

Kraków, 11 czerwca 2023

dr hab. Michał Rams
Instytut Fizyki, Uniwersytet Jagielloński
ul. Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków
tel 012 663 4515, m.rams@uj.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej pana Krzysztofa Grochota, pod tytułem
*Spinowa magnetorezystancja i spinowy efekt Halla w cienkowarstwowych układach hybrydowych:
metal ciężki, ferromagnetyk, antyferromagnetyk*

Tematyka i dyscyplina

Tematyką pracy są badania nanometrowej grubości wielowarstwowych struktur magnetycznych i wytwarzanych z takich struktur elementów elektronicznych mających potencjalne zastosowanie w nieulotnych pamięciach komputerowych. Jest to dziedzina nauki w której jest obecnie duża konkurencja pomiędzy czołowymi ośrodkami, zarówno akademickimi jak i przemysłowymi. Zakres rozprawy pana Krzysztofa Grochota (KG) obejmuje eksperymentalne badania jak i analizę otrzymanych danych. Zrozumienie tych wyników, zachodzących procesów i adaptacja potrzebnych modeli transportu elektronowego wymaga zaawansowanej wiedzy teoretycznej z fizyki materii skondensowanej. Dlatego ta rozprawa bardzo dobrze lokuje się w dyscyplinie nauki fizyczne.

Prace wieloautorskie podstawą rozprawy i wkład KG

Rozprawa KG bazuje na 5 pracach wieloautorskich: 4 artykułach już opublikowanych w czasopiśmie peer review oraz jednego preprintu. Są to, zachowując numerację z rozprawy:

- P1. Ł. Karwacki, K. Grochot *et al.* *Optimization of spin Hall magnetoresistance in heavy-metal/ferromagnetic-metal bilayers*. Sci. Rep. 10, 10767 (2020).
- P2. W. Skowroński, K. Grochot *et al.* *Angular Harmonic Hall Voltage and Magnetoresistance Measurements of Pt/FeCoB and Pt-Ti/FeCoB Bilayers for Spin Hall Conductivity Determination*. IEEE Trans. Electr. Dev. 68, 6379-6385 (2021).
- P3. P. Ogrodnik, K. Grochot *et al.* *Study of Spin-Orbit Interactions and Interlayer Ferromagnetic Coupling in Co/Pt/Co Trilayers in a Wide Range of Heavy-Metal Thickness*. ACS Appl. Mater. Interfaces 13, 47019-47032 (2021),
- P4. K. Grochot *et al.* *Multilevel switching due to spin-orbit torques in Co/Pt/Co*, arXiv:2210.07357v1
- P5. K. Grochot *et al.* *Current-Induced Magnetization Switching of Exchange-Biased NiO Heterostructures Characterized by Spin-Orbit Torque*. Phys. Rev. Applied 15, 014017 (2021).

Wszystkie 5 prac ma współautorów, prace mają odpowiednio 9, 11, 9, 6, 10 autorów. Jest to nieuniknione w takiej dziedzinie badań eksperymentalnych. Zaawansowane i czasochłonne metody preparatyki próbek wymagają drogiej aparatury, której zbudowanie, opanowanie obsługi, doskonalenie i kalibracje zajmuje lata, a utrzymanie jest kosztowne. Jedynym sposobem, żeby zrobić

coś wartościowego przy światowej konkurencji jest szeroka współpraca grup z ośrodków dysponujących daną aparaturą do preparatyki lub pomiarów jak i współpraca osób, które już mają wiedzę teoretyczną, żeby modelować takie układy. Nie da się takich prac prowadzić w pojedynkę, zwłaszcza będąc doktorantem.

