

1. Imię i Nazwisko: Marta Borysiewicz
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.
 - Wrzesień 1999. Magister fizyki, praca pt. „Tunelowanie w strukturach z pojedynczą barierą AlAs” pod kierunkiem dra Jacka Przybytki
 - Grudzień 2004. Doktor nauk fizycznych w zakresie fizyki, z wyróżnieniem, praca pt. „Resonant Tunelling via Single Impurities in GaAs/AlAs/GaAs heterostructure” pod kierunkiem prof. Michała Baja
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych
 - styczeń-grudzień 2005 – staż podoktorski, Laboratoire de Photonique et de Nanostructures (aktualnie Centre de Nanosciences et de Nanotechnologie), CNRS, Marcoussis, Francja
 - od 03.2006 – zatrudnienie na stanowisku adiunkta z Zakładzie Fizyki Ciała Stałego, Instytut Fizyki Doświadczalnej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski
4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):
 - a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego:
Transport elektronowy w strukturach dla spintroniki opartych na GaAs
 - b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy)
 - B1. R. Giraud, **M. Gryglas**, L. Thevenard, A. Lemaître, and G. Faini, „Voltage-controlled tunneling anisotropic magnetoresistance of a ferromagnetic p^{++} -(Ga,Mn)As/ n^{+} -GaAs Zener-Esaki diode”, Appl. Phys. Let. **87**, 242505 (2005).
 - B2. B. Jouault, **M. Gryglas**, M. Baj, A. Cavanna, U. Gennser, G. Faini, D. K. Maude, *Spin filtering through a single impurity in a GaAs/AlAs/GaAs resonant tunneling device*, Phys. Rev. B, **79**, 041307(R), (2009).
 - B3. **M. Gryglas-Borysiewicz**, A. Kwiatkowski, M. Baj, D. Wasik, J. Przybytek, and J. Sadowski, *Hydrostatic pressure study of the paramagnetic-ferromagnetic phase transition in (Ga,Mn)As*, Phys. Rev. B **82**, 153204 (2010).
 - B4. P. Juszyński, **M. Gryglas-Borysiewicz**, J. Szczytko, M. Tokarczyk, G. Kowalski, J. Sadowski, D. Wasik, *Magnetic anisotropy investigations of (Ga,Mn)As with a large epitaxial strain*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials **396**, 48 (2015), IF: 1.97
 - B5. **M. Gryglas-Borysiewicz**, A. Kwiatkowski, A. Lemaître, J. Przybytek, K. Budzik, Ł. Balcerzak, M. Sawicki, D. Wasik, *Magnetotransport Investigations of (Ga,Mn)As/GaAs Esaki Diodes under Hydrostatic Pressure*, Applied Surface Science, **396**, 1875 (2017).

MB.

B6. **M. Gryglas-Borysiewicz**, P. Juszyński, A. Kwiatkowski, J. Przybytek, J. Sadowski, M. Sawicki, M. Tokarczyk, G. Kowalski, T. Dietl and D. Wasik, "Hydrostatic-pressure-induced changes of magnetic anisotropy in (Ga,Mn)As thin films", przyjęta do druku w J. Phys.: Condens. Matter i dostępna na stronie Wydawcy pod adresem: <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aa546d>

- c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

4.1. Wstęp

Hasło spintronika pojawiło się pod koniec lat 90-tych XX wieku [1,2] jako skrót od elektronika spinowa, czyli elektronika wykorzystująca spin elektronu, a nie – jak to tradycyjnie ma miejsce – jego ładunek. Aby jednak przeprowadzać manipulacje spinem, należy najpierw przygotować nośniki spolaryzowane spinowo, następnie zadbać o transport spinu w obszar roboczy urządzenia, gdzie należy nim operować, aby zapewnić odpowiednią funkcjonalność, wreszcie trzeba umieć odczytać stan spinowy nośnika. Ten ogólny schemat oznacza konieczność zrozumienia fundamentalnych praw rządzących zachowaniem spinu w materii skondensowanej, poznania i zrozumienia procesów dekoherencji spinu tak w poszczególnych materiałach (metalach, półprzewodnikach), jak i przy przejściu nośnika między różnymi ośrodkami.

Podwalinami tej tematyki są rozwijane w Polsce, począwszy od lat 70-tych XX wieku, badania półprzewodników półmagnetycznych, głównie grupy II-VI [3-9]. Pokazano w nich kluczowe dla układów półprzewodników z jonami magnetycznymi oddziaływanie wymienne spinów nośników zlokalizowanych ze spinami nośników zdelokalizowanych (pasmowych). W tych paramagnetycznych materiałach możliwe było uzyskanie bardzo silnej polaryzacji spinowej nośników pasmowych przy zastosowaniu zewnętrznego pola magnetycznego. Badania półprzewodników grupy IV-VI z jonami magnetycznymi [10-12] ujawniły obecność fazy ferromagnetycznej, dla istnienia której potrzebne były swobodne nośniki. O ile domieszkowanie półprzewodników z grupy II-VI jonami magnetycznymi, nie wprowadzało nośników swobodnych i aby je uzyskać, konieczne było kodomieszkowanie, o tyle dla półprzewodników z grupy III-V, metal przejściowy był jednocześnie naturalną domieszką i dostarczał swobodnych nośników. Niestety, ze względu na niską rozpuszczalność pierwiastków magnetycznych, trudno było je wprowadzić w odpowiednio wysokich koncentracjach¹. Jakościową zmianą było otrzymanie – metodą nierównowagową: niskotemperaturową epitaksją z wiązek molekularnych (LT-MBE) - jednorodnego, rozcieńczonego $\text{In}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ dla x sięgających aż 0.18, o charakterze paramagnetycznym [13]. Niedługo potem udało się zaobserwować fazę ferromagnetyczną w InMnAs [14] i GaMnAs [15,16], z relatywnie wysoką temperaturą Curie – 110 K² [16]. Wywołało to lawinowe zainteresowanie półprzewodnikami ferromagnetycznymi, z których jednym z intensywniej badanych jest arsenek galu z manganem.

Ponieważ tematyka tej pracy w znacznej mierze dotyczy (Ga,Mn)As, w sposób zwarty omówione zostaną jego własności. Wielki wysiłek badawczy, tak eksperymentalny jak i teoretyczny, prowadzony przez wiele grup badawczych, w

¹ np. najwyższe koncentracje Mn uzyskane w objętościowym GaMnAs sięgają 0.05% [13]

² Rekordowo wysokie T_c sięga obecnie w (Ga,Mn)As 200 K. Aktualnie nie widać dróg, które miałyby doprowadzić do istotnej zmiany tej wartości. W tym sensie badania tego materiału mają charakter badań podstawowych i służą poznaniu. Natomiast zbadane i zrozumiane zjawiska udaje się przełożyć na grunt układów metalicznych [np. [18], [19]].

wielu ośrodkach na świecie [17], doprowadził do dobrego opisu fizyki tego półprzewodnika. Wiadomo, że w zakresie niskich koncentracji domieszka Mn podstawiająca Ga jest płytkim akceptorem (A^{-10} z energią wiązania około 100 meV) i występuje w konfiguracji Mn^{2+} ($3d^5$). Wnosi zatem zlokalizowany moment magnetyczny $S = 5/2$. Mn może też, ze względu na niskie temperatury wzrostu znaleźć się w pozycji międzywęzłowej, w której jest podwójnym donorem z $S = 2$ i sprzęga się antyferromagnetycznie z podstawieniowymi manganami [20]. Prowadzi to do częściowej kompensacji ładunku i namagnesowania. Pojawiają się też innego rodzaju defekty, typowe dla niskotemperaturowego GaAs [21], np. antystrukturalny arsen (As_{Ga}), który jest podwójnym donorem.

Ze względu na niską temperaturę wzrostu (Ga,Mn)As jest materiałem z bardzo dużym nieporządkiem, a od koncentracji wspomnianych defektów zależy ruchliwość i koncentracja nośników swobodnych. Materiał ten może mieć zarówno charakter izolujący, z typowym wzrostem oporności w niskich temperaturach, jak i metaliczny, ze słabą zależnością od temperatury, na której tle obserwowane jest maksimum oporu w okolicach temperatury Curie (T_c). Ciekawa jest kwestia zależności temperatury przejścia z fazy paramagnetycznej do ferromagnetycznej od koncentracji dziur. O ile dla bardzo małych zawartości Mn (Ga,Mn)As jest izolatorem z typowym hoppingowym przewodnictwem i wykazuje własności paramagnetyczne, to istnieje taki przedział zawartości Mn (koncentracji dziur), w którym mimo nadal wysokich, typowych dla izolatorów wartości oporności, pojawia się faza ferromagnetyczna. Dalsze zwiększanie zawartości Mn i koncentracji dziur prowadzi do zwiększania się temperatury Curie. Kluczowy udział dziur dla oddziaływania ferromagnetycznego został ujęty przez opis teoretyczny oparty o model $p-d$ Zenera [22, 23]. Gdy dziur swobodnych jest dużo, dalekozasięgowe uporządkowanie bierze się z oddziaływania wymiany między zlokalizowanymi spinami elektronów $3d^5$ Mn a zdelokalizowanymi dziurami. Sytuację pośrednią opisuje model dwucieczkowy, w którym część dziur lokalizuje się (na parach akceptorów Mn^{+2}), tworząc polarony magnetyczne, lokalnie sprzęgające momenty magnetyczne Mn, które następnie oddziałują za pośrednictwem swobodnych dziur. Przy braku swobodnych nośników faza ferromagnetyczna nie powstaje.

Hamiltonian oddziaływania dziur swobodnych i zlokalizowanych dla zawartości Mn równej x dany jest przez $H = -N_0 J_{pd} x \langle S \rangle \cdot s$, gdzie N_0 jest koncentracją węzłów kationowych, $x \langle S \rangle$ ich efektywnym spinem (czyli $\mu_B \cdot N_0 x \langle S \rangle$ to namagnesowanie układu zlokalizowanych spinów), s spinem elektronu, a J_{pd} całką wymiany. Oddziaływanie wymienne bardzo silnie modyfikuje pasmo walencyjne (Ga,Mn)As w stosunku do GaAs: obserwuje się zniesienie degeneracji dziur ciężkich i lekkich w punkcie Γ , w szczególności różne gęstości stanów dla przeciwnych spinów oraz silną anizotropię powierzchni Fermiego, zależną od kierunku namagnesowania. Inną przyczyną skomplikowanej struktury pasmowej jest strukturalna anizotropia tego materiału. Warstwy (Ga,Mn)As hodowane są na buforach, które narzucają stałą sieci w płaszczyźnie i powodują, że warstwa jest naprężona w płaszczyźnie (naprężenie ściskające dla GaAs, zwykle rozciągające dla InGaAs). Deformacja komórki elementarnej w płaszczyźnie warstwy wywołuje naprężenie w kierunku wzrostu. Efekty te prowadzą do dodatkowej modyfikacji kształtu powierzchni Fermiego. Anizotropia na poziomie struktury pasmowej

przekłada się na anizotropię magnetyczną tego materiału³. Złożone przyczyny istnienia anizotropii dają, z kolei, wiele możliwości sterowania nią poprzez zmianę temperatury [24, 25] czy koncentracji [26] oraz naprężeń [27, 28]. Ten ostatni problem - wpływ naprężeń na anizotropię magnetyczną (Ga,Mn)As, zarówno wynikających z niedopasowania sieciowego, jak i ciśnienia hydrostatycznego, został zbadany w pracach [B4, B6] włączonych do niniejszej rozprawy, zaś wpływ ciśnienia hydrostatycznego na temperaturę Curie – w pracy [B3].

Pierwszym zastosowaniem (Ga,Mn)As w spintronice była realizacja diody Esakiego (Ga,Mn)As/GaAs, w której dla polaryzacji zaporowej mamy do czynienia z tunelowaniem elektronów z pasma walencyjnego (Ga,Mn)As do niezapełnionych stanów pasma przewodnictwa GaAs [29, 30]. Detekcję przeprowadzano optycznie, badając stopień polaryzacji luminescencji z szeregowo umieszczonej studni kwantowej. Dzięki istniejącej w złączu barierze tunelowej, wstrzykiwanie spinów zachodziło bardzo efektywnie [31] i polaryzacja spinowa wstrzykiwanych nośników wyniosła 80% [32]. Dioda Esakiego jest również interesująca ze względu na badania samego (Ga,Mn)As. O ile typowo⁴ w pomiarach elektrycznych sonduje się gęstość stanów o energiach z okolicy poziomu Fermiego, o tyle zastosowanie diody umożliwia – dzięki polaryzacji – udział w prądzie nośników o energiach znacznie poniżej poziomu Fermiego. To otwiera możliwości spektroskopii gęstości stanów tunelujących nośników, z czego efektywnie korzystano w przedstawionym w ramach niniejszej rozprawy cyklu prac [B1, B2, B5].

4.2. Opis osiągnięcia naukowego

Prezentowane osiągnięcie dotyczy dwóch podstawowych problemów spintroniki: (1) własności samego materiału ferromagnetycznego (Ga,Mn)As oraz (2) procesu tunelowania spinowo spolaryzowanych nośników. W badaniach użyto warstw (Ga,Mn)As uzyskanych na różnych nieprzewodzących buforach, struktury tunelowej GaAs/AlAs/GaAs z pojedynczą barierą oraz diód Esakiego (Ga,Mn)As/GaAs. Badania doświadczalne prowadzono metodami transportu elektronowego, głównie w niskich temperaturach (1.5 K – 200 K), w polach magnetycznych do 12T, dodatkowo posilając się pomiarami namagnesowania (SQUID) oraz dyfrakcji rentgenowskiej. Wedle posiadanej wiedzy, po raz pierwszy zbadano wpływ zewnętrznego ciśnienia hydrostatycznego na własności diód Esakiego z jonami magnetycznymi (Ga,Mn)As/GaAs.

Rezultatem przeprowadzonych badań, ujętych w moim osiągnięciu naukowym, jest między innymi wykazanie, jak temperatura Curie warstw (Ga,Mn)As i stała anizotropii magnetycznej tego materiału ewoluują pod wpływem naprężenia wywołanego ciśnieniem hydrostatycznym. Przeanalizowany został wpływ rekordowo silnego naprężenia epitaksjalnego na anizotropię magnetyczną (Ga,Mn)As. Kolejnym z osiągnięć rozprawy jest zbadanie anizotropii podpasma pasma walencyjnego (Ga,Mn)As w strukturze diody Esakiego. Udokumentowano różny wkład poszczególnych podpasem do prądu tunelowego. Pokazano, że dla

³ Dla cienkich warstw znaczący jest też wkład od pola demagnetyzacji. Obserwuje się ponadto jednoosiową anizotropię w płaszczyźnie, przypisywaną istnieniu dimerów Mn-Mn, które preferencyjnie występują wzdłuż kierunku [-110].

⁴ np. w pomiarach oporności czy pomiarach zjawiska Halla

próbek z dużą zawartością manganu, ciśnienie hydrostatyczne tylko w nieznacznym stopniu zmienia tę anizotropię. Wyjaśniono charakterystyki prądowo-napięciowe złączy, wskazując na istotną rolę tunelowania z udziałem stanów w przerwie wzbronionej. Dla diody Esakiego z ferromagnetyczną okładką, polaryzacja spinowa nośników była zadana przez rozszczepienie wymienne pasma walencyjnego. Proces tunelowania z zachowaniem spinu zbadano również w materiale bez jonów magnetycznych (GaAs), wywołując polaryzację spinową nośników polem magnetycznym (zjawisko Zeemana). Pokazano, że spinowo spolaryzowane nośniki zachowują swój spin w procesie tunelowania przez stany domieszek.

4.3. Tematyka prac stanowiących osiągnięcie naukowe

Bezpośrednią motywacją powstania pracy [B1] była publikacja Ch. Gould'a i in. z grupy prof. Molenkampa w Wuerzburgu [33], w której dla pojedynczej warstwy (Ga,Mn)As, oddzielonej od metalicznego kontaktu cienką warstwą izolatora, zaobserwowano dwustanowe przełączanie się oporności pod wpływem pola magnetycznego (funkcjonalność zaworu spinowego), jak w układach z dwiema magnetycznymi warstwami metalicznymi. Zjawisko to, nazwane TAMR – tunelowym anizotropowym magnetooporem, jest konsekwencją anizotropii pasma walencyjnego, w którym rozkład gęstości stanów zmienia się wraz ze zmianą orientacji namagnesowania. Drugą cechą, dzięki której efekt udało się zarejestrować, jest zachowanie (przynajmniej częściowe) wektora falowego elektronu w płaszczyźnie warstwy podczas tunelowania. Podjęto próbę weryfikacji, czy i w jaki sposób podobne zjawisko będzie obserwowane w diodzie Esakiego, z jedną okładką z (Ga,Mn)As i barierą, którą tworzy warstwa ładunku przestrzennego złącza. Dodatkową motywacją była znakomita sprawność wprowadzania spinowo-spolaryzowanych nośników do niemagnetycznego GaAs, zaobserwowana przez van Dorpe et al. [32] dla diody Esakiego z (Ga,Mn)As.

Warstwy (Ga,Mn)As/ GaAs zostały otrzymane metodą epitaksji z wiązki molekularnej, po czym za pomocą litografii optycznej wytrawiono struktury typu 'mesa', do których wykonano odpowiednie metalizacje, w celu uzyskania kontaktów omowych do części GaAs i (Ga,Mn)As. Otrzymane próbki miały T_c około 50 K i oś łatwego namagnesowania w płaszczyźnie. Przeprowadzono pomiary zależności prądu od napięcia pod nieobecność pola oraz z polem prostopadłym do warstw (Ga,Mn)As/GaAs. Zaobserwowano efekt TAMR: pokazano, że opór⁵ takiego złącza istotnie zależy od kierunku namagnesowania (sterowanego polem B), na dodatek *zależnie od zakresu napięcia – w wyniku przyłożenia pola magnetycznego, opór ten rośnie lub maleje*. Nietrywialną zależność od napięcia (monotoniczny wzrost TAMR wraz ze zwiększaniem się wartości napięcia w kierunku zaporowym i niemonotoniczny przebieg dla napięć w kierunku przewodzenia), daje się jakościowo wytłumaczyć udziałem różnych podpasm pasma walencyjnego w tunelowaniu. Zjawisko to daje zatem wgląd w strukturę elektronową pasma walencyjnego. Wyniki eksperymentalne zostały nieco później potwierdzone rachunkami [34], w których Autorzy odtworzyli niemonotoniczny charakter TAMR.

⁵ W literaturze, przez analogię do struktur metalicznych, często używa się pojęcia opór nawet dla elementów z nieliniowymi zależnościami $I(U)$. Wtedy najczęściej jest on rozumiany jako $R=U/I$. Prowadzi to, niestety, często do konfuzji. W kolejnych pracach posługiwano się pojęciem magnetoprądu zamiast magnetooporu.

Zagadnienie tunelowania spinowo spolaryzowanych nośników jest tematem pracy [B2]. W tej pracy postanowiono wykorzystać do badań submikronowe złącza tunelowe GaAs/AlAs+ δ -doping/GaAs, badane uprzednio [35, 36] pod nieco innym kątem (do badań spektroskopii gazu elektronowego i domieszki). Umieszczenie domieszek w barierze tunelowej prowadzi do wzrostu współczynnika transmisji dla elektronów o energiach równych energiom stanów domieszkowych, a zastosowanie submikronowych złączy umożliwia zredukowanie liczby domieszek (stanów w barierze). Napięcie polaryzacji przykładane do złącza pozwala na badanie gęstości stanów w studni kwantowej, z której tunelują nośniki (tj. w emiterze). Układ ten został wykorzystany do badań w dziedzinie elektroniki spinu. Aby wywołać polaryzację spinową gazu elektronowego przykładano pole magnetyczne w płaszczyźnie studni kwantowej. Pole to wywołało również rozszczepienie spinowe stanów płytkiego donora w barierze. Poprzez obserwację rozszczepień struktur lokalnej gęstości stanów emitera w prądzie tunelowym oraz obserwację wpływu temperatury na charakterystyki $I(V)$, udało się rozróżnić w prądzie struktury związane ze stanami emitera i ze stanami domieszek. Na tej podstawie wyznaczono czynniki Lande'go obydwu, i - co więcej - można było wnioskować o zachowaniu spinu w procesie tunelowania. Okazało się, iż mimo że tunelowanie zachodzi za pośrednictwem stanów domieszek, to dominujący wkład do prądu mają procesy tunelowania z zachowaniem spinu.

W ramach dalszych badań dotyczących arsenku galu z manganem, zbadano wpływ ciśnienia hydrostatycznego na własności warstw (Ga,Mn)As. Można się spodziewać, że oddziaływanie między jonami manganu, prowadzące do ferromagnetyzmu, będzie zależało od odległości między nimi. W pracy [B3] wyznaczono i przeanalizowano wpływ ciśnienia na temperaturę przejścia z fazy paramagnetycznej do ferromagnetycznej. W literaturze znana wtedy była jedna praca na ten temat [37], pochodząca z grupy jednego z pionierów badań (Ga,Mn)As, prof. Jacka Furdyny. Autorzy pokazali w niej wzrost T_c pod ciśnieniem dla próbki (Ga,Mn)As z 7.5% zawartością manganu (rzędu 2 K / 1 GPa), śledząc ewolucję maksimum zależności oporności od temperatury $\rho(T)$. Jednocześnie Autorzy zasygnalizowali problemy z pomiarami anomalnego efektu Halla, a wyniki przedstawione w doktoracie pierwszego autora pracy [38, rys. 4.5] stały w sprzeczności z wynikami ze wspomnianej publikacji. Fakt ten stanowił motywację badań zarówno ciśnieniowej ewolucji oporności od temperatury, jak i napięcia Halla. Badania przeprowadzono na dwóch próbkach o temperaturach Curie 85 K i 50 K, otrzymanych metodą LT-MBE, o istotnie różnym charakterze zależności oporności od temperatury $\rho(T)$. Pierwsza miała charakter metaliczny w niskich temperaturach i wyraźne maksimum związane z rozpraszaniem krytycznym w pobliżu T_c , co jest typowe dla badanych w literaturze próbek. Druga - charakter bardziej izolujący, cechujący się wzrostem oporności wraz z obniżaniem temperatury z ledwie zarysowanym maksimum. Podstawowy wynik eksperymentalny pracy [B3] to stwierdzenie, że obie omawiane próbki mają różne zależności ciśnieniowe temperatury Curie: dla pierwszej T_c rośnie wraz z ciśnieniem, dla drugiej - maleje. Była to pierwsza w literaturze naukowej obserwacja zmniejszania się temperatury Curie w (Ga,Mn)As wraz ze wzrostem ciśnienia. Drugi istotny wynik pracy [B3] dotyczy metodyki: pokazano, że o ile dla pierwszej próbki - wykazującej własności metaliczne - obie metody, wyznaczania T_c : z zależności oporności $\rho(T)$ i z napięcia Halla, prowadzą do takiej samej wartości temperatury krytycznej i jej ciśnieniowej ewolucji, o tyle dla drugiej - wyniki dwóch zastosowanych metod są sprzeczne (zarówno jeśli chodzi o wartość T_c jak i

dT_c/dp). W pracy [B3] po raz pierwszy zwrócono uwagę na ograniczoną stosowalność metody wyznaczania T_c bazującej na pomiarze zależności oporności od temperatury dla próbek o charakterze niemetalicznym. Tematyka ta została rozwinięta przez dr A. Kwiatkowskiego w publikacji [39], której jestem współautorem.

Zachowanie typowej, metalicznej próbki (Ga,Mn)As, w której T_c rośnie wraz ze wzrostem ciśnienia, zostało z powodzeniem wyjaśnione zgodnie z modelem RKKY [23], w którym mechanizmem prowadzącym do sprzężenia ferromagnetycznego jest podwójna wymiana między zlokalizowanymi momentami magnetycznymi za pośrednictwem zdelokalizowanych dziur pasma walencyjnego. Przewidziana przez wzór (7) w tej pracy zależność T_c od ciśnienia, w której uwzględniliśmy: zmianę objętości komórki elementarnej pod ciśnieniem i wynikającą z niej zmianę koncentracji, zmianę energii wymiany i zmianę masy efektywnej pod ciśnieniem, zgodziła się ilościowo z eksperymentem. Dodatkowo, także rachunki przeprowadzone w 2012 [40] dały wynik zgodny z eksperymentem przeprowadzonym dla próbki metalicznej. Zachowanie próbki o charakterze izolującym wykraczało jednak poza ten model. Zostało ono wyjaśnione jakościowo – trendy obserwowane dla domieszki Mn podstawiającej pierwiastek III grupy w związkach III-V pokazują, że im mniejsza stała sieci, tym akceptor Mn jest bardziej zlokalizowany. Z kolei wzrost lokalizacji powoduje obniżenie T_c [41]. Należy zwrócić uwagę, że standardowym założeniem stosowanym podczas próby wyjaśnienia ciśnieniowych zmian T_c w ramach cytowanych modeli [23, 40], jest niezależność od ciśnienia całkowitej liczby dziur uczestniczących w podwójnej wymianie odpowiedzialnej za ferromagnetyzm. W związku z obserwacjami, że istnieją próbki, w których T_c rośnie pod ciśnieniem oraz takie, w których T_c maleje, prowadzone są prace doświadczalne zmierzające do ustalenia czy założenie o niezależności całkowitej liczby dziur od ciśnienia jest rzeczywiście uzasadnione – być może ewolucja koncentracji dziur wraz ciśnieniem dla próbek metalicznych i izolujących przebiega różnie.

W kolejnej pracy [B4] skoncentrowano się na własnościach magnetycznych fazy ferromagnetycznej (Ga,Mn)As. Ze względu na skomplikowaną strukturę pasma walencyjnego w obecności namagnesowania oraz ze względu na pole demagnetyzacji, w (Ga,Mn)As obserwuje się anizotropię namagnesowania. Wyróżnia się osie, wzdłuż których ustawienie namagnesowania jest preferowane (odpowiadają one minimum gęstości energii swobodnej Gibbsa). Zaobserwowano, że istotny wpływ na anizotropię ma naprężenie warstwy, najczęściej wywołane wzrostem próbki na niedopasowanym sieciowo buforze. Znane były systematyczne badania [np. 27, 28] pokazujące, jak naprężenie w warstwie wpływa na parametry anizotropii (fenomenologiczne parametry pozwalające na opis anizotropii magnetycznej w (Ga,Mn)As), w szczególności w przypadku anizotropii pozapłaszczyznowej. Badania istotnie rozszerzono, przeprowadzając pomiary na cienkiej warstwie (Ga,Mn)As z rekordowym niedopasowaniem sieciowym 2% (naprężeniem ε_{zz} równym -1.8% wobec -0.4% raportowanym do tej pory w literaturze). Taką próbkę otrzymał dr hab. Janusz Sadowski poprzez zastosowanie bufora $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. W tym miejscu należy wspomnieć, że samo wytworzenie takiej próbki stanowiło istotne osiągnięcie technologiczne. Przeprowadzono pomiary napięcia Halla dla różnych temperatur i na podstawie modelowania energii swobodnej wyznaczono zależność stałej anizotropii (oznaczonej w pracy jako B_A) od temperatury. Okazało się, że wyznaczona przez nas dla niskich temperatur wartość B_A znakomicie układa się na prostej opisującej zależność $B_A(\varepsilon_{zz})$,

wyznaczoną przez M. Glunka dla wartości $|\varepsilon_{zz}| \leq 0.4\%$. Otrzymany wynik pokazuje możliwość sterowania, w szerokim zakresie, anizotropii pozapłaszczynowej poprzez dobór bufora. Jednocześnie pokazano, że zależność stałej anizotropii pozapłaszczynowej od temperatury jest taka, jak zależność namagnesowania od temperatury, co pozwala stwierdzić ważną zależność łączącą stałą anizotropii magnetycznej i namagnesowanie, $B_A \sim M$, zgodnie z [42].

Poznaawszy wpływ ciśnienia na temperaturę Curie (Ga,Mn)As powrócono do badań diód Esakiego, by sprawdzić, jak ciśnienie hydrostatyczne wpływa na obserwowany w pracy [B1] tunelowy anizotropowy magnetoopór, a zatem by pośrednio zbadać strukturę pasma walencyjnego. Wyniki tych badań opisane są w pracy [B5]. Można się było spodziewać, że jeśli pasmo walencyjne utworzone jest ze stanów 3d manganu oraz stanów 4p arsenu, to ze względu na różny stopień lokalizacji tych stanów, możliwe jest przegrupowanie tych stanów pod ciśnieniem. W badaniach skoncentrowano się na złączach o zawartości Mn równej 5.8% i temperaturze Curie 107 K. Zaobserwowano, iż charakterystyki prądowo-napięciowe złączy odbiegają jakościowo od tych spodziewanych dla diody Esakiego, gdzie dla napięć w kierunku przewodzenia obserwuje się ujemny różniczkowy opór – badane złącza miały dwueksponencjalną charakterystykę. W analizie pochodnej logarytmicznej prądu wskazano ślady tunelowania bezpośredniego między pasmami (walencyjnym (Ga,Mn)As i przewodnictwa GaAs), które zostało zdominowane przez „nadmiarowy” prąd tunelowy (ang. „excess current”) pochodzący od procesów tunelowania z udziałem stanów wewnątrzprzerwowych, najprawdopodobniej stanów domieszek. Pokazano, że efekty TAMR w bardzo niewielkim stopniu zależą od ciśnienia: mały wzrost TAMR zaobserwowano dla kierunku zaporowego. Opowiada on sytuacji, w której tunelowanie następuje spod poziomu Fermiego w (Ga,Mn)As do pasma przewodnictwa w GaAs – zatem konfiguracji, w której zademonstrowano efektywne wstrzykiwanie nośników spinowo-spolaryzowanych. Ponieważ wartość TAMR w przybliżeniu skaluje się ze stopniem polaryzacji spinowej [43], można spodziewać się jego wzrostu wraz z ciśnieniem.

Zwieńczeniem tego cyklu prac jest praca [B6]. W pracy [B3] pokazano, że ciśnienie hydrostatyczne wpływa na temperaturę Curie (Ga,Mn)As. W pracy [B4] pokazano, że stała anizotropii pozapłaszczynowej skaluje się z naprężeniem warstwy. W omawianej pracy [B6] przeprowadzono systematyczne badania wpływu naprężenia wywołanego ciśnieniem hydrostatycznym na stałe anizotropii. Badania dotyczyły anizotropii pozapłaszczynowej, jednoosiowej oraz kubicznej. Przeprowadzono je na dwóch próbkach: jednej z niewielkim naprężeniem ściskającym, drugą – ze znacznym naprężeniem rozciągającym (wzrost na różnych buforach). Opierając się na pomiarach anomalnego i planarnego efektu Halla wyznaczono ewolucję namagnesowania. Korzystając z modelowania energii swobodnej, wyznaczono stałe anizotropii w zależności od temperatury i ciśnienia do 1 GPa. Wedle posiadanej wiedzy, zależność stałych anizotropii magnetycznej (Ga,Mn)As od ciśnienia hydrostatycznego została wyznaczona po raz pierwszy. Przeprowadzone badania pokazały generalny trend: pod ciśnieniem hydrostatycznym (Ga,Mn)As staje się magnetycznie „sztywniejszy”. Stwierdzono ponadto, że stała anizotropii pozapłaszczynowej rośnie z ciśnieniem. Wzrost ten jakościowo zgadza się z przewidywaniami modelu Zenera, aczkolwiek przewidywane wartości stałych oraz ich trendy ciśnieniowe okazały się w modelu

systematycznie zaniżone. Ciśnienie hydrostatyczne powoduje wzrost (co do modułu) stałych anizotropii kubicznej i jednoosiowej o odpowiednio 30% i 20%. Tę ostatnią wartość odniesiono do modelu anizotropii jednoosiowej [44]. Zgodnie z nim należy się spodziewać wzrostu anizotropii, aczkolwiek o znacznie mniejszej wartości.

4.4. Podsumowanie

W przedstawionym cyklu prac skoncentrowano się na zbadaniu własności (Ga,Mn)As oraz procesu tunelowania nośników spolaryzowanych spinowo. Udokumentowano tunelowy anizotropowy magnetoopór w (Ga,Mn)As, najpierw w ciśnieniu atmosferycznym [B1], następnie w wysokich ciśnieniach hydrostatycznych [B5]. Pokazano, że spinowo spolaryzowane nośniki zachowują swój spin w procesie tunelowania przez stany domieszek [B2]. Wyznaczono wartości anizotropii magnetycznej w rekordowo silnie, epitaksjalnie naprężonej warstwie (Ga,Mn)As [B4]. Zbadano wpływ zewnętrznego naprężenia wprowadzonego przez ciśnienia hydrostatyczne na anizotropię (Ga,Mn)As [B6] oraz na temperaturę przejścia z fazy paramagnetycznej do ferromagnetycznej [B3].

Literatura:

- [1] Datta, S. & Das, B. Electronic analog of the electro-optic modulator. Appl. Phys. Lett. 56, 665 (1990)
- [2] S. A. Wolf, D. D. Awschalom, R. A. Buhrman, J. M. Daughton, S. von Molnár, M. L. Roukes, A. Y. Chtchelkanova, D. M. Treger, Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future, Science 294. 1488 (2001)
- [3] R.R. Gałązka, Proceedings of the 14th International Conference on the Physics of Semiconductors (ed. Wilson, B. L. H.) 133 (Institute of Physics, Bristol, 1978)
- [4] J.A. Gaj, J. Giner, R.R. Gałązka, Exchange Interaction of Manganese 3d5 States with Band Electrons, phys. stat. sol (b), 89, 655 (1978)
- [5] J.A. Gaj, R. Planel, G. Fishman, Relation of magneto-optical properties of free excitons to spin alignment of Mn²⁺ ions in Cd_{1-x}MnxTe, Solid State Commun. 29, 435 (1977)
- [6] M. Nawrocki, R. Planel, G. Fishman, and R. Gałązka, Exchange-Induced Spin-Flip Raman Scattering in a Semimagnetic Semiconductor, Phys. Rev. Lett. 46, 735 (1981)
- [7] A. Twardowski, M. Nawrocki, J. Ginter, Excitonic magnetoabsorption in Cd_{1-x}MnxTe mixed crystals, phys. Stat. sol 96, 497 (1979)
- [8] J. Kossut, On the scattering of conduction electrons by magnetic impurities in semiconductors of InSb-type and HgTe-type band structure, Physica Status Solidi B-Basic Research, 72, 359 (1975)
- [9] M. Jaczynski, J. Kossut, R. R. Gałązka, Influence of exchange interaction on the quantum transport phenomena in Hg_{1-x}MnxTe, Physica Status Solidi B-Basic Research, 88, 73 (1978)
- [10] M. Rodot, J. Lewis, H. Rodot, G. Villers, J. Cohen, and P. Mollard, J. Phys. Soc. Jap. Suppl. 21, 627 (1966).
- [11] R. W. Cochrane, M. Plischke, and J. O. Strom-Olsen, Magnetization studies of (GeTe)_{1-x}(MnTe)_x pseudobinary alloys, Phys. Rev. B 9, 3013 (1974)
- [12] T. Story, R.R. Gałązka, R. B. Frankel and P. A. Wolff, Carrier-concentration-induced ferromagnetism in PbSnMnTe, Phys. Rev. Lett. 56, 777, (1986)
- [13] H. Munekata, H. Ohno, S. von Molnar, A. Segmuller, L. L. Chang and L. Esaki, Diluted magnetic III-V semiconductors, Phys. Rev. Lett. 63, 1849 (1989).
- [14] H. Ohno, H. Munekata, T. Penney, S. von Molnár, and L. L. Chang, Magnetotransport properties of p-type (In,Mn)As diluted magnetic III-V semiconductors, Phys. Rev. Lett. 68, 2664 (1992).
- [15] Ohno, H. et al. (Ga,Mn)As: a new ferromagnetic semiconductor based on GaAs, Appl. Phys. Lett. 69, 363–365 (1996)
- [16] H. Ohno, Making Nonmagnetic Semiconductors Ferromagnetic, Science 281, 951 (1998)
- [17] Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (A. Twardowski, prof. M. Kamińska, J. Blinowski, J. Szczytko, A. Wołoś, K. Dziatkowski i in.), Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk (T. Dietl, M. Sawicki, T. Wojtowicz, J. Sadowski, D. Dobrowolski, P. Kacman i in.), Uniwersytet Notre Dame (J.

- K. Furdyna, M. Dobrowolska, X. Liu), Tohoku University w Sendai (F. Matsukura, H. Ohno i in.), University of Tokyo (M. Tanaka, A. Oiwa i in.), Instytut Fizyki Akademii Nauk w Pradze (T. Jungwirth i in.), Uniwersytet w Nottingham (prof. B. L. Gallagher i in., Uniwersytet Kalifornijski (D. D. Awschalom i in.), Walter Schottky Institut w Monachium (W. Limmer i in.), Laboratory of Photonics and Nanostructures w Marcoussis (A. Lemaitre i in.), Imec (J. De Boeck), i inne.
- [18] F. Matsukura, Y. Tokura, and H. Ohno, Control of magnetism by electric fields, *Nat. Nanotechn.* 10, 209, (2015)
 - [19] N. D'Souza, M. S. Fashami, S. Bandyopadhyay, and J. Atulasimha, Experimental clocking of nanomagnets with strain for ultralow power Boolean logic, *Nano Lett.* 16, 1069 (2016)
 - [20] J. Blinowski and P. Kacman, Spin interactions of interstitial Mn ions in ferromagnetic GaMnAs, *Phys. Rev. B* 67, 121204(R) (2003)
 - [21] M. Kaminska, Z. LilientalWeber, E. R. Weber, T. George, J. B. Kortright, F. W. Smith, B. Y. Tsaur, and A. R. Calawa, Structural properties of As-rich GaAs grown by molecular beam epitaxy at low temperatures, *Applied Physics Letters* 54, 1881 (1989);
 - [22] T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, J. Cibert, D. Ferrand, Zener Model Description of Ferromagnetism in Zinc-Blende Magnetic Semiconductors, *Science* 287, 1019 (2000)
 - [23] T. Dietl, H. Ohno and F. Matsukura, Hole-mediated ferromagnetism in tetrahedrally coordinated semiconductors, *Phys. Rev. B*, 63, 195205 (2001)
 - [24] M. Sawicki, K.-Y. Wang, R. P. Campion, K. W. Edmonds, C. R. Staddon, N. R. S. Farley, C. T. Foxon, E. Papis, E. Kamińska, A. Piotrowska, T. Dietl and B. L. Gallagher, In-plane uniaxial anisotropy rotations in (Ga,Mn)As thin films, *Phys. Rev. B* 71, 121302 (2005)
 - [25] M. Sawicki, F. Matsukura, A. Idziaszek, T. Dietl, G. M. Schott, C. Ruester, C. Gould, G. Karczewski, G. Schmidt, and L. W. Molenkamp, Temperature dependent magnetic anisotropy in (Ga,Mn)As layers, *Phys. Rev. B* 70, 245325 (2004)
 - [26] D. Chiba, M. Sawicki, Y. Nishitani, Y. Nakatani, F. Matsukura & H. Ohno, Magnetization vector manipulation by electric fields, *Nature* 455, 515-518 (2008)
 - [27] X. Liu, Y. Sasaki, J. K. Furdyna, Ferromagnetic resonance in Ga_{1-x}Mn_xAs: Effects of magnetic anisotropy, *Phys. Rev. B* 67, 205204 (2003)
 - [28] M. Glunk, J. Daeubler, L. Dreher, S. Schwaiger, W. Schoch, R. Sauer, W. Limmer, A. Brandlmaier, S. T. B. Goennenwein, C. Bihler, M. S. Brandt, Magnetic anisotropy in (Ga,Mn)As: Influence of epitaxial strain and hole concentration, *Phys. Rev. B* 79 195206, (2009)
 - [29] Y. Ohno, D. K. Young, B. Beschoten, F. Matsukura, H. Ohno & D. D. Awschalom, Electrical spin injection in a ferromagnetic semiconductor heterostructure, *Nature* 402, 790 (1999)
 - [30] E. Johnston-Halperin, D. Lofgreen, R. K. Kawakami, D. K. Young, L. Coldren, A. C. Gossard, and D. D. Awschalom, Spin-polarized Zener tunneling in (Ga,Mn)As, *Phys. Rev. B* 65, 041306 (2002)
 - [31] E. I. Rashba, Theory of electrical spin injection: Tunnel contacts as a solution of the conductivity mismatch problem, *Phys. Rev. B* 62, R16267(R) (2000)
 - [32] P. Van Dorpe, Z. Liu, W. Van Roy, V. F. Motsnyi, M. Sawicki, G. Borghs, J. DeBoeck, Very high spin polarization in GaAs by injection from a (Ga,Mn)As/Zener diode, *Appl. Phys. Lett.* 84, 3495 (2004) oraz P. Van Dorpe, W. Van Roy, J. De Boeck, G. Borghs, P. Sankowski, P. Kacman, J. A. Majewski, T. Dietl, Voltage-controlled spin injection in a (Ga,Mn)As/(Al,Ga)As Zener diode, *Phys. Rev. B* 72, 205322 (2005)
 - [33] C. Gould, C. Rüster, T. Jungwirth, E. Girgis, G. M. Schott, R. Giraud, K. Brunner, G. Schmidt, and L. W. Molenkamp, Tunneling Anisotropic Magnetoresistance: A Spin-Valve-Like Tunnel Magnetoresistance Using a Single Magnetic Layer, *Phys. Rev. Lett.* 93, 117203 (2004)
 - [34] P. Sankowski, P. Kacman, J. A. Majewski, T. Dietl, Spin-dependent tunneling in modulated structures of (Ga,Mn)As, *Phys. Rev. B* 75, 045306 (2007)
 - [35] M. Gryglas, M. Baj, B. Chenaud, B. Jouault, A. Cavanna and G. Faini, Acoustic Phonon-Assisted Resonant Tunnelling via Single Impurities, *Phys. Rev. B* 69, 165302 (2004)
 - [36] B. Jouault, M. Gryglas, G. Faini, U. Gennser, A. Cavanna, M. Baj, D. K. Maude, Single impurity tunnelling spectroscopy to probe the discrete states of a two-dimensional electron gas in a quantizing magnetic field, *Phys. Rev. B* 73, 155415 (2006)
 - [37] M. Csontos, G. Mihály, B. Jankó, T. Wojtowicz, W. L. Lim, X. Liu, and J. K. Furdyna, Effect of hydrostatic pressure on the transport properties in magnetic semiconductors, *Phys. Status Solidi C* 1, 3571 (2004).
 - [38] Miklos Csontos, High pressure magnetotransport study of (III,Mn)V dilute magnetic semiconductors, Phd Thesis, Budapest University of Technology and Economics, BUTE 2007

- [39] Adam Kwiatkowski, Marta Gryglas-Borysiewicz, Piotr Juszyński, Jacek Przybytek, Maciej Sawicki, Janusz Sadowski, Dariusz Wasik and Michał Baj, Determining Curie temperature of (Ga,Mn)As samples based on electrical transport measurements: Low Curie temperature case, Appl. Phys. Lett. 108, 242103 (2016)
- [40] N. Gonzalez Szewacki, J. A. Majewski, T. Dietl, (Ga,Mn)As under pressure: A first-principles investigation, Phys. Rev. B 91, 184409 (2015)
- [41] T. Dietl, Hole states in wide band-gap diluted magnetic semiconductors and oxides, Phys. Rev. B 77, 085208 (2008)
- [42] T. Dietl, H. Ohno, Dilute ferromagnetic semiconductors: Physics and spintronic structures, Rev. Mod. Phys. 86, 187 (2014)
- [43] Piotr Sankowski, Theory of Spin-dependent phenomena in layered structures based on (Ga,Mn)As, Ph.D. Dissertation, Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, 2008
- [44] M. Birowska, C. Śliwa, J. A. Majewski, and T. Dietl, Origin of bulk uniaxial anisotropy in zinc-blende dilute magnetic semiconductors, Phys. Rev. Lett. 108, 237203 (2012)

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych).

5.1. Działalność naukowa przed uzyskaniem stopnia doktora

Na początku mojej działalności naukowej zajmowałam się zjawiskiem tunelowania w niemagnetycznych strukturach półprzewodnikowych, w szczególności w heterostrukturze GaAs/AlAs/GaAs. Jest to ciekawa struktura, gdzie w zależności od wartości wektora falowego nośnika warstwa AlAs jest barierą – dla elektronów z okolic punktu Γ strefy Brillouina albo studnią kwantową – dla elektronów z minimum pasma pobocznego X. W części próbek wprowadzono domieszki w centrum bariery (domieszkowanie planarne) w celu zmodyfikowania współczynnika transmisji. Metodami litografii optycznej wytworzono makroskopowe złącza typu mesa. Badane były charakterystyki prądowo-napięciowe, w temperaturze ciekłego helu, w polu magnetycznym do 7T i w ciśnieniach hydrostatycznych. Pokazano udział domieszek w prądzie tunelowym: w pewnym zakresie napięć zaobserwowano silny wzrost prądu, z dwoma szerokimi maksimami, nieobecny dla próbek niedomieszkowanych. Dla wyższych napięć zaobserwowano kolejne struktury, tym razem związane ze stanami rozciągniętymi w studni minimum X. Potwierdzono, że zarówno stany domieszkowe, jak i stany ze studni związane są z minimum X pasma przewodnictwa [A1-A2]. Ciekawą obserwacją był fakt, że nawet dla domieszek związanych z poprzecznymi (w stosunku do kierunku wzrostu/prądu) dolinami X, o dużym pędzie poprzecznym, proces tunelowania zachodził efektywnie, mimo iż elektrony z rezerwuaru GaAs miały znacząco mniejszy pęd poprzeczny.

W dalszej części badań postanowiono tak zredukować powierzchnię złącza tunelowego (mesy), żeby w jego obrębie znalazły się pojedyncze sztuki donorów. Metodami litografii elektronowej i trawienia jonowego, wykonano mesy o przekroju kwadratu o boku od 100 nm do 2 μ m. Wielkim wyzwaniem było wykonanie kontaktu omowego na szczycie tak małej mesy. W charakterystykach prądowo-napięciowych, mierzonych w milikelwinowych temperaturach, zidentyfikowano struktury odpowiadające tunelowaniu przez dyskretne stany energetyczne domieszek [A3]. Ponadto pokazano, że prąd tunelowy odzwierciedla gęstość stanów emitera - obserwując zarówno schodkową gęstość stanów gazu dwuwymiarowego jak i kwantyzację landauowską w silnym polu magnetycznym prostopadłym do płaszczyzny tego gazu. Co więcej, zauważono, że tunelowanie zachodzi z udziałem fononów akustycznych [A4]. Zatem pojedyncza domieszka umożliwiła wgląd w mikroskopowe własności gazu elektronowego i procesu tunelowania. W tym czasie tego typu badania były dość unikalne i dopiero po kilku latach intensywnie rozpoczęto badania pojedynczych obiektów, pod hasłem „solotroniki”.

5.2. Działalność naukowa po uzyskaniu stopnia doktora nie uwzględniona w pkt. 4.

Po uzyskaniu przeze mnie stopnia doktora badania tunelowania przez pojedyncze domieszki były kontynuowane. Pokazano, że przy pomocy pojedynczej domieszki w barierze można przeprowadzić spektroskopię gazu nośników w rezerwuarze, z którego tunelują [A5]. Ponieważ pojedyncza domieszka (Si w AlAs) ze względu na mały promień bohrowski ($\sim 5 \text{ \AA}$) „sonduje” bardzo lokalnie gęstość stanów elektronowych, zaobserwowano fluktuacje lokalnej gęstości stanów związanych z nieporządkiem. To ułatwiło zidentyfikowanie kolejnych stanów (wzbudzonych) tej samej domieszki [A6], co niedawno znalazło potwierdzenie w rachunkach (mgr A. Twardowska – praca doktorska, w przygotowaniu). Ponadto, w charakterystykach prądowo-napięciowych zmierzonych w polu magnetycznym prostopadłym do płaszczyzny dwuwymiarowego gazu elektronowego w emiterze, obserwowano też poziomy Landaua oraz nałożone na nie ostre piki prądu. Śledząc ich ewolucję w zależności od pola magnetycznego i napięcia oraz przeprowadzając modelowanie stanów w parabolicznej studni kwantowej z nieporządkiem, udało się odtworzyć obserwowane zależności doświadczalne.

Innym wątkiem, który podjęłam, były badania własności grafenu [A7]. Po ekscytujących doniesieniach o własnościach grafenu otrzymywanego metodą eksfoliacji za pomocą taśmy ‘scotch’ (uhonorowanych nagrodą Nobla w 2010r), w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie rozpoczęto wytwarzanie grafenu metodami sublimacji SiC, a potem CVD. Na próbkach z kilkoma-kilkunastoma warstwami grafenu otrzymanymi pierwszą metodą, przeprowadzono pomiary efektu Halla i wyznaczono tensor oporności. Potwierdzono dwuwymiarowy charakter przewodnictwa, a dzięki jego wymodelowaniu pokazano, że przewodnictwo jest wielokanałowe, a ruchliwość w najbardziej ruchliwym kanale wynosi około $8 \text{ tys. cm}^2/\text{Vs}$. W dalszych pracach, prowadzonych na próbkach CVD z jedną i dwiema warstwami, zaobserwowano niezgodność niskopolewej koncentracji halowskiej z koncentracją wyznaczoną z kwantowych oscylacji magnetooporu (zjawisko Shubnikova-de Haasa) czy oscylacji napięcia Halla. Pokazano, że informacja o koncentracji z niskopolewego efektu Halla jest myląca, gdy próbka składa się z więcej niż jednej warstwy grafenu. Wyniki te potwierdzono pomiarami pojemności, które dają prosty wgląd w strukturę próbki. Praca temu poświęcona jest w przygotowaniu.

Kolejna tematyka była kontynuacją badań z pracy magisterskiej i dotyczyła zachowania kwasi-pędu w zjawisku tunelowania. Jak wspomniano powyżej (pkt. 5.1), w charakterystykach prądowo-napięciowych I-V obserwowano dwa maksima, związane z tunelowaniem przez domieszki. Fakt, że istnieją dwa takie maksima związany jest z tym, że w strukturze rosnącej wzdłuż kierunku [100], który jest jednocześnie kierunkiem tunelowania, 3 doliny X nie są równoważne. Przedyskutowano i otrzymano nowe struktury tunelowe, GaAs/AlAs/GaAs wyhodowane wzdłuż kierunku [111], w których utworzono makroskopowe mesy. W takich próbkach wszystkie minima X są - z punktu widzenia przepływu prądu - równoważne. W badaniach tych struktur [A8] pokazano, zgodnie z oczekiwaniami, obecność tylko jednego maksimum w charakterystykach I-V w zakresie napięć odpowiadającym tunelowaniu przez domieszki. W strukturach tunelowych hodowanych na kierunku [111], w odróżnieniu od struktur [100] badanych wcześniej, wszystkie stany, przez które zachodzi tunelowanie, związane są z minimami o dużym pędzie poprzecznym. Fakt obserwacji intensywnych przejść ze znacznym niedopasowaniem poprzecznej składowej pędu oznacza udział dodatkowej kwasiczątki w procesie tunelowania.

Uczestniczyłam też w pracach dotyczących badań (Ga,Mn)As, których, ze względu na mój niewielki udział, nie włączyłam do osiągnięcia naukowego. Jedna praca [A10] dotyczyła obserwacji i wyjaśnienia pochodzenia struktur (anomalii) w oporności podłużnej

i poprzecznej w zależności od pola magnetycznego, w hallbarach wykonanych na cienkich warstwach (Ga,Mn)As. Uzyskane w pracy wyniki pokazały, że propagacja domeny magnetycznej wzdłuż próbki oznacza lokalną zmianę tensora oporności, która jest rejestrowana przez sondy napięciowe w postaci wspomnianych struktur. Druga praca [A11] jest rozwinięciem problematyki zasygnalizowanej w p.4.3 dotyczącej metodyki wyznaczania temperatury Curie dla próbek (Ga,Mn)As o charakterze izolującym. Wyznaczanie T_c z maksimum $\rho(T)$ zostało już wcześniej zakwestionowane przez V. Novaka i in. (z grupy prof. Jungwirtha z Pragi), którzy pokazali, że położenie maksimum $d\rho/dT$ w funkcji temperatury, odpowiada z dobrą dokładnością wartości T_c . Wyniki uzyskane w pracy [A11] pozwoliły jednoznacznie stwierdzić, że zaproponowana przez V. Novaka metoda też nie jest metodą uniwersalną i w szczególności metody tej nie można stosować dla próbek o izolującym charakterze przewodnictwa elektrycznego. Zaproponowano inny sposób wyznaczania T_c , bazujący także na pomiarach transportowych.

Lista publikacji nie zaliczonych do osiągnięcia naukowego

- A1. **M. Gryglas**, J. Przybytek, M. Baj, M. Henini, L.Eaves, *Hydrostatic Pressure Investigations of a Resonant Tunnelling through X-Minimum- Related States in a Single Barrier GaAs/AlAs/GaAs Heterostructure*, High Pressure Research 18, 63 (2000).
- A2. **M. Gryglas**, J. Przybytek, M. Baj, M. Henini, L.Eaves, *High-Pressure Magnetotransport Measurements of Resonant Tunnelling via X-Minimum-Related States in AlAs Barrier*, Acta Physica Polonica 100, 403 (2001).
- A3. **M. Gryglas**, M. Baj, B. Jouault, G. Faini, A. Cavanna, *Resonant Tunnelling through Single Donor States in GaAs/AlAs/GaAs Devices*, Physica E 17, 303 (2003).
- A4. **M. Gryglas**, M. Baj, B. Chenaud, B. Jouault, A. Cavanna and G. Faini, *Acoustic Phonon-Assisted Resonant Tunnelling via Single Impurities*, Phys. Rev. B 69, 165302 (2004),
- A5. B. Jouault, **M. Gryglas**, G. Faini, U. Gennser, A. Cavanna, M. Baj, D. K. Maude, *Single impurity tunnelling spectroscopy to probe the discrete states of a two-dimensional electron gas in a quantizing magnetic field*, Phys. Rev. B **73**, 155415 (2006) and Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology, April 24 (2006)
- A6. M. Baj, **M. Gryglas**, B. Jouault, D. Maude, G. Faini, U. Gennser, A. Cavanna, *Spectroscopy of a single Si donor by the resonant tunnelling experiment*, Acta Physica Polonica **110**, 157 (2006).
- A7. **M. Gryglas-Borysiewicz**, B. Jouault, J. Tworzydło, S. Lewinska, W. Strupinski and J.M. Baranowski, *Transport Properties of Disordered Graphene Layers*, Acta Physica Polonica A **116**, 838 (2009).
- A8. S. Lewińska, **Marta Gryglas-Borysiewicz**, Jacek Przybytek, Michał Baj, B. Jouault, U. Gennser, A. Ouerghi, *Transport in GaAs/AlAs/GaAs [111] Tunnel Junctions*, Acta Physica Polonica A 119, 606 (2011).
- A9. Jacek Przybytek, R. Stankiewicz, **Marta Gryglas-Borysiewicz**, Michał Baj, A. Cavanna, G. Faini, *Observation of thermally-activated electron traps in GaAs/AlAs/GaAs heterostructures in low-frequency noise measurements*, Acta Physica Polonica A 119, 724 (2011).
- A10. P. Juszyński, D. Wasik D., **M. Gryglas-Borysiewicz**, J. Sadowski, *Study of influence of domain structure on observed magnetoresistance anomalies in GaMnAs*, Journal of Applied Physics 113, 093708 (2013) IF: 2.2.
- A11. A. Kwiatkowski, **M. Gryglas-Borysiewicz**, P. Juszyński, J. Przybytek, M. Sawicki, J. Sadowski, D. Wasik and M. Baj, *Determining Curie temperature of (Ga,Mn)As samples based on electrical transport measurements: Low Curie temperature case*, Appl. Phys. Lett. **108**, 242103 (2016)

Marta Borysiewicz