



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii AGH

Kraków, 18.11.2024

dr hab. inż. Michał Nowak, prof. AGH
Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii
Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

Recenzja rozprawy doktorskiej Pani magister Anny Krzyżewskiej zatytułowanej „Spin-orbit driven transport effects in a two-dimensional electron gas with selected forms of Rashba and Dresselhaus spin-orbit interaction”

Przedłożona rozprawa doktorska została przygotowana przez Panią magister Annę Krzyżewską pod opieką Promotor dr hab. Anny Dyrdał, prof. UAM. Rozprawa przygotowana na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu zatytułowana jest „Spin-orbit driven transport effects in a two-dimensional electron gas with selected forms of Rashba and Dresselhaus spin-orbit interaction” i składa się z sześciu artykułów naukowych poprzedzonych rozbudowanym wstępem oraz uzupełnionych rozdziałami dodatkowymi. Głównym celem dysertacji jest opis własności transportu elektronowego dwuwymiarowych układów z oddziaływaniem spin-orbita w kontekście wzbudzenia polaryzacji spinowej, anomального i spinowego efektu Halla oraz efektów termoelektrycznych.

Heterostruktury półprzewodnikowe oraz interfejsy materiałów perowskitowych są sztanarowymi układami, w których realizowany jest dwuwymiarowy gaz elektronowy. Uwięzienie przestrzenne elektronów w jednym z wymiarów umożliwia m.in. obserwację kwantowego odpowiednika efektu Halla. Co istotne, łamanie symetrii inwersji w układach z dwuwymiarowym gazem elektronowym prowadzi do powstania sprzężenia pomiędzy spinowym a orbitalnym (przestrzennym) stopniem swobody elektronu, nazywanym sprzężeniem spin-orbita. Doktorantka postawiła sobie za cel

opis własności transportowych tego typu układów uwzględniając oddziaływania spin-orbita typu Rashby lub Dresselhausa, przy użyciu metod funkcji Greena w podejściu diagramatycznym. Badania przedstawione w dysertacji wpisują się w bieżące dążenia do praktycznej realizacji urządzeń elektroniki spinowej.

Od strony formalnej rozprawa to solidna, 135 stronicowa praca, przygotowana w języku angielskim, składająca się z 4 rozdziałów. Należy zwrócić uwagę, że jej główną część stanowi reprodukcja 6 opublikowanych artykułów w dobrych czasopismach branżowych. Sama struktura rozprawy jest moim zdaniem dobrze przemyślana.

Pracę rozpoczyna wstęp, który przybliży podstawowe koncepty leżące u podstaw badanych zjawisk. Jest to ciekawy przewodnik po fizyce dwuwymiarowych gazów elektronowych realizowanych w półprzewodnikach i tlenkach oraz zjawiskach spinowych. Wyjaśniane jest powstawanie dwuwymiarowego gazu w heterostrukturach oraz jego formowanie w ostatnio-intensywnie badanych układach LAO/STO. Doktorantka następnie opisuje w sposób ogólny oddziaływanie spin-orbita oraz jego rodzaje w ciele stałym, tj. sprzężenia Rashby i Dresselhausa.

W drugim rozdziale doktorantka przybliży metodologię swoich badań. Opisuje formalizm funkcji Greena, który pozwala obliczyć odpowiedź układu na zewnętrzne wzbudzenia. Rozdział ten jest zdecydowanie mile widziany w rozprawie składającej się z opublikowanych artykułów, które ze swojej natury nie posiadają zbyt rozbudowanego opisu podstaw wykorzystanych metod.

Trzeci rozdział nadaje kontekstu prowadzonym badaniom. Doktorantka przybliży w nim fizykę zjawisk: wzbudzonej prądem polaryzacji spinowej, anomalnego i spinowego efektu Halla, anomalnego efektu Nernsta i nieliniowego efektu Halla. Przedstawia obecny stan wiedzy cytując adekwatne artykuły i w tym kontekście umieszcza swoje badania odpowiednio je motywując i wskazując ich znaczenie dla rozwoju elektroniki spinowej.

Rozdział 4 dysertacji to już właściwe artykuły przedstawiające wyniki badań przeprowadzonych przez Doktorantkę. Na rozdział ten składa się 6 artykułów opublikowanych w recenzowanych czasopismach naukowych (Acta Physica Polonica, 2 X Physica Status Solidi RRL, 2 X Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Physica E). Każdy przedruk poprzedzony jest krótkim wstępem. Na pochwałę zasługuje umieszczony przy niektórych artykułach podrozdział rozszerzający bądź dogłębniej wyjaśniający analizę przedstawioną w opublikowanych pracach.

Artykuł A-1 zatytułowany „Temperature dependence of spin Hall effect in k-cubed Rashba model” bada spinowy efekt Halla w niemagnetycznym dwuwymiarowym gazie elektronowym (2DEG) z izotropowym oddziaływaniem Rashby w formie kubicznej. Spinowy efekt Halla jest

obecnie dobrze poznany w układach dwuwymiarowych z oddziaływaniem liniowym Rashby. W swojej pracy Doktorantka rozważa bardziej złożony układ, w którym oddziaływanie Rashby ma pędową zależność w 3 potęgze. Oddziaływanie takie może występować w dwuwymiarowych gazach elektronowych na złączach LAO/STO. Praca w szczególności skupia się na efektach spinowych w układach w niezerowej temperaturze. Do obliczeń wykorzystywany jest formalizm funkcji Matsubary Greena. W zakresie niskich temperatur Doktorantka odtwarza w swoim podejściu znany z literatury wynik, a wraz ze wzrostem temperatury obserwuje wysycanie się przewodności Halla zależne od koncentracji elektronowej. Artykuł jest krótki ale jest uzupełniony jest o dyskusję kąta spinowego efektu Halla oraz spinowy efekt Halla w magnetycznym 2DEG.

Ciekawe jest to, że przewodność Halla jest praktycznie stała i niezależna od temperatury dla specyficznej wartości koncentracji (około $0.4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$). Z czego to wynika i od czego zależy ta szczególna wartość koncentracji?

Kolejna praca [A-2] zatytułowana „Anomalous Hall and Nernst effects in 2D systems: role of cubic Rashba spin-orbit coupling” kontynuuje eksplorację wpływu kubicznego oddziaływania spin-orbita typu Rashby. Analizuje anomalną przewodność Halla (AHC) i jej termiczny odpowiednik, anomalną przewodność Nernsta (ANC) w dwuwymiarowym, magnetycznym gazie elektronowym. Doktorantka demonstruje, że niedysypatywna część anomalnej przewodności Halla, pochodząca ze stanów w morzu Fermiego, jest powiązana z krzywizną Berry'ego. Gdy energia stowarzyszona z siłą sprzężenia spin-orbita jest porównywalna z energią magnetyzacji otrzymywana jest najwyższa wartość przewodności Halla. Jeśli chodzi o anomalną przewodność Nernsta doktorantka wykazuje, że zmienia ona znak przed przejściem fazowym – co zostało również zaobserwowane eksperymentalnie.

Czytając pracę A-2 nasuwa mi się pytanie: czy tak małe zmiany przewodności jak przedstawione na Fig. 2 są możliwe do zaobserwowania eksperymentalnie?

Chciałbym również aby doktorantka skomentowała jak omawiane w artykule przewidywania dla AHC i ANC różnią się od tych uzyskanych przy klasycznym, liniowym sprzężeniu spin-orbita typu Rashby.

Artykuł A-3 pt. „Anomalous Hall and Nernst effects in a two-dimensional electron gas with an anisotropic cubic Rashba spin-orbit interaction” można uznać za bezpośrednią kontynuację poprzedniej pracy. Tutaj Doktorantka rozważa kubiczne oddziaływanie spin-orbita typu Rashby ale w postaci anizotropowej. Model ten ma zastosowanie zarówno do interfejsów tlenków perowskitowych, jak i heterostruktur półprzewodnikowych. Doktorantka ponownie bada zjawiska wywołane polem elektrycznym i gradientem temperatury. W przypadku niskich stężeń zanieczyszczeń anomalny efekt Halla ma charakter wewnętrzny, co oznacza, że jedynie stany w

morzu Fermiego mają wpływ na transport, a współczynnik AHC można opisać za pomocą krzywizny Berry'ego. W pracy wykazano, że zmiana znaku współczynnika ANC (anomalnego efektu Nernsta) zależy od temperatury, potencjału chemicznego oraz siły sprzężenia Rashby i oddziaływania wymiennego. Praca demonstruje, że jakościowo podobne wyniki uzyskiwane są dla obu typów oddziaływania kubicznego typu Rashby: izotropowego i anizotropowego.

Praca A-4 zatytułowana „Non-equilibrium spin polarization in magnetic two-dimensional electron gas with k-linear and k-cubed Dresselhaus spin-orbit interaction” opisuje polaryzację spinową indukowaną przepływem prądu w dwuwymiarowym gazie elektronowym, w którym dominuje sprzężenie spin-orbita typu Dresselhausa. Doktorantka rozważa podatność spinową w funkcji temperatury dla różnych form oddziaływania Dresselhausa (liniowa i kubiczna) i obecności lub braku oddziaływań magnetycznych. W układzie niemagnetycznym spiny polaryzowane są równoległe do przyłożonego pola. Kubiczne oddziaływanie Dresselhausa obniża polaryzację indukowaną prądem. W przypadku oddziaływań wymiennych pojawia się również odpowiedź prostopadła do pola elektrycznego. Przy użyciu relacji typu Mott'a obliczona jest również także niskotemperaturowa polaryzowalność spinowa wynikająca z gradientu temperatury. Tutaj zwrócona jest szczególna uwaga na przedział potencjału chemicznego, w którym polaryzowalność spinowa jest niezerowa. Sama praca jest systematyczna i dosyć rozbudowana, a w rozprawie suplementowana jest uzupełnieniem które analizuje anomalny efekt Halla w układzie.

Artykuł A-5 zatytułowany „Bilinear magnetoresistance in a 2DEG with isotropic cubic Rashba spin-orbit interaction” opisuje badania nad magnetorezystancją w 2DEG w obecności kubicznego, izotropowego oddziaływania typu Rashby. W szczególności rozważane jest zjawisko bi-liniowej magnetorezystancji (BMR) kiedy układ znajduje się w zewnętrznym, słabym polu magnetycznym. Doktorantka demonstruje, że sygnał BMR zmienia się sinusoidalnie wraz z kątem ustawienia pola magnetycznego w płaszczyźnie, osiągając maksymalną amplitudę, gdy pole magnetyczne jest prostopadłe do pola elektrycznego. Co więcej, wkład BMR jest najsilniejszy przy niższych koncentracjach nośników i zwiększa się wraz z wzrostem siły pola spin-orbitalnego Rashby. Na koniec zauważono, że choć silniejsze pole magnetyczne zwiększa wartości BMR, efekt ten można zaobserwować również przy stosunkowo słabym polu magnetycznym.

W kontekście tej pracy nasuwa mi się pytanie czy magnetorezystancją można by było sterować zewnętrznym polem elektrycznym przyłożonym prostopadle do próbki?

Jestem również ciekaw w jakich realistycznych temperaturach efekt magnetorezystancji mógłby zostać zaobserwowany?

Ostatnim artykułem zamieszczonym w rozprawie jest praca A-6 pt. „Nonlinear Hall effect in isotropic k-cubed Rashba model: Berry curvature-dipole engineering by in-plane magnetic field”, która koncentruje się na nieliniowym anomalnym efekcie Halla, który jest kontrolowany przez pole magnetyczne. Zastosowany model opisuje 2DEG z oddziaływaniem spin-orbita typu Rashby w formie kubicznej. Autorka wykazuje, że liniowy efekt Halla zdominowany jest przez wkład od krzywizny Berry'ego w przypadku słabego pola w płaszczyźnie. W zakresie większych pól magnetycznych zaczyna dominować składnik dyssypacyjny, związany ze stanami na poziomie Fermiego. W kontraście do tego wyniku to właśnie część dyssypacyjna kontroluje składnik nieliniowy anomalnego efektu Halla.

Jeśli dobrze rozumiem, to Doktorantka rozważa również pole magnetyczne przyłożone prostopadle do próbki. Jaki w tym przypadku będzie wpływ efektów orbitalnych na uzyskane wyniki?

Sama rozprawa napisana jest starannie, a wyniki i wstęp teoretyczny prezentowane są w sposób klarowny i czytelny. Artykuły naukowe wchodzące w skład rozprawy są ulokowane właściwie na tle obecnego stanu wiedzy wraz z odpowiednim odniesieniem do literatury. Przedstawiona rozprawa, w szczególności dzięki rozbudowanemu wstępowi, prezentuje ogólną wiedzę Doktorantki, zarówno z dziedziny fizyki ciała stałego jak i zjawisk spinowych oraz transportu elektronowego.

Prace zamieszczone w rozprawie w większości powstały w składzie: Doktorantka i Promotorka. Wyjątkiem są artykuły A-1 i A-2 powstałe w większym gronie autorów. Należy zauważyć, że we wszystkich pracach wchodzących w skład dysertacji Doktorantka jest pierwszą autorką, osobą, która otrzymała diskutowane wyniki, analizowała je oraz przygotowywała manuskrypty co poparte jest zgodnymi oświadczeniami samej Doktorantki, jak i współpracowników (współautorów). Powyższe świadczy o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktorantkę.

Cel rozprawy doktorskiej został dobrze określony i konsekwentnie zrealizowany, a tematyka, której dotyczy praca jest ciekawa i aktualna. Przedstawiona analiza jest dosyć monotematyczna, czego nie należy postrzegać jako aspekt negatywny rozprawy, a raczej konsekwentną realizację obranego tematu badań. Publikacja uzyskanych przez p. Krzyżewską wyników w brzożowych czasopismach świadczy, że praca doktorska jest samodzielnym rozwiązaniem problemu naukowego, a w tym przypadku problemu istotnego dla społeczności naukowej. Finalnie, przewidywane efekty dotyczą obecnie intensywnie eksplorowanych materiałów i ich atrakcyjnych z punktu widzenia aplikacyjnego własności.

Biorąc pod uwagę powyższe uważam, że rozprawa doktorska Pani magister Anny Krzyżewskiej spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w Ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym z dnia 20 lipca 2018 roku i wnioskuję o dopuszczenie Doktorantki do dalszych etapów postępowania doktorskiego oraz do publicznej obrony.



Michał Nowak

Ponadto biorąc pod uwagę aktualną tematykę pracy, wykorzystaną nietrywialną metodologię, ilość uzyskanych wyników, oraz jakość artykułów, które powstały w wyniku przeprowadzonych badań wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej p. Anny Krzyżewskiej.



Michał Nowak