

dr hab. inż. Tomasz Chwiej
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie

Ocena osiągnięcia naukowego, aktywności naukowej oraz działalności dydaktycznej i organizacyjnej dr inż. Pawła Wójcika w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego

Dr inż. Paweł Wójcik uzyskał stopień magistra inżyniera w 2007 roku na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie po czym rozpoczął on studia doktoranckie, które ukończył w 2012 roku broniąc pracę doktorską zatytułowaną *"Symulacje komputerowe transportu kwantowego w warstwowych nanostrukturach półprzewodnikowych"* wykonaną pod kierunkiem prof. Janusza Adamowskiego. Po uzyskaniu stopnia doktora został zatrudniony na macierzystym wydziale początkowo na stanowisku asystenta (lata 2012-2014) a następnie na stanowisku adiunkta (lata 2014-).

Jako podstawę wniosku habilitacyjnego wskazał on osiągnięcie naukowe zatytułowane **"Wpływ oddziaływania spin-orbita oraz efektów orbitalnych na własności niskowymiarowych struktur półprzewodnikowych i nadprzewodzących"**, które stanowi cykl jedenastu powiązanych tematycznie prac. Publikacje wchodzące w skład cyklu oznaczone są w autoreferacie dołączonym do wniosku jako H1-H11. Habilitant analizuje w nich szczegółowo wpływ efektów orbitalnych, wynikających z kwantyzacji przestrzennych stopni swobody, oddziaływania spinu z polem magnetycznym oraz efektów sprzężenia spin-orbita na strukturę elektronową i własności transportowe w kwazijdnowymiarowych oraz dwuwymiarowych układach dedykowanych do zastosowań w spintronice. Dziedzina ta, gwałtownie rozwijająca się od ponad 30 lat tj. od czasu odkrycia efektu gigantycznego magnetooporu, w odróżnieniu od klasycznej elektroniki, bazuje na równoczesnym wykorzystaniu spinowych stopni swobody nośników oraz stopni orbitalnych odpowiedzialnych za przepływ ładunku. Rozwój tej dziedziny w ostatnich latach stymulowany jest przede wszystkim znacznym postępem w wytwarzaniu dobrej jakości niskowymiarowych układów w tym interfejsów i kontaktów umożliwiających precyzyjne sterowanie nimi oraz w równym stopniu możliwością natychmiastowego ich komercyjnego wykorzystania czego przykładem może być konstrukcja pamięci masowych wykorzystujących do zapisu/odczytu efekt GMR, masowa produkcja magnetycznej pamięci nieulotnej (MRAM) czy bramki kwantowe operujące na kubitach, które wykorzystywane są już w konstrukcjach pierwszych komputerów kwantowych czy różnego rodzaju czujniki pola magnetycznego. Spośród wielu układów spintronicznych na szczególną uwagę zasługują te wykorzystujące specyficzne własności półprzewodników tj. dużą ruchliwość nośników, duży zasięg dyfuzji spinu, silne sprzężenie nośników z polem elektromagnetycznym co daje możliwość sterowania ruchem/spinem nośników za pomocą bramek czy wiązki laserowej, oraz dobrej jakości interfejsów w układach hybrydowych wykorzystujących złącza typu metal/półprzewodnik czy nadprzewodnik/półprzewodnik. Docelowo półprzewodnikowe nanourządzenia spintroniczne powinny umożliwiać wykonywanie operacji na pojedynczych spinach co wymaga stosowania źródeł nośników o określonym rzucie spinu. Takim źródłem może być filtr spinowy pracujący jako element pasywny czy tranzystor spinowy jako element aktywny. Ponieważ do tej pory nie pojawiła się jedna dominująca koncepcja budowy filtra czy tranzystora spinowego, za celowe można uznać badania własności różnych ich konstrukcji, gdyż oprócz lepszego zrozumienia mechanizmów ich działania, mogą one także prowadzić do określenia optymalnych parametrów ich działania. Jest to jeden z ważniejszych aspektów, który można dostrzec w pracach Habilitanta. W prezentowanym dość obszernym cyklu 11 prac można wyróżnić kilka powiązanych ze sobą kierunków badań skoncentrowanych właśnie w tym obszarze, a mianowicie są to: i) badania filtra spinowego bazującego na wykorzystaniu efektu Zeemana i braku rozpraszania wstecznego w silnym polu magnetycznym oraz kontrolowanego sprzężenia spin-orbita typu Rashby, ii) badania tranzystora spinowego wykorzystującego przejście Landaua-Zenera,

iii) badania roli efektów orbitalnych indukowanych polem magnetycznym w nadprzewodnictwie niekonwencjonalnym (faza Fulde-Ferrela) czy w układach hybrydowych półprzewodnik-nadprzewodnik, w których generowany może być fermionowy stan Majorany, oraz iv) badania wielkości sprzężenia spin-orbita w nanodrutach kwantowych o strukturze jednorodnej i powłokowo-rdzeniowej ze względu na geometrię układu i/lub bramek sterujących czy stechiometrii materiałów użytych do budowy heterozłącza (nanostruktury powłokowo-rdzeniowe). Wszystkie prace mają charakter teoretyczny. Własności badanych układów analizowane są przy użyciu konstruowanych przez Habilitanta, lub zaczerpniętych z literatury (ale zmodyfikowanych na potrzeby badanego obiektu), modeli matematycznych i numerycznych, przy użyciu których wykonał on niezbędne obliczenia. Warto tu dodać, iż inspiracją do powstania większości prac były eksperymenty wykonane na przestrzeni ostatnich 5-6 lat, a których wyniki są w pracach H1-H11 przytaczane, porównywane i komentowane w kontekście tych uzyskanych przez Habilitanta.

Ocena osiągnięcia naukowego oraz dorobku dydaktycznego, popularyzatorskiego i współpracy międzynarodowej Habilitanta zamieszczone poniżej zostały sporządzone w oparciu o informacje zamieszczone w autoreferacie zgodnie z wytycznymi zawartymi w rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dn. 1 września 2011 roku *w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego* (Dz. U. Nr 196, poz. 1165).

W pracach H1, H4, H5 i H6 analizowane są własności tranzystora spinowego o różnej konstrukcji. W pracy H1 część aktywną stanowi nanodrut z InAs podłączony do źródła i drenu z umieszczoną nad drutem bramką umożliwiającą zmianę stałej sprzężenia spin-orbita typu Rashby poprzez zmianę przyłożonego do niej napięcia (względem dolnej bramki/podłoża). Układ ten bazuje na koncepcji tranzystora spinowego zaproponowanej w 1990 roku przez Dattę i Dasa, w której ze względu na polaryzację spinową źródła wychodzący z niego elektron ma określony spin podlegający jednak rotacji w obszarze silnego oddziaływania spin-orbita generowanego polem elektrycznym bramki co wpływa na prawdopodobieństwo jego detekcji w obszarze spolaryzowanego drenu. Jak pokazano w pracy H1 można tak dobrać rozmiary geometryczne bramki oraz napięcie sterujące bramki oraz napięcie źródło-dren, aby w przybliżeniu obsadzenia najniższego podpasma na wyjściu uzyskać prąd spolaryzowany zgodnie (stan aktywny) lub przeciwnie (stan odcięcia) w stosunku do polaryzacji drenu ($P = 1$). Natomiast rozszerzając model o możliwość rozpraszania międzypasmowego oraz uwzględniając niecałkowitą polaryzację źródła i drenu ($P = 0.4$), autorzy uzyskali bardzo dobrą zgodność charakterystyk $I(V_{DS}(G))$ wyznaczonych numerycznie i eksperymentalnie [poz. 19 w H1].

Nieco inną koncepcję tranzystora spinowego zaproponowaną przez Žutića i Lee [poz. 14 in H4], bazującego na wykorzystaniu efektu Zeemana i przejścia Landaua-Zenera, Habilitant zastosował w pracy [H4]. Zgodnie z założeniem przyjętym w pracy elektrony poruszają się w nanodrucie wykonanym z materiału $(Cd, Mn)Te$, który pozwala osiągnąć bardzo duży czynnik Landego w zakresie 200 – 500. Dzięki zastosowaniu zewnętrznego jednorodnego pola magnetycznego oraz słabego pola helikalnego ($B \approx 50$ mT) generowanego np. przez cienki pasek dysprozu umieszczony nad drutem, w pewnym obszarze drutu może dojść do zbliżenia oraz przecięcia się rozszczepionych (w pobliżu drenu i źródła) poziomów o przeciwnych spinach. Jak pokazują autorzy pracy H4, w zależności od stosunku wielkości obu pól, w obszarze w którym rozszczepione poziomy zbliżają się do siebie, elektron może w wyniku przejścia wewnątrzpasmowego związanego z obrotem spinu (przejście Landaua-Zenera) zostać uwięzionym w lokalnej studni potencjału, gdyż ze względu na podniesienie tego poziomu energii powyżej poziomu energii Fermiego poza obszarem oddziaływania z polem helikalnym nie może on przejść do obszaru drenu, co w rezultacie prowadzi do stanu odcięcia tranzystora. Autorzy pokazali, iż skrócenie obszaru występowania pola helikalnego prowadzi do silniejszej separacji poziomów kwazirezonansowych co przejawia się występowaniem charakterystycznych silnych oscylacji konduktancji i jest wynikiem nieadiabatyczności całego procesu wskazując tym samym na możliwość eksperymentalnej weryfikacji uzyskanych wyników.

W pracy H5 zaproponowano nieco zmienioną koncepcję tranzystora spinowego bazującego na wy-

korzystaniu przejścia Landaua-Zenera, rezygnując z użycia zewnętrznego pola magnetycznego na rzecz oddziaływania spin-orbita typu Rashby w drucie $InSb$ generowanego przez dwie bocznie umieszczone bramki sterujące. Wyniki zamieszczone w pracy pokazują iż odpowiednio ustawiając różnicę napięć na bocznych bramkach, manipulując w ten sposób współczynnikiem sprzężenia spin-orbita, oraz dobierając położenie energii Fermiego, można wprowadzić układ w stan o niskiej (stan odcięcia) lub wysokiej konduktancji (stan aktywny). Tak silny wpływ obu wielkości na wartość konduktancji wynika z faktu, iż dla założonej energii Fermiego, znacznie zmienia się efektywna długość na której dochodzi do obrotu spinu i jeśli ta odpowiednio skoreluje się ze zmianami pola helikalnego, wówczas prawdopodobieństwo przejścia Landaua-Zenera osiąga maksimum i przejście elektronu w kierunku drenu jest zablokowane ze względu na podniesienie podpasma elektronu z obróconym spinem powyżej energii Fermiego. Powyższą koncepcję tranzystora spinowego można więc potraktować jako połączenie idei Datta i Das, gdyż sterowanie akcją tranzystorową odbywa za pomocą sygnału elektrycznego, ale do działania wymagane jest nadal pole helikalne jak w koncepcji Žutića i Lee.

Kolejną modyfikację konstrukcji tranzystora spinowego Habilitant proponuje w pracy H6, w której część aktywną stanowi układ horyzontalnie ułożonych jeden nad drugim dwóch drutów kwantowych realizowanych na bazie heterozłącza $In_{0.53}Ga_{0.47}As/Al_{0.48}In_{0.52}As$ z przedzielającą je barierą tunelową. Ze względu na geometrię układu, dwa najniższe podpasma powstające wskutek kwantyzacji w kierunku pionowym mogą się łatwo mieszać ze sobą, przy czym przejście międzypasmowe może wiązać się z obrotem spinu, gdyż po przyłożeniu do bramek umieszczonych pod i nad układem odpowiedniej różnicy potencjałów generowane jest oddziaływanie spin-orbita typu Rashby (w H6 pokazano iż oddziaływanie SO typu Dresselhausa jest kilkunastokrotnie słabsze). Problem rozwiązywany jest w ośmiopasmowym modelu $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ ze współczynnikami Rashby wyznaczanymi osobno dla rozpraszania wewnątrz- i międzypasmowego oraz z potencjałem oddziaływania typu Hartree otrzymywanym z obliczeń samouzgodnionych. Wyniki symulacji numerycznych zamieszczone w pracy H6 pokazują, iż współczynniki Rashby dla obu typów rozpraszania są najbardziej czułe tj. zmieniają się w największym zakresie, gdy różnica napięć na bramkach sterujących jest bliska zeru, przy czym ich podatność na zmiany napięcia rośnie wraz ze zwiększaniem gęstości elektronowej w układzie. Ciekawym okazuje się również być fakt, iż przy braku różnicy napięć na dolnej i górnej bramce sterującej, rozpraszanie wewnątrzpasmowe odbywa się bez zmiany spinu ze względu na zerowanie odpowiednich współczynników Rashby, podczas gdy dla rozpraszania międzypasmowego jego amplituda jest maksymalna. Takie zmiany współczynnika Rashby pozwalają dla względnie dużych gęstości ładunku ($\sim 10^{12}/cm^2$) przelączyć układ pomiędzy stanami aktywnym i odcięcia zmieniając napięcie bramek w niewielkim zakresie (< 100 mV). Autorzy wskazują, iż możliwa jest dalsza optymalizacja tego procesu ze względu na szerokość bariery, przy czym preferowane są wąskie bariery w zakresie 2 – 4 nm.

W pracach H2 i H7 Habilitant analizuje dwie znacznie różniące się od siebie konstrukcje filtrów spinowych. Pierwsza z nich (H2) to trójkońcówkowy układ półprzewodnikowy na bazie heterozłącza z kanałem transportowym umieszczonym w materiale $In_{0.5}Ga_{0.5}As$. Dzięki zastosowaniu silnego pola magnetycznego uzyskano dwa efekty, pierwszy to zniesienie degeneracji dla różnych rzutów spinu elektronów, dzięki temu gdy docierają one w obszar przewężenia (QPC) umieszczonego w kanale 2, tylko te mające spin równoległy do kierunku pola mają nadal energię niższą od energii Fermiego, a pozostałe zostają odbite przy czym ze względu na brak rozpraszania wstecznego w polu magnetycznym kierowane są do trzeciego kanału. Idea działania jest zatem dość prosta. W pracy tej, autorzy szczegółowo analizują wpływ geometrii, oddziaływania spin-orbita i rozpraszania (Habilitant wykonał dodatkowe symulacje Monte Carlo dla stochastycznego modelu Ando) na efektywność filtracji spinu. Praca jak i prezentowane w niej wyniki są ciekawe, jednak należy pamiętać, iż konstrukcja ta wymaga użycia silnego pola magnetycznego ~ 3 T (silny efekt Zeemana, wytłumienie rozpraszania wstecznego) co może być kłopotliwe w zastosowaniach praktycznych, gdyż wpływać będzie ono także na działanie pozostałych elementów do których byłby podłączony taki filtr (eksponowanie efektów orbitalnych kosztem bardziej subtelnych jak np. efektów wynikających z oddziaływania spin-orbita). Wspomnianej wady pozbawiona jest natomiast konstrukcja filtru spinowego analizowanego w pracy H7. Ma on także

prostsza geometrię, gdyż zbudowany jest z dwóch poziomo ułożonych jeden nad drugim drutów kwantowych, oddzielonych barierą tunelową z przewężeniem (QPC) w jego części środkowej. W konstrukcji tej, dzięki wykorzystaniu oddziaływania spin-orbita typu Rashby podpasma energii (w relacji dyspersji $E(k)$) ulegają rozsunięciu w kierunku poziomym. Dzięki hybrydyzacji dwóch najniższych podpasem związanych z kwantyzacją w kierunku pionowym na poziomie Fermiego obserwowany jest antykrossing dwóch stanów umożliwiający przejście Landaua-Zenera do wyższego stanu, który w obszarze przewężenia kanału transportowego (QPC) jest blokowany. Eksploatowany jest tu zatem mechanizm, który Habilitant wykorzystał także w pracach H4 i H5 do kontroli akcji tranzystorowej, a geometria układu (pomijając QPC) jest podobna do tej analizowanej w H6. Podobnie jak w pracy H2, analizowane są tu szczegółowo warunki w jakich filtracja spinu jest optymalna tj. zależność od energii Fermiego, gęstości elektronowej, energii stanów poprzecznych w obszarze przewężenia kanału czy współczynnika sprzężenia spin-orbita dla rozpraszania wewnątrz- i międzypasmowego (co z kolei stanowi silne nawiązanie do pracy H6). Wyniki obliczeń wykonane przez Habilitanta dla modelu prezentowanego w pracy H7, wskazują iż proponowana konstrukcja filtra może być bardzo efektywna tj. powinna pozwolić generować prąd o polaryzacji spinowej bliskiej 100% i do pewnego stopnia odporna na warunki zaburzające jak np. stochastyczny rozkład zjonizowanych donorów będących źródłem elektronów w układzie.

W pracach składających się na niniejszy cykl dość silnie eksponowane są efekty wynikające z oddziaływania spin-orbita typu Rashby, gdyż wielkość tego sprzężenia można kontrolować za pomocą bramek w przeciwieństwie do oddziaływania typu Dresselhausa, które może być traktowane jako efekt pasożytniczy, a którego wielkość jest ustalana na etapie wytwarzania poprzez dobór odpowiedniej geometrii układu (prace H6,H7) czy kierunku krystalizacji (prace H5). Minimalizując (rzadziej eliminując zupełnie) wpływ sprzężenia typu Dresselhausa, istotnym zagadnieniem staje się maksymalizacja efektów związanych ze sprzężeniem typu Rashby. Dwie prace H10 i H11 stanowią kolejny wkład Habilitanta do tego zagadnienia. Powstały one w nawiązanej z incjatywy Habilitanta współpracy z dwójką teoretyków, prof. Andrea Bertonim oraz prof. Guido Goldoni z Uniwersytecie w Modenie we Włoszech. W pracach tych rozważany jest nanodrut jednolity (H10) oraz o przekroju powłokowo-rdzeniowym (H11) w modelu $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$. Wyniki zamieszczone w pracy H10 pokazują iż w układzie ze złamaną symetrią potencjału uwięzienia, który generowany jest przez pojedynczą elektrodę dolną, w nanodrucie dochodzi do silnej hybrydyzacji stanów będących wynikiem kwantyzacji w kierunku poprzecznym. To prowadzi do silnej nieliniowej zależności współczynnika Rashby, przy czym efekt jest silnie niesymetryczny względem polaryzacji napięcia bramki i staje się silniejszy wraz ze zwiększaniem gęstości elektronowej czy energii Fermiego w układzie (podobny efekt Habilitant uzyskał w pracy H6 dla układu dwóch sprzężonych tunelowo drutów kwantowych). Wyniki modelowania wartości współczynnika Rashby dla drutu wykonanego z $InSb$ w układzie z bramką dookólną i bramką dolną dobrze odtwarzają wyniki uzyskane eksperymentalnie przez Weperena i innych [poz. 34 w H6]. Z kolei obliczenia wykonane dla nanodrutu w geometrii powłokowo-rdzeniowej (H11) wskazują na istotną rolę interfejsu pomiędzy rdzeniem ($InAs$) a powłoką ($InAs_{1-x}P_x$) w definiowaniu wielkości sprzężenia spin-orbita typu Rashby. Okazuje się bowiem, iż w przypadku niewielkiego przesunięcia dna pasma przewodnictwa w materiale rdzenia i powłoki np. dla $x \sim 0.1$ ($\Delta E_c \sim 50$ meV) wkład do współczynnika Rashby wynikający z tego skoku może być nawet o 50% większy niż ten generowany elektrostatycznie przez dolną bramkę na której umieszczony jest nanodrut, a realacja ta jest w zasadzie niezależna od wielkości napięcia do niej przyłożonego co oczywiście wynika z faktu, iż dla większych napięć (silniejszego pola elektrycznego) funkcja falowa elektronu silniej penetruje interfejs i obszar bariery zewnętrznej wyznaczonej przez powłokę. Wyniki te pozwalają więc lepiej zrozumieć mechanizm generowania dużego współczynnika Rashby w drutach o geometrii powłokowo-rdzeniowej co być może pozwoli w przyszłości projektować układy zoptymalizowane tj. o maksymalnie dużych stałych sprzężenia Rashby.

W końcowej części dotyczącej przeglądu publikacji wchodzących w skład cyklu chciałbym odnieść się do prac H3, H10 i H11, w których Habilitant zajmuje się badaniem efektów orbitalnych oraz oddziaływania spin-orbita w układach nadprzewodzących oraz hybrydowych typu nadprzewod-

nik/półprzewodnik. W pracy H3 analizowana jest możliwość generowania nadprzewodzącej fazy Fulde-Ferrella (FF) w metalicznej nanorurce tj. parowania elektronów, które ze względu na orbitalny i spinowy efekt Zeemana w polu magnetycznym mogą utworzyć parę Coopera z niezerowym wypadkowym pędem ich środka masy. Wykazano tu iż dla określonych parametrów geometrycznych układu określonego przez promień cylindra, mechanizm powstawania fazy FF związany jest z parowaniem stanów o przeciwnych momentach pędu, o ile odpowiadające im podpasma znajdują się blisko poziomu Fermiego, w oknie wyznaczonym przez częstość Debye'a, a niezerowy pęd pary jest w stanie skompensować różnicę energii obu stanów. W pracy H3 przewidziano także, iż systematyczny wzrost natężenia pola magnetycznego musi prowadzić do deparowania w fazie FF co w wyniku zmniejszenia przerwy energetycznej prowadzi do utworzenia konwencjonalnej fazy BCS, przy czym proces wzajemnego zastępowania się faz FF/BCS może powtórzyć się jeszcze kilkukrotnie do momentu, gdy pole magnetyczne osiągnie wartość krytyczną, powyżej którego faza nadprzewodząca znika. Ponieważ wyniki zamieszczone w pracy H3 zostały uzyskane dla ekstermalnie małych promieni nanocylindra ($R \sim 1$ nm), co poddawałoby w wątpliwość ewentualną możliwość ich eksperymentalnej weryfikacji, autorzy pracy proponują przeprowadzenie doświadczenia polegającego na pomiarze superprądu generowanego przez niezerowy pęd par Coopera w układzie o większych rozmiarach geometrycznych, ale ze znacznie obniżoną gęstością nośników tak aby ograniczyć ilość stanów biorących udział w transporcie do kilku.

Tematyka podjęta w dwóch pozostałych pracach H8 i H9 obejmuje analizę wpływu efektów orbitalnych generowanych polem magnetycznym na własności stanu związanego Majorany. Badania własności stanów Majorany są jednym z najszybciej rozwijających się kierunków badawczych w fizyce fazy skondensowanej odkąd ich istnienie zostało eksperymentalnie potwierdzone przez grupę prof. Leo Kouwenhovena w układach hybrydowych, w których faza nadprzewodząca w wyniku efektu bliskości wnika w obszar półprzewodnika (najczęściej w postaci nanodrutu), w którym formuje się stan związany Majorany. Ponieważ teoria fermionów Majorany nie jest jeszcze kompletna, ich badania teoretyczne i eksperymentalne doskonale wpisują się w nurt badań podstawowych, ale nie tylko, mianowicie specyficzne własności topologiczne takich układów predystynują je do zastosowań w nowych konstrukcjach topologicznych bramek kwantowych o dużej odporności na zaburzenia będące wynikiem oddziaływania z otoczeniem.

W pracy H8 pole magnetyczne przyłożone jest prostopadle do płaszczyzny w której znajduje się płaski nanodrut. Autorzy pracy założyli, iż ma on znaczną szerokość ($W \sim 100$ nm) umożliwiając tym samym silne mieszanie stanów poprzecznych w polu magnetycznym. W hamiltonianie pojawiają się wówczas dwa wyrazy paramagnetyczne związane z efektem kinetycznym oraz oddziaływaniem spin-orbita, a także wyraz diamagnetyczny, które odpowiedzialne są za renormalizację masy efektywnej, potencjału chemicznego i stałej sprzężenia spin-orbita co w rezultacie skutkuje zmianą długości charakterystycznej stanu Majorany. Autorzy pracy pokazują, iż długość ta może być zmieniana w szerokim zakresie poprzez zmianę natężenia prostopadle przyłożonego pola magnetycznego - zatem efekty orbitalne odgrywają tu istotną rolę. Mają one również kluczowe znaczenie, gdy pole magnetyczne zostanie ustawione w płaszczyźnie interfejsu półprzewodnik/nadprzewodnik i prostopadle do osi podłużnej układu (praca H9). Ze względu na znaczną różnicę mas efektywnych w półprzewodniku (*InSb*) oraz w nadprzewodniku (*Al*) nie jest znana *a priori* lokalizacja przestrzenna stanu podstawowego, przez co nieodpowiedni dobór punktu względem którego cechowany jest potencjał wektorowy może prowadzić do błędnej konkluzji, iż nawet niewielkie pole magnetyczne zamyka przerwę nadprzewodzącą wymaganą do utworzenia stanu Majorany. Propozycja rozwiązania tego problemu przedstawiona w pracy H9, polega na przeprowadzeniu w takiej sytuacji minimalizacji energii swobodnej układu względem położenia tego punktu, gdyż jej minimum określa punkt stacjonarny odpowiadający stanowi podstawowemu układu co z kolei jest równoważne warunkowi znikania przepływu superprądu. Autorzy przeprowadzili weryfikację proponowanego modelu obliczeniowego wyznaczając krytyczną wartość pola magnetycznego powyżej którego przerwa nadprzewodząca znika ($B_c \sim 0.4$ T). Jest ona zgodna z wartością mierzoną eksperymentalnie (poz. 21 w H9) co potwierdza poprawność proponowanej procedury.

Przedstawiona krótka charakterystyka prac wchodzących do osiągnięcia dr inż. Pawła Wójcika pokazuje iż tworzą one spójny cykl, w którym Habilitant w sposób dobrze przemyślany dobiera tematykę badawczą, a która jak można się przekonać jest silnie związana z aktualnymi kierunkami badawczymi w fizyce fazy skondensowanej tj. spintroniką, nadprzewodnictwem niekonwencjonalnym czy własnościami układów topologicznych. Doceniam również fakt, że mimo iż prace te mają charakter teoretyczny, w każdej z nich można odczytać silne dążenie do weryfikacji uzyskanych wyników poprzez odniesienie ich do najnowszych wyników eksperymentalnych. Wszystkie prace H1-H11 zostały opublikowane w czasopismach specjalistycznych o wysokiej randze naukowej. Cztery z nich opublikowano w *Physical Review B* ($IF = 3.8$), dwie w *Journal of Applied Physics* ($IF = 2.17$), trzy w *Semiconductor Science and Technology* ($IF = 2.28$), oraz po jednej w *Scientific Reports* ($IF = 4.12$) i w *Applied Physics Letters* ($IF = 3.49$). Zgodnie z oświadczeniem zawartym w autoreferacie (zgodnym z oświadczeniami pozostałych współautorów), wkład Habilitanta w ich powstanie (poza pracą H8) można uznać za dominujący, gdyż nie tylko był on inspiratorem prowadzonych badań ale także brał udział w opracowywaniu metodyki badań, wykonywał niezbędne obliczenia a także brał udział w analizie wyników czy pisaniu manuskryptów prac. O wiodącej roli Habilitanta świadczy również to, iż w pracach cyklu, mimo iż są to prace wieloautorskie, jest on wymieniany jako pierwszy autor aż w dziesięciu z nich. Natomiast w dwuautorskiej pracy H8 jest on drugim autorem, ale swój wkład określa on na poziomie 40%, który również uznaje za znaczący.

Pozostały dorobek publikacyjny Habilitanta obejmuje 26 prac indeksowanych w bazie JCR, z czego 9 zostało opublikowanych przed uzyskaniem tytułu doktora a 17 powstało w kolejnych latach. Spośród tych 26 prac, jako pierwszy autor wymieniany jest 17 razy, z czego dwie to prace jednoautorskie, a w jednej (dwuautorskiej) opublikowane zostały wyniki uzyskane przez studenta realizującego pracę magisterską pod kierunkiem Habilitanta. Tematyka tych prac skupiona jest wokół kilku zagadnień, które związane są z: transportem elektronowym w półprzewodnikowych drutach kwantowych, badaniami nadprzewodnictwa w układach niskowymiarowych, wpływem efektów orbitalnych indukowanych polem magnetycznym w trakcie przejścia metal-nadprzewodnik oraz ich wpływem na stabilność nadprzewodzącej fazy Fulde-Ferrella-Larkina-Ovchinnikova i transportem w układach hybrydowych (półprzewodnik/nadprzewodnik, ferromagnetyk/nadprzewodnik). Spektrum zainteresowań naukowych Habilitanta jest więc szerokie i wiąże się ściśle z aktualnymi trendami rozwoju w nanofizyce. Część tych badań była, a część nadal jest finansowana z odpowiednich grantów badawczych przyznawanych w ramach konkursów organizowanych przez Narodowe Centrum Nauki.

Zgodnie z informacjami zawartymi w bazie Web of Science na dzień 19.06.2019, całkowita liczba cytowań wszystkich prac wynosiła 124, w tym 63 bez autocytowań, a jego indeks Hirscha wynosił 6. Sumaryczny wskaźnik oddziaływania dla prac wchodzących do cyklu wynosi 80.1. Podane dane scjentometryczne nie są wysokie, jednak uważam iż w najbliższych latach znacznie wzrosną, gdyż Habilitant w ostatnim czasie publikuje w czasopismach o coraz wyższych wskaźnikach oddziaływania, można więc oczekiwać, że będą one bardziej rozpoznawalne w środowisku i częściej cytowane.

Wyniki badań, w których brał udział Habilitant prezentowane były na licznych konferencjach naukowych. Sumarycznie były one prezentowane na 13 referatach oraz 28 sesjach plakatowych z czego Habilitant wygłosił 4 referaty oraz osobiście prezentował 14 posterów. Oprócz czynnego udziału w konferencjach, wygłosił 4 referaty zaproszone z czego dwa w ośrodkach zagranicznych, na Uniwersytecie w Bazylei (Szwajcaria) oraz na Uniwersytecie w Modenie (Włochy). W drugim przypadku referat był zapewne pokłosiem nawiązanej z inicjatywy Habilitanta współpracy z prof. Andream Bertonim oraz prof. Guido Goldonim, a która zaowocowała powstaniem dwóch prac wchodzących w skład osiągnięcia naukowego (prace H10 i H11). Pokazuje to iż jest on osobą asertywną nie stroniącą od nowych wyzwań naukowych. W ramach prowadzonej przez Habilitanta współpracy międzynarodowej wymienia on dwa krótkie pobyty na Uniwersytecie w Modenie, ponadto zaliczył on również dwa dłuższe staże naukowe, dwumiesięczny na Uniwersytecie w Antwerpii oraz półroczny na Uniwersytecie w Leeds. Także w ramach współpracy międzynarodowej Habilitant udziela się jako recenzent w zagranicznych czasopismach naukowych. Do tej pory sporządził 11 recenzji dla 8 czasopism. Spora aktywność Ha-

bilitanta na polu nauki została dostrzeżona i doceniona w macierzystej uczelni, gdzie otrzymał sześć nagród rektora (2 i 3 stopnia) za działalność naukową, a w roku 2017 został uhonorowany pozauczelnianą nagrodą 1 stopnia im. Zbigniewa Engela. Przez dwa lata był także członkiem Rady Młodych Naukowców, będącego organem doradczym przy Ministrze Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Oprócz intensywnej działalności publikacyjnej, Habilitant może pochwalić się sporymi sukcesami w pozyskiwaniu środków na badania naukowe. Jako wykonawca uczestniczył w 3 grantach przyznanych przez NCN oraz w jednym projekcie edukacyjnym finansowanym ze środków europejskich. Do tej pory kierował jednym grantem przyznany przez MNiSW, a aktualnie jest kierownikiem grantu finansowanego przez NCN. Obecnie bierze on aktywny udział w realizacji aż trzech grantów.

W trakcie swej pracy na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, Habilitant zdobył duże doświadczenie w zakresie dydaktyki prowadząc liczne zajęcia ze studentami w tym ćwiczenia rachunkowe z *Fizyki*, *Matematycznych metod fizyki* oraz *Fizyki współczesnej*, ćwiczenia laboratoryjne z *Podstaw informatyki*, *Programowania proceduralnego* i *Metod obliczeniowych fizyki* czy seminaria w ramach modułu *Materiały i urządzenia półprzewodnikowe*. Był także opiekunem 6 prac magisterskich, których tematyka ściśle związana jest z naukowymi zainteresowaniami Habilitanta, co świadczy iż chętnie dzieli się on ze studentami swoją wiedzą i doświadczeniem. Pod jego opieką powstało też 11 prac inżynierskich.

Z przytoczonych wyżej informacji wynika, że dr inż. Paweł Wójcik w trakcie swojej kariery naukowej był i jest osobą bardzo aktywną naukowo, o sporym dorobku publikacyjnym, który można uznać za istotny wkład w rozwój nanofizyki. Aktywność ta w połączeniu ze sporą kreatywnością w określaniu kierunków i metodyki prowadzonych badań skutkująca dużą skutecznością w zdobywaniu środków na badania czy efektywną współpracą prowadzoną w zespołach wieloosobowych, krajowych i międzynarodowych, w niektórych przypadkach także pod jego kierunkiem, sprawia że należy go traktować jako doświadczonego w pełni samodzielnego badacza. Dlatego, biorąc pod uwagę formalne kryteria oceny wniosku habilitacyjnego stwierdzam, iż osiągnięcie naukowe "Wpływ oddziaływania spin-orbita oraz efektów orbitalnych na własności niskowymiarowych struktur półprzewodnikowych i nadprzewodzących" będącego podstawą wniosku habilitacyjnego dr inż. Pawła Wójcika oraz jego pozostały dorobek naukowy, dydaktyczny i organizacyjny spełniają ustawowe wymagania. W związku z powyższym, popieram wniosek dr inż. Pawła Wójcika o nadanie mu stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie fizyka i wnoszę o dopuszczenie go do dalszego etapu postępowania habilitacyjnego.

Kraków, dn. 19.06.2019

Tomasz Chwaj