



UNIwersytet  
Warszawski

Wydział Fizyki

Dr hab. Adam Babiński, prof. UW



Warszawa 2 stycznia 2017 r.

## Recenzja w postępowaniu habilitacyjnym doktor Agnieszki Wołoś

Doktor Agnieszka Wołoś uzyskała stopień naukowy doktora nauk fizycznych z wyróżnieniem na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w 2005 r na podstawie dysertacji *Properties of Mn impurity in the selected group III-V Semiconductors*. Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora przebywała na dłuższym stażu naukowym na Uniwersytecie Johanna Keplera w Linzu w Austrii. Od tego czasu dr Wołoś przez szereg lat pracowała w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk, nie tracąc jednak kontaktu z Wydziałem Fizyki UW, gdzie jest aktualnie zatrudniona na stanowisku adiunkta.

Osiągnięciem naukowym przedstawionym przez dr Wołoś w postępowaniu habilitacyjnym jest powiązany tematycznie cykl publikacji **Zastosowanie spektroskopii mikrofalowej do badań nośników masy efektywnej w wybranych dwuwymiarowych i trójwymiarowych strukturach krystalicznych**. Na prezentowany zbiór składa się seria 6 prac, które powstały w latach 2007-2016, a więc po uzyskaniu przez Autorkę stopnia naukowego doktora. Prezentowane prace ukazały się w międzynarodowych czasopismach o znacznym stopniu oddziaływania, w tym w *Physical Review Letters* [A5] czy *Physical Review B* [A2, A4, A6]. Dr Wołoś jest pierwszym autorem wszystkich przedstawionych prac, zaś deklaracje pozostałych współautorów nie pozostawiają wątpliwości co do kluczowej roli jaką odegrała w ich powstaniu.

Zasadniczym elementem łączącym prace prezentowanego cyklu jest wykorzystanie spektroskopii mikrofalowej do badania własności materiałów i struktur półprzewodnikowych. Autorka w szczególności pokazuje, że oprócz bardziej standardowego wykorzystania spektrometru EPR do badań centrów paramagnetycznych czy rezonansu cyklotronowego możliwe są także przy jego użyciu badania przewodnictwa elektrycznego w polu magnetycznym. Choć, jak zauważa Autorka, wykorzystanie spektroskopii EPR do badania własności elektrycznych było raportowane już w latach 90-tych XX w., to stosunkowo niewielka liczba publikacji w tej dziedzinie sugeruje raczej ograniczone rozpowszechnienie tej metody. Autorka, wykorzystując ją w swoich pracach w szczególności do badania ciekawych i ważnych aplikacyjnie materiałów.

Znakomite wprowadzenie do tej tematyki stanowi praca [A1], zawierająca wyniki uzyskane przy jej zastosowaniu w heterostrukturach GaN/AlGaIn, izolatorach topologicznych i grafenie. Pokazano w niej pełną gamę zastosowań spektrometru EPR do badań zarówno efektów rezonansowych takich jak rezonans cyklotronowy jak i nierezonansowych jak oscylacje Szubnikowa-de-Haasa czy kwantowe efekty słabej lokalizacji/antylokalizacji.

UW

Dwa stulecia  
Dobry początek

W pracy [A2] badane są rezonanse plazmonowo-cyklotronowe w heterostrukturach GaN/AlGaN. Wyniki doświadczalne uzyskane w tej pracy zostały przeanalizowane przy użyciu modelu teoretycznego uwzględniającego m.in. rozmiar próbki. Autorka pokazała w jaki sposób pomiar sprzężenia plazmonowo - cyklotronowego umożliwia bezkontaktowe wyznaczenie podstawowych parametrów dwuwymiarowego gazu nośników, a więc ich koncentracji i ruchliwości. Mimo ograniczeń tej metody do systemów o wysokiej ruchliwości została ona z sukcesem wykorzystana przez innych autorów do analizy własności heterostruktur MgZnO/ZnO czy struktur opartych na krzemie.

Materiały oparte na GaN są także tematem pracy [A3] poświęconej polu Rashby. W przypadku gazu elektronowego na interfejsie GaN/AlGaN, podobnie jak w pracy [A2] Autorka obserwuje rezonans plazmonowo-cyklotronowy i raportuje brak rezonansu spinowego. Jest to zgodne z dużą wartością pola Rashby i wynikającym z tego istotnym rozszczepieniem spinowym w zerowym polu zewnętrznym. Szczegółowa analiza kształtu sygnału rezonansu spinowego w objętościowym GaN pozwala Autorce postawić hipotezę o istnieniu na powierzchni materiału warstwy akumulacyjnej. Słaba zależność przestrzenna g-czynnika pozwoliła także oszacować od góry wielkość pola Rashby w tym materiale. Uznanie musi budzić dokładna analiza materiału doświadczalnego przedstawionego w tej pracy i umiejętność zastosowania do jego opisu dostępnych modeli teoretycznych, w tym formalizmu stosowanego uprzednio w przypadku studni kwantowych Si/SiGe.

W pracy [A4] Autorka zajmuje się przejściem metal-izolator i relaksacją spinową w GaN domieszkowanym krzemem. Analizuje w tym celu wyniki pomiarów rezonansu spinowego i efektu Halla w tym materiale. Autorka obserwuje zanik momentów magnetycznych centrum neutralnego donora  $D^0$  związane z obsadzaniem niemagnetycznych stanów  $D^-$ , co jest związane z przejściem metal-izolator. Wyznacza dzięki temu krytyczną koncentrację tego przejścia. Także w tym przypadku kluczowa dla uzyskanych konkluzji jest analiza teoretyczna wyników eksperymentalnych oparta na formalizmie Shklovskiego z trzema energiami aktywacji. Praca [A4] zawiera także analizę wpływu koncentracji Si na czas życia elektronu zlokalizowanego na neutralnym donorze.

Praca [A5] poświęcona jest własnościom izolatora topologicznego  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . Autorka zwraca uwagę na potencjał badania własności powierzchniowych tego materiału przy użyciu technik mikrofalowych. Podczas gdy obserwacja oscylacji Szubnikowa-de Haasa pozwoliła na określenie koncentracji dziur w objętości materiału, detekcja rezonansu cyklotronowego umożliwiła identyfikację poziomów Landaua związanych ze stanami powierzchniowymi. Zaobserwowana pierwiastkowa zależność energii poziomów Landaua od pola magnetycznego przekłada się na liniową dyspersję elektronów w zerowym polu magnetycznym, co jest charakterystyczne dla izolatorów topologicznych. Autorka pokazała także nieoczekiwanie niską wartość prędkości Fermiego, która charakteryzuje tę zależność dyspersyjną. Wartość ta, dwa rzędy wielkości niższa niż uzyskiwana za pomocą techniki ARPES, została przypisana wpływowi zanieczyszczenia powierzchni gazami atmosferycznymi. Recenzent podziela opinię Autorki, że obserwacja ta

godna jest dalszej analizy, w szczególności w perspektywie ewentualnych zastosowań tego materiału.

Osiągnięcie Autorki zamyka praca [A6] poświęcona innemu izolatorowi topologicznemu -  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Praca ta obejmuje badania własności pasmowych nośników w tym materiale. Dokładna analiza rezonansu spinowego elektronów i dziur pozwoliła na wyznaczenie  $g$ -czynnika obu rodzajów nośników. Autorka potwierdza ich wysokie, wynikające z oddziaływań spin-orbita, wartości zarówno dla elektronów jak i dziur. Wskazuje jednocześnie na brak zauważalnego odstępstwa od parabolicznego charakteru pasm dla badanych koncentracji nośników.

Podsumowując przedstawione osiągnięcie należy stwierdzić, że Autorka umiejętnie wykorzystała możliwości, jakie daje spektrometr EPR. Prezentowane prace wskazują na Jej solidny warsztat eksperymentalny. Ukazują one także istotny potencjał tej techniki w pomiarach własności swobodnych elektronów i dziur w badanych materiałach. Bezkontaktowe pomiary własności transportowych otwierają interesującą przestrzeń badawczą, co jasno pokazują prace stanowiące prezentowane dokonanie. Należy podkreślić także zastosowanie tej techniki do najbardziej „gorących” materiałów, takich jak GaN i struktury oparte na tym materiale [A2, A3, A4], czy też izolatory topologiczne [A5, A6]. Oprócz zdolności eksperymentalnych, potwierdzonych wynikami na uwagę zasługuje także ich umiejętna interpretacja.

Jedyną uwagą, którą wypadałoby w tym miejscu dodać jest kwestia tytułu dokonania. Autorka, także w opisie swojego osiągnięcia, używa pojęcia „nośników masy efektywnej” na określenie, jak się wydaje, nośników ładunku. Opisywane przez Autorkę własności elektronów i dziur dotyczą w dużej mierze transportu ładunku elektrycznego stąd odniesienie do przenoszenia masy efektywnej (co sugeruje wspomniane określenie) zamiast ładunku wydaje się być nie w pełni zrozumiałe. Tym bardziej, że omawiając pracę [A5] Autorka zwraca uwagę, że „natura stanów (powierzchniowych) odpowiedzialnych za rezonans jest topologiczna, z liniową zależnością dyspersyjną”. Zatem w odróżnieniu od nośników pasmowych w objętości  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , które charakteryzują się masą efektywną, nośniki na powierzchni zachowują się jak relatywistyczne fermiony opisywane dyspersją liniową charakteryzowaną prędkością Fermiego. Uwaga ta w oczywisty sposób nie umniejsza wysokiej oceny dokonania Autorki, a jej wzmiankowanie wynika z obowiązku Recenzenta.

Aktywność naukowa dr Wołoś obejmuje także inne zagadnienia, skoncentrowane głównie wokół technik rezonansu paramagnetycznego. Wśród bogatej literatury jej współautorstwa wymienić można oprócz badań bardziej klasycznych związków III-V, także związki organiczne czy też nanostruktury. Wskazuje to na otwartość Autorki na nowe zagadnienia i nowe tematyki, która dobrze rokuje jej dalszemu rozwojowi naukowemu.

Spoglądając na listę autorów publikacji zarówno wchodzących w skład osiągnięcia jak i dorobku nie sposób nie zauważyć szerokiego zakresu współpracy naukowej, w którą była i jest zaangażowana. Widać na tej liście grupy technologiczne, odpowiedzialne za wytwarzanie

unikatowych materiałów i struktur wywodzące się z Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych ( izolatory topologiczne) czy Instytut Wysokich Ciśnień PAN (materiały oparte na azotku galu). Można na niej znaleźć także m.in. badaczy z Uniwersytetu Johannesesa Keplera w Linzu w Austrii, gdzie Autorka przebywała na stażu podoktorskim [najczęściej (77 razy) cytowana praca [12] z listy IIA], z Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych w Grenoble [ praca [17] z listy IIA cytowana 39 razy] czy Uniwersytetu Marii Skłodowskiej Curie z Lublina (praca [1] z listy IIA.). Oczywista na tej liście jest także obecność szeregu grup badawczych z Uniwersytetu Warszawskiego i Instytutu Fizyki PAN, gdzie Autorka była w ostatnim okresie zatrudniona. Szeroki zakres współpracy naukowej potwierdzony jest także przez listę projektów, w których brała udział Autorka. Wśród nich znajdują się m.in. duże przedsięwzięcia w konkursie OPUS finansowane przez Narodowe Centrum Nauki: w latach 2012-2016 *Izolatory topologiczne 3D jako nowa kwantowa faza materii skondensowanej – wzrost i badania kryształów  $Bi_2Te_3$ ,  $Bi_2Se_3$  oraz  $Bi_2Te_2Se$* , czy przyznany w ostatnio rozstrzygniętym konkursie projekt *Magnetyczne izolatory topologiczne*. W obu wymienionych projektach Autorka pełni(ła) rolę Kierownika. Autorka była także kierownikiem projektu POL-POSTDOC III. Świadczy to dobrze o umiejętności pozyskiwania środków na badania naukowe, co stanowi jeden z istotnych elementów rozwoju badacza.

W uzupełnieniu informacji o działalności naukowej należy też wspomnieć indeks Hirsha Autorki, który jest równy 10, co świadczy o zainteresowaniu środowiska naukowego jej działalnością. Odpowiada on także zwykle przyjętym standardom biorącym pod uwagę okres 11 lat od uzyskania doktoratu. O zainteresowaniu wynikami Autorki dobrze świadczy także 7 referatów, do których wygłoszenia została zaproszona przez organizatorów konferencji naukowych w kraju i za granicą. Swoje wyniki prezentowała także wielokrotnie w formie komunikatów ustnych i plakatów na wielu konferencjach naukowych.

Wysoko należy ocenić także działalność dydaktyczną Autorki. Jej zdolności w zakresie kształcenia młodych badaczy potwierdza promotorstwo pomocnicze w przewodzie doktorskim mgr Sylwii Grankowskiej-Ciechanowicz, otwartym na Wydziale Fizyki UW w 2016 r, a także opieka nad dwiema pracami magisterskimi.

Biorąc pod uwagę wymienione w niniejszej recenzji fakty stwierdzam, że **osiągnięcie naukowe dr Agnieszki Wołoś dokonane po otrzymaniu stopnia doktora stanowi znaczny wkład w rozwój fizyki materii skondensowanej**. Przedstawione dokumenty wskazują także, że dr Wołoś **wykazuje się istotną aktywnością naukową**. W zgodzie z *Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* z dn. 14 marca 2003 r z późn. zm, (tekst jednolity Dz. U. z 2016 r. poz. 882) wnoszę zatem o nadanie jej stopnia naukowego doktora habilitowanego.