Oceniając rozprawę doktorską bazującą na takich publikacjach wymagane jest wydzielenie wkładu KG do tych publikacji. KG deklaruje to we wstępie do rozprawy, na stronie xv. Również w publikacjach P1, P4, P5 są akapity podające co do tych prac zrobili poszczególni autorzy, co traktuję jako ich oświadczenia. Deklaracja KG w rozprawie jest zgodna z tą informacją w publikacjach. Znaczące jest również, że KG w dwu publikacjach jest pierwszym i korespondencyjnym autorem, w trzech pozostałych jest drugim autorem (w tym w P1 również korespondencyjnym). Praca doktorska ma dwu promotorów: prof. dr hab. Tomasz Stobiecki oraz prof. dr hab. Nika Spiridis, choć w omawianych publikacjach i referencjach figuruje tylko pierwszy z nich.

Zbierając te informacje: KG wykonał w tych pracach: mikrostrukturyzacje wielu próbek do postaci elementów przy pomocy litografii optycznej, wiązki jonowej i naparowywania kontaktów w czystym laboratorium w ACMiN AGH, zaprojektował maski litograficzne zoptymalizowane do danych próbek i dostosowane do aparatury pomiarowej (w pracach P1-5), wykonał całe serie różnych pomiarów elektrycznych w laboratorium IE AGH dla takich elementów: oporności, magnetooporu i efektu Halla, czasem w zależności od pola magnetycznego albo jego kąta, pomiary drugiej harmonicznej w efekcie Halla, pomiary ferromagnetycznego rezonansu używając efektu diody spinowej (różne pomiary w pracach P1-5), wykonał próby przełączania prądem magnetyzacji w obecności i bez dodatkowego pola i zmierzył potrzebne do tego prądy (w pracy P5). Wykonał również analizę wykonanych przez siebie pomiarów (prace P1-5) oraz brał udział w modelowaniu dynamiki domen w P4 oraz P5 oraz w pomiarach XAS w Solaris (do P5). KG napisał pierwszą wersję prac P4 i P5 i zapewne kawałki pozostałych prac.

Razem, KG jest obecnie współautorem 11 opublikowanych już prac, które wg bazy WoS były cytowane ponad 70 razy. Świadczy to o jego dużym zaangażowaniu w pracę naukową w zespole badawczym.

W mojej dalszej ocenie rozprawy doktorskiej KG uwzględniam: teksty napisane przez KG w rozprawie będące wstępem i komentarzem do publikacji, a z załączonych publikacji P1-P5 biorę pod uwagę tylko części, które jak rozumiem wykonał KG i znaczenie tego dla wyników całej publikacji.

Zawartość merytoryczna rozprawy

Rozprawa napisana jest po angielsku i z tego powodu wiele używanych poniżej określeń i skrótów pochodzi z tego języka. Tytuł angielski rozprawy to *Spin Hall Magnetoresistance and Spin Hall effect in heavy metal, ferromagnet, antiferromagnet hybrid structures*.

Po wstępie dotyczącym znaczenia spinowo-orbitalnego momentu siły w zastosowaniu do konstrukcji nieulotnych pamięci RAM nowej generacji, w rozprawie jest opis teoretycznych podstaw magnetotransportu elektronowego w ferromagnetykach (FM) i hybrydowych strukturach warstw metalicznych (rozdział 2). Poczynając od anomalnej magnetorezystancji autor przechodzi efektów spinowych w transporcie ładunku, skupiając się na efektach związanych ze sprzężeniem spinowo-orbitalnych w metalach ciężkich (HM) i powstających na granicy warstw FM/HM efektach umożliwiających realizację indukowanego prądem przełączania magnetyzacji (CIMS). Rozdział 2 kończy się na opisie efektu exchange bias (ExB) zachodzącego na granicy warstw antyferromagnetyka (AFM) i FM, wykorzystywanego już w magnetycznych złączach tunelujących (MTJ), a mogącego

pomóc również w CIMS.

Rozdział 3 zawiera opis metod eksperymentalnych, poczynając od któregoś opisu metody syntezy warstw, ich charakteryzacji (pomiarów grubości, tekstury, pętli histerezy). Ta część eksperymentów robiona była przez inne osoby, ale jest niezbędna do zrozumienia następnych etapów eksperymentów. Dