

Ocena rozprawy habilitacyjnej oraz dorobku naukowego doktora Pawła Wójcika w związku z postępowaniem o nadanie Mu stopnia doktora habilitowanego nauk fizycznych

Formalny opis pracy habilitacyjnej. Przedstawione mi do recenzji osiągnięcie habilitacyjne dr. inż. Pawła Wójcika stanowi cykl 11 artykułów naukowych, wydanych w latach 2014-2019 i objętych wspólnym tytułem: *Wpływ oddziaływania spin-orbita oraz efektów orbitalnych na własności niskowymiarowych struktur półprzewodnikowych i nadprzewodzących*. Prace te ukazały się w wysoko punktowanych¹ czasopiśmie uwzględnionych na liście JCR², w tym: Physical Review B (35 p.) - 4 prace, Semiconductor Science and Technology (30 p.) - 3 prace, Journal of Applied Physics (35 p.) - 2 prace, Applied Physics Letters (40 p.) - 1 praca, Scientific Reports (40 p.) - 1 praca.

Wszystkie prace cyklu są pracami wieloautorskimi: współtworzyło je od 2 do 4 autorów, a więc do oceny wkładu Habilitanta konieczna jest analiza odpowiednich oświadczeń jego współpracowników. Prof. Janusz Adamowski, współautor 6 prac cyklu, opisał swój wkład jako “udział w dyskusji wyników i współtworzeniu manuskryptów”. Bardzo podobnie opisali swoje udziały kolejni współautorzy: dr hab. Maciej Wołoszyn (współautor 3 prac), dr hab. Bartłomiej Spisak (dla 2 prac), dr Andrea Bertoni (dla 2 prac), prof. Guido Goldoni (dla 2 prac), dr Michał Zegrodnik (dla 1 pracy) i prof. Józef Spałek (dla 1 pracy). Jedynie w dwóch pracach cyklu jeden ze współautorów: dr Michał Nowak, opisał swój udział jako polegający na postawieniu problemu badawczego, przy czym w jednej z prac “rozwiązywał też problem analitycznie i numerycznie”. Sam Habilitant określa swój udział na 70%-90%, poza pracą z dr. Nowakiem, w której określił swój udział na 40%. Zgodnie zatem z dostarczonymi oświadczeniami można uznać, że w 9 z 11 prac cyklu udział Habilitanta był zdecydowanie dominujący i polegał zarówno na postawieniu problemu badawczego, jak i wykonaniu wszystkich niezbędnych obliczeń analitycznych i numerycznych, w związku z tym podstawowy warunek stawiany pracy habilitacyjnej jest spełniony.

Kontekst badawczy tematyki pracy. Tematyka pracy należy do zakresu badań spintroniki, czyli gałęzi elektroniki mezoskopowej w której spin elektronowy jest - obok

¹w nawiasach podaję niżej liczbę punktów zgodnie z listą MNiSzW z 26 stycznia 2017 r.

²JCR: Journal Citation Reports

ładunku elektrycznego - podstawową cechą elektronu wykorzystywaną w sterowaniu przesyłanym sygnałem i jego detekcji. Spintronika w szerszym sensie wykorzystuje spin elektronu w informatyce kwantowej, do rozwiązywania problemów obliczeń kwantowych.³ Jedno z podstawowych urządzeń spintroniki: tranzystor spinowy, stanowi centralny obiekt badań ocenianej pracy habilitacyjnej. W tym urządzeniu spintronicznym, zgodnie z koncepcją wywodzącą się z pracy Datta i Dasa⁴, elektrony podróżują między magnetycznie jednakowo spolaryzowanymi elektrodami, przy czym w obszarze między elektrodami podlegają sterowanemu polem elektrycznym sprzężeniu spin-orbita (SO) Rashby. Precesja spinu nim spowodowana może zredukować wartość prądu elektronowego jeśli elektrony docierające do elektrody drenu będą miały niezgodny z nią kierunek momentu magnetycznego. Niestety, po 30 latach od pracy Datta i Dasa postęp w praktycznej realizacji tego urządzenia, mierzony różnicą wartości prądu w stanie ON i OFF, jest nadal niewielki. Powody są znane z literatury zagadnienia⁵, należą do nich mała efektywność wstrzykiwania spinowo spolaryzowanych elektronów do obszaru półprzewodnika, trudna do osiągnięcia jednorodność sprzężenia SO i inne.

W ocenianej pracy habilitacyjnej dr Wójcik bada możliwości efektywnego sterowania polaryzacją magnetyczną elektronów w badanych urządzeniach spintronicznych za pomocą odpowiednio skonfigurowanych pól magnetycznych i elektrycznych. Wykorzystuje w tym celu znane modele teoretyczne półprzewodników, z uwzględnieniem oddziaływania SO (jak model Kane'a), pozwalające w szczególności opisać zarówno spinowe jak i orbitalne efekty oddziaływania elektronów z polem magnetycznym. Autor posługuje się w zasadzie modelem elektronów niezależnych, analizując oddziaływania między elektronami w ramach teorii średniego pola. Ponadto w dwóch pracach cyklu zajmuje się problemem wykorzystania efektu bliskości w półprzewodnikach w kontakcie z nadprzewodzącym metalem dla zbadania możliwości wytworzenia t.zw. stanów Majorany (istotnych dla prowadzenia obliczeń kwantowych). Analizowane modele lub ich uproszczone przez odpowiednie procedury wersje dyskretyzowane są dla przedstawienia na sieci, a obliczenia własności transportowych układów prowadzone są w ramach teorii Landauera-Büttikera, przy założeniu spełnienia warunków dla transportu balistycznego. Obliczenia numeryczne prowadzone były zwykle za pomocą ogólnodostępnego pakietu KWANT. Podsumowując, oceniana praca jest w wysokim stopniu jednorodna zarówno tematycznie jak i metodologicznie.

³J. Barnaś, *Spin w elektronice*, Materiały XXXVI Zjazdu Fizyków Polskich, Toruń 2001, wykład plenarny.

⁴S. Datta, and B. Das, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 665 (1990).

⁵Žutić i wsp., *Rev. Mod. Phys.* **76**, 323 (2004).

Dyskusja wyników uzyskanych w pracy habilitacyjnej. Spośród zawartych w rozprawie wyników dotyczących wpływu efektów spinowych i orbitalnych pola magnetycznego oraz oddziaływań SO typu Rashby na własności mezoskopowych elektro-nicznych urządzeń półprzewodnikowych za szczególnie istotne uważam następujące osiągnięcia:

- Wykazanie istnienia oscylacji prądu elektronowego w funkcji napięcia bramki w modelu tranzystora spinowego w drucie mezoskopowym InAs. Przyjmując niekompletną polaryzację spinową magnetycznych elektrod udało się wyjaśnić wyniki doświadczalne dotyczące rozważanego układu [H1].
- Zaproponowanie i zbadanie własności transportowych dla nowej konfiguracji Y-kształtnego rozdzielacza (ang.: *splitter*) spinowego, o własnościach materiałowych $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$, z punktowym kontaktem kwantowym, zapewniającego wysoką polaryzację spinową prądu elektronowego i działającego w oparciu o istnienie silnego zewnętrznego pola magnetycznego [H2].
- Zbadanie rezonansowego przejścia Landaua-Zenera nanodrutu o parametrach typowych dla (Cd,Mn)Te, pod wpływem pola magnetycznego będącego złożeniem pola jednorodnego i helikalnego (bez efektów SO) i pokazanie efektów związanych z istnieniem stanów kwazizwiązanych objawiających się minimami konduktancji w zależności od wartości zewnętrznego pola jednorodnego oraz energii Fermiego [H4].
- Zbadanie efektów współdziałania helikalnego pola magnetycznego i sterowanego bocznymi bramkami oddziaływania SO Rashby na zachowanie modelu tranzystora spinowego mezoskopowego drutu z InSb, działającego w oparciu o wykorzystanie przejścia Landaua-Zenera [H5].
- Przeprowadzenie wielostronnej, bardzo szczegółowej analizy działania modelu tranzystora spinowego zaproponowanego w schemacie podwójnej studni kwantowej [H6] w materiale Al-In-As/Ga-In-As. W pracy tej wartości sprzężeń SO traktowano jako ustalone parametry modelowe, a także wyznaczono je z obliczeń (samozgodnie traktujących efekty oddziaływań kulombowskich). Pokazano m.in., jak wewnątrz- i międzypasmowe sprzężenia SO zależą od gęstości elektronów w układzie oraz, że silnie zmieniają się w okolicy $V_g = 0$, co stanowi własność sprzyjającą działaniu tranzystora spinowego.
- Zaproponowanie i zbadanie modelu filtra spinowego w układzie podwójnej studni kwantowej (dla materiału Al-In-As/Ga-In-As) zawierającego kwantowy

kontakt punktowy. Pokazano, że w tym układzie możliwe jest uzyskanie bardzo dobrego filtrowania spinowego przy wykorzystaniu przejścia Landaua-Zenera [H7].

- Zbadanie możliwości sterowania sprzężeniem SO Rashby w mezodrutach z materiałów InSb oraz GaAs. Otrzymano dość nieoczekiwany rezultat prawie skokowego wzrostu sprzężenia wewnątrzpasmowego w pobliżu zerowego napięcia bramki, przy czym wielkość tego skoku rosła ze wzrostem gęstości elektronowej. Wynik ten wyjaśniono jako efekt oddziaływań kulombowskich elektronów, których rola rosła wraz ze zwiększaniem się koncentracji elektronów, co zwiększało też wpływ napięcia bramki na redystrybucję ładunku elektronowego [H10]. W pracy [H11] rozszerzono podobną analizę na przypadek drutu InAs z powłoką InAsP, pokazując że udział oddziaływania międzywierzchni składowych materiałów może znacząco (o czynnik rzędu 2) zwiększyć wartość sprzężenia SO Rashby.
- Pokazanie, że do jednoznacznego określenia szczeliny w widmie wzbudzeń w elektronowych mezoskopowego drutu z InSb w kontakcie z nadprzewodnikiem i w obecności zewnętrznego pola magnetycznego konieczne jest określenie minimum nadprzewodzącej energii kondensacji w funkcji położenia punktu odniesienia potencjału wektorowego pola magnetycznego [H9]. Stwierdzono, że szczelina, będąca warunkiem koniecznym istnienia stanów Majorany jest stabilna w szerokim zakresie pól magnetycznych, w przeciwieństwie do wyników prac innych autorów. Uzyskano też dobrą zgodność z eksperymentem dla wartości pola magnetycznego zamykającego szczelinę, pokazując, że na jej wartość zasadniczy wpływ wywierają efekty orbitalne pola. We wcześniejszej pracy [H8] pokazano także wpływ efektów orbitalnych pola na zasięg stanów Majorany w podobnym układzie, stwierdzając, że sprzyjają one ich przestrzennej separacji.

Należy ponadto zauważyć wyniki badania wpływu efektów orbitalnych na własności nadprzewodzące nanodrutu metalicznego (Al) w obecności pola magnetycznego, zawarte w pracy [H3]. W układzie tym stwierdzono występowanie nadprzewodnictwa typu Fuldego-Ferrella (z niezerowym kwazipędem par Coopera), występującego w funkcji pola magnetycznego naprzemiennie z rozwiązaniami typu BCS. Pracę tę uważam jednak za będącą nieco poza główną linią tematyczną rozprawy, gdyż nie dotyczyła półprzewodników ani nie uwzględniała efektów oddziaływań SO.

Ocena pracy habilitacyjnej: podsumowanie. Wyniki uzyskane w pracy habilitacyjnej dr. Wójcika oceniam zdecydowanie pozytywnie. Z jednej strony udało mu się w niektórych badanych zagadnieniach uzyskać przekonujące wyjaśnienie zjawisk obserwowanych doświadczalnie ([H1,H9]). Z drugiej strony zaproponowane zostały w pracy pewne nowe schematy konstrukcji urządzeń spintronicznych, wykorzystujących efekty orbitalne ([H2,H6,H7]), które są możliwe do realizacji w ramach istniejącej technologii. Za szczególnie interesujące uważam zbadanie wpływu oddziaływań kulombowskich między elektronami na wartość sprzężenia SO Rashby i stwierdzenie prawie skokowego jego wzrostu w okolicy $V_g = 0$ dla dostatecznie dużej koncentracji elektronów w układzie ([H10]). Bardzo istotne, również od strony metodologicznej, wydaje mi się też pokazanie konieczności wykorzystania warunku stacjonarności energii kondensacji dla jednoznacznego określenia energii szczeliny w widmie wzbudzeń półprzewodnika w kontakcie z nadprzewodnikiem, co pozwala lepiej określić możliwość istnienia stanów Majorany ([H9]). Pewnym ograniczeniem analizy, na co zwraca zresztą uwagę Habilitant w autoreferacie, jest założenie, że transport można traktować jako czysto balistyczny, mimo dość dużych rozmiarów badanych urządzeń.

Prace z ocenianego cyklu habilitacyjnego były cytowane w sumie 24 razy przez niezależnych autorów⁶, przy czym najczęściej - 8 razy - cytowana była praca [H1]. Nie są to ilości szczególnie imponujące, ale myślę, że znaczny udział w cyklu prac bardzo niedawnych (z lat 2017-2019), może to usprawiedliwiać. Niezależnie od tego mam jednak wrażenie, oceniając całkowitą liczbę prac z tematyki tranzystora spinowego i ich cytowań, że w tej tematyce obserwuje się ostatnio pewną stagnację⁷, być może spowodowaną brakiem wyraźnego powodzenia po stronie doświadczalnej. Na tym tle uzyskaną przez prace cyklu całkowitą wartość cytowań można ocenić jako zadowalającą.

Ocena całkowitego dorobku naukowego Habilitanta. Całkowity dorobek Habilitanta obejmuje 36 publikacji⁸. Były one cytowane łącznie, bez autocytowań, 60 razy. Po doktoracie Habilitant znacznie zwiększył swój dorobek, publikując 28 prac, czyli średnio 4 prace rocznie, co oznacza wysoką aktywność publikacyjną. Ponadto prezentował swoje postery na 14 konferencjach krajowych i międzynarodowych (10 po doktoracie) i 4-krotnie wygłaszał na nich referaty. W zdecydowanej większości swoich prac występuje jako pierwszy na liście autorów. Dr Wójcik opublikował również 2 prace samodzielne, choć w niżej punktowanych czasopismach (Acta Phys. Polon. A, J. Supercon. Novel Magn.). Rozpoznawalność prac Habilitanta można, moim

⁶zgodnie z bazą SCOPUS

⁷zob. np. Web Of Science

⁸zgodnie z Web Of Science

zdaniem, uznać za niezłą, jeśli wziąć pod uwagę, że jego całkowity dorobek powstał w ciągu ostatnich 11 lat. Jego praca doktorska, której promotorem był prof. Janusz Adamowski, dotyczyła transportu elektronowego w układach półprzewodnikowych, a obroniona została w 2012 r. Po obronie doktoratu Habilitant rozszerzył zakres swoich badań o zagadnienia nadprzewodnictwa w skali mezo/nanoskopowej. W tej ostatniej tematyce opublikował (głównie z dr. Zegrodnikiem i dr. Nowakiem), poza pracami z cyklu habilitacyjnego, prace dotyczące oscylacji temperatury krytycznej w funkcji grubości warstw materiału nadprzewodzącego na podłożu półprzewodnika oraz odbić Andreeva w złączach magnetyk–nadprzewodnik oraz półprzewodnik–nadprzewodnik.

Habilitant zdobywał doświadczenie badawcze na stażach, głównie krótkoterminowych, za granicą, ostatnio w grupie prof. Goldoniego w Modenie i prof. Daniela Lossa w Bazylei. Dr Wójcik brał udział w realizacji szeregu grantów badawczych, przy czym 2 razy pełnił funkcję kierownika grantu (Sonata, Juventus Plus). Za swoją działalność naukową był wielokrotnie nagradzany, głównie przez rektora AGH. Powierzano mu - 11 razy - wykonanie recenzji do czasopism naukowych (m.in. Nanoletters, Phys. Rev. B).

Ocena dorobku dydaktycznego, organizacyjnego i popularyzatorskiego Habilitanta. Dr Wójcik ma odpowiednie do swojego stażu pracy doświadczenia dydaktyczne. Prowadził szereg zajęć (głównie ćwiczeń) z fizyki, informatyki, metod obliczeniowych. Jest dobrze oceniany przez studentów w prowadzonych na AGH ankietach. Jako promotor prowadził 6 prac magisterskich z tematyki związanej ze swoją działalnością naukową, ponadto był promotorem 11 prac inżynierskich.

Podsumowanie dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego Habilitanta. Dr Paweł Wójcik posiada już poważny dorobek naukowy, uzyskany w ciągu stosunkowo krótkiego czasu i osiągnął wysoki poziom kompetencji z zakresu fizyki mezo- i nanoskopowej. Wykazał się on także zauważalną samodzielnością naukową, istotnie rozszerzając swoją tematykę badawczą poza zakres badań prowadzonych wspólnie z promotorem jego pracy doktorskiej. Jego całkowity dorobek naukowy i dydaktyczny uważam za zupełnie wystarczający jak na zwyczajowe i ustawowe wymagania stawiane kandydatom na stopień doktora habilitowanego nauk fizycznych.

Podsumowanie i wniosek końcowy. Podsumowując omówione osiągnięcia Habilitanta uważam, że wartość rozprawy habilitacyjnej i całkowitego dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego dr. Pawła Wójcika spełniają warunki określone przez Ustawę o tytule i stopniach naukowych i wnoszę o dopuszczenie Kandydata do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.



prof. dr hab. Tomasz Kostyrko