wiodący.

Badania własności transportowych silicenu przeprowadzono stosując hamiltonian ciasnego wiązania w obszarze transportu balistycznego. Najpierw Doktorant przeprowadził obliczenia struktury pasmowej silicenu na warstwie selenku indu, co pozwoliło uzyskać realistyczne wartości parametrów oddziaływań spinowo-orbitalnych, wykorzystanych następnie w efektywnym hamiltonianie typu ciasnego wiązania. W dalszym kroku wyznaczono odpowiednie współczynniki odbicia i transmisji, które pozwoliły na wyliczenie przewodności układu w oparciu o formułę Landauera, bądź też stosując formalizm Landauera-Büttikera dla układu czteroterminalowego (praca [A4]).

Przejdę teraz do bardziej szczegółowego omówienia najważniejszych wyników przedstawionych w publikacjach stanowiących dysertację. Praca pierwsza [A1], *Electron spin inversion in gated silicene nanoribbons*, B. Rzeszotarski, B. Szafran, Phys. Rev. B **98**, 075417 (2018), dotyczy badania własności transportowych nano-wstęg silicenowych pod kątem możliwości inwersji spinu elektronów poprzez odpowiednio przyłożone pole elektryczne. W tym celu Autorzy rozważyli pasek silicenu w geometrii tranzystora (dołączone elektrody źródła i drenu), w którym potencjał bramkujący generuje oddziaływanie spinowo-orbitalne typu Rashby. Takie oddziaływanie może prowadzić do precesji spinu wokół osi prostopadłej do warstwy silicenu, w zależności od typu brzegów nano-wstęg. W przypadku wstęg o charakterze zygzakowatym (ang. *zigzag*), precesja spinu jest zablokowana poprzez wewnętrzne oddziaływanie spin-orbita silicenu. Z kolei dla wstęg o krawędziach krzeselkowych (ang. *armchair*) precesja spinowa występuje, jednak inwersja spinu zachodzi na odległościach rzędu mikrometrów, ze względu na stosunkowo słabe oddziaływanie Rashby w silicenie. To sprawia, że układ taki nie jest zbyt atrakcyjny, jeżeli chodzi o potencjalne zastosowania. Natomiast Autorzy pokazali, że odpowiednio bramkowane nano-wstęgi silicenu o krawędziach typu krzeselkowego charakteryzują się zdolnością obrotu spinu na długości rzędu kilku nanometrów, jeżeli spin wstrzykniętych elektronów jest spolaryzowany w płaszczyźnie wstęgi wzdłuż osi x . Zaproponowane urządzenie może zatem działać jak tranzystor spinowy, scharakteryzowany nanometryczną długością inwersji spinu. Jest to ciekawe rozszerzenie zaproponowanej w 1990 roku koncepcji tranzystora spinowego Datta-Dasa [Supriyo Datta, Biswajit Das, Appl. Phys. Lett. **56**, 665 (1990)], na nanostruktury oparte o dwuwymiarowe kryształy z oddziaływaniem spinowo-orbitalnym. Za ciekawą uważam również eksperymentalną propozycję detekcji obrotu spinu poprzez wykorzystanie izolatorów ferromagnetycznych. Warto zauważyć, że układy w geometrii tranzystora z ferromagnetycznymi elementami są intensywnie badane w ramach spintroniki. W takich urządzeniach prąd płynący przez układ silnie zależy od wzajemnego ustawienia magnetyzacji ferromagnetyków. W tym kontekście, moim zdaniem ciekawym rozszerzeniem byłoby zbadanie wpływu orientacji magnetyzacji ferromagnetyków na zależny od spinu prąd płynący przez badany układ. Być może obecność magnetyków byłaby przydatna nie tylko do detekcji obrotu spinu, ale także do efektywnej kontroli własności transportowych badanego układu, co rozszerzyłoby spintroniczne możliwości aplikacyjne analizowanego układu.

W drugiej publikacji [A2], zatytułowanej *Electron interferometry and quantum spin Hall phase in silicene* [B. Rzeszotarski, A. Mreńca-Kolasińska, B. Szafran, Phys. Rev. B **99**, 165426 (2019)], przedstawiono układ umożliwiający detekcję stanów topologicznych oraz stanów trywialnych w silicenie wykorzystując zjawisko interferencji kwantowej dla układu o geometrii interferometru Younga oraz ringu Aharonova-Bohma. W tym celu przebadano własności transportowe pofałdowanego silicenu, dla którego może zachodzić zjawisko kwantowego spinowego efektu Halla (QSHE). Rozpatrzono w szczególności nano-wstęgę silicenu o brzegach zygzakowatych i szerokości 6.5 nm, która następnie rozszczepia się tworząc dwa ramiona bądź interferometru Younga, bądź też ringu Aharonova-Bohma. Autorzy wykazali, że w obszarze kwantowego spinowego efektu Halla, który pojawia się dla $E_F \in (-3,3)$ meV, kiedy występuje separacja prądów spinowych, nie zachodzi interferencja kwantowa i przewodność wykazuje ostre piki rezonansowe. Natomiast w przypadku, gdy układ nie znajduje się w reżimie QSHE, interferencja kwantowa prowadzi do typowych oscylacji Aharonova-Bohma, o okresie równym około 4 T, widocznych w przewodności układu w funkcji pola magnetycznego. Ponadto, pokazano, że interferencja kwantowa może zostać zablokowana poprzez odpowiednie bramkowanie jednego z ramion interferometru. Praca [A2] przedstawia zatem propozycję układu, w którym wykorzystano zjawisko interferencji pomiędzy dwoma ścieżkami transportu elektronowego do detekcji stanów topologicznie chronionych związanych z QSHE. Podczas obrony chciałbym, aby Doktorant wyjaśnił mechanizm powstawania różnicy w fazie dla prądów w różnych kanałach spinowych w funkcji pola magnetycznego. Czy można to przesunięcie kontrolować? Z danych przedstawionych na Rys. 2(a), wynika, że wraz z polem magnetycznym zmienia się znak polaryzacji spinowej płynącego prądu, ponadto polaryzacja może przyjmować maksymalne wartości, co może być ciekawe z aplikacyjnego punktu widzenia dla elektroniki spinowej.

Trzeci artykuł [A3], *Topologically protected wave packets and quantum rings in silicene*, B. Szafran, B. Rzeszotarski, A. Mreńca-Kolasińska, Phys. Rev. B **100**, 085306 (2019), dotyczy badania dynamiki pakietów falowych w pofałdowanym silicenie o kształcie prostokąta scharakteryzowanego zygzakowatymi i krzeselkowymi brzegami, umieszczonym pomiędzy bramkami generującymi niejednorodne prostopadłe pole elektryczne łamiące symetrię pomiędzy podsieciami silicenu. Dla płątka silicenu o kształcie kwadratu pokazano, że pakiet porusza się ze stałą prędkością, a układ nie wykazuje efektu *Zitterbewegung*. Analizowano także dynamikę dla pierścienia zdefiniowanego przez chiralne stany, które formują się, gdy potencjały o przeciwnych znakach na podsieciach silicenu zerują się (Rys. 4). Uzyskano szereg ciekawych wyników, jeżeli chodzi o dynamikę krótkich i długich pakietów falowych, a także wpływu mieszania międzypolinowego oraz obecności domieszek na badaną dynamikę. Ponieważ, jak wynika z oświadczeń współautorów, wyniki dotyczące dynamiki zostały uzyskane przez promotora rozprawy doktorskiej, a obliczenia dla przypadku dwuwarstwy grafenu przeprowadziła dr Mreńca-Kolasińska (promotor pomocniczy), skupię się na omówieniu wyników uzyskanych przez Doktoranta (rozdz. III.F), które dotyczą stacjonarnych własności transportowych rozpatrywanego układu uzyskanych w ramach formalizmu Landauera. Zakładając $E_F = 6.4$ meV, Doktorant obliczył gęstość rozproszeniową oraz prąd w funkcji pola magnetycznego i zaobserwował oscylacje charakterystyczne dla efektu Aharonova-Bohma, jednak o podwojonej fazie. W dalszej części Autor obliczył współczynnik odbicia w przypadku silnie zlokalizowanego potencjału nad jednym z atomów. Wyniki uzyskane przez Doktoranta były istotne do zrozumienia dynamiki

badanego układu, zwłaszcza w przypadku długich pakietów falowych, gdzie pojawia się podwojenie fazy Aharonova-Bohma.

Ostatnia, czwarta publikacja [A4] cyklu, *Aharonov-Bohm oscillations of four-probe resistance in topological quantum rings in silicene and bilayer graphene*, B. Rzeszotarski, A. Mreńca-Kolasińska, B. Szafran, Phys. Rev. B **101**, 115308 (2020), przedstawia propozycję doświadczalnej eksploracji zjawiska Aharonova-Bohma w topologicznym pierścieniu wyindukowanym elektrostatycznie w warstwie silicenu w czteroterminowej konfiguracji złącza [Rys. 1(a)]. Stosując formalizm Landauera-Büttikera, Autorzy wyznaczyli przewodność układu dla prądu płynącego pomiędzy sąsiadującymi oraz przeciwnymi terminalami. Wykazano charakterystyczne oscylacje przewodności w funkcji pola magnetycznego. Ponadto, w zależności od wartości przyłożonego pola magnetycznego, Autorzy wyznaczyli dystrybucję prądu w ringu, co zostało bardzo ładnie zilustrowane na Rys. 7, a także, stosując transformatę Fouriera, wykazali, że oporność związana z prądami chiralnymi wykazuje oscylacje o okresie odpowiadającym wielokrotności jednej czwartej wielkości ringu (Rys. 8). W publikacji [A4] przedstawiono także analogiczne wyniki dotyczące dwuwarstwy grafenu.

Dodatkowo, jako załącznik, Doktorant przedstawił pracę [S1], *Effective Landé factors for an electrostatically defined quantum point contact in silicene*, B. Rzeszotarski, A. Mreńca-Kolasińska, F. M. Peeters, B. Szafran, arXiv:2105.02843 (2021), znajdującą się w bazie preprintów. W pracy wyznaczono efektywny czynnik Landégo g^* dla wstęp silicenu o krawędziach typu krzeselkowego oraz zygzakowatego. Jak wskazuje Doktorant, motywacją do podjęcia tych badań były wyniki doświadczalne uzyskane dla dwuwarstwy grafenu z kwantowym kontaktem punktowym ([42, 43]), w których zaobserwowano, że oddziaływania spinowo-orbitalne typu Kane-Mele wzmacniają rozszczepienie zeemanowskie dla jednej doliny, a osłabiają dla drugiej. W pracy [S1] rozpatrzono wstęgę silicenu o szerokości 200 nm z odpowiednio przyłożonymi bramkami, przy pomocy których utworzony jest kwantowy kontakt punktowy, którego szerokością można sterować dobierając odpowiednio wartość potencjału bramkującego. Wyznaczenie efektywnego czynnika Landégo dokonano mierząc mapy transkonduktancji w funkcji napięcia transportowego i bramkującego oraz w funkcji pola magnetycznego. Autorzy oszacowali wartość czynnika Landégo dla wstęp silicenu o krawędziach krzeselkowych i zygzakowatych, w zależności od kierunku pola magnetycznego, które było zorientowane równoległe lub prostopadłe do powierzchni silicenu, a zebrane wyniki przedstawiono w Tabeli 1. Pokazano między innymi, że w przypadku pola magnetycznego prostopadłego do wstęgi silicenu następuje wzmocnienie czynnika Landégo dla wstęp zygzakowatych ($g^*=5.8$), podczas gdy dla wstęp o brzegach krzeselkowych wzmocnienie jest mniejsze ($g^*=2.5$). Natomiast w przypadku pola magnetycznego przyłożonego w płaszczyźnie silicenu wartość czynnika Landégo jest zredukowana ($g^*=1.2$ dla pierwszego pasma przewodnictwa).

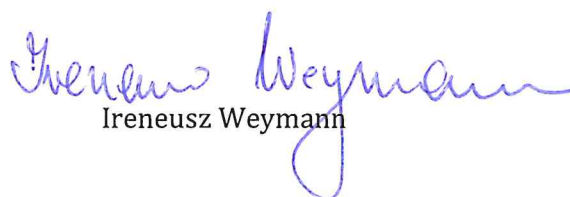
Z racji swej roli, chciałbym także zwrócić uwagę na pewne edytorskie niedociągnięcia, których w zasadzie trudno uniknąć przy tworzeniu dłuższych tekstów, takich jak dysertacje. Poniżej wymienię kilka z nich: otóż, po niektórych wzorach brakuje znaków interpunkcyjnych, co jest zwłaszcza widoczne na stronach 14-15. Ponadto, skrót „SO” nie został zdefiniowany, \hbar [zdefiniowane po wzorze (3)] to zredukowana stała Plancka, a nie stała Plancka, we wzorze (45) nie zdefiniowano wszystkich wielkości. Część przedstawiająca publikacje naukowe nie zawiera numeracji stron należących do dysertacji, a taka numeracja ułatwiłaby poruszenie się po rozprawie. Chciałbym jednak

podkreślić, że powyższe drobne usterki zupełnie nie wpływają na moja całościową, bardzo pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej.

Warto również zauważyć, że Doktorant jest współautorem trzech innych artykułów, które ukazały się w *Physical Review B*. Ponadto, prezentował wyniki swoich badań na siedmiu międzynarodowych konferencjach naukowych – przedstawił dwa referaty oraz pięć prezentacji plakatowych. Doktorant wygłosił również dwa seminaria na Uniwersytecie w Antwerpii, gdzie odbył pięciomiesięczny staż naukowy pod opieką prof. F. M. Peetersa w ramach grantu NCN Etiuda. Pan Rzeszotarski był także kierownikiem diamentowego grantu MNiSW poświęconego transportowi ładunku i spinu w nanoukładach na bazie silicenu, który realizował w latach 2017-2021. To wszystko wskazuje, że Doktorant niewątpliwie posiada świetne predyspozycje do dalszej pracy naukowej – posiada znaczące, jak na swój etap kariery naukowej, osiągnięcia naukowe, z sukcesem potrafi pozyskiwać środki na badania oraz aktywnie prezentuje wyniki swoich badań na arenie międzynarodowej.

W podsumowaniu stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Bartłomieja Rzeszotarskiego zatytułowana „Transport ładunku i spinu w nanoukładach na bazie silicenu” zawiera nowe i interesujące wyniki dotyczące własności transportowych nanostruktur na bazie silicenu. Uzyskane rezultaty niewątpliwie przyczyniają się do lepszego zrozumienia fizyki układów dwuwymiarowych, a w szczególności roli oddziaływań spinowo-orbitalnych oraz wpływu pól elektrycznych i magnetycznych na własności silicenu oraz nano-wstęg silicenowych. Do najważniejszych wyników rozprawy zaliczam: opracowanie modelu tranzystora spinowego, zaprojektowanie interferometru Younga oraz Aharonova-Bohma do detekcji fazy topologicznej związanej ze spinowym kwantowym efektem Halla, opracowanie teorii czteroterminalowego interferometru do badania zjawiska Aharonova-Bohma, a także określenie wpływu oddziaływań spinowo-orbitalnych na efektywny czynnik Landégo dla elektrostatycznie zdefiniowanego kwantowego kontaktu punktowego w silicenie. Chciałbym również wyrazić swoje uznanie dla warsztatu badawczego Doktoranta: mgr Rzeszotarski wykazał się znajomością zaawansowanych metod fizyki ciała stałego, w tym metod stosowanych do obliczeń kwantowego transportu w nanostrukturach oraz metod *ab initio* do badania struktury elektronowej. **Biorąc powyższe pod uwagę uważam, że rozprawa doktorska w pełni spełnia zwyczajowe i ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim i wnioskuje o dopuszczenie mgra inż. Bartłomieja Rzeszotarskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego oraz do publicznej obrony.**

Poznań, dnia 15 sierpnia 2021 roku


Ireneusz Weymann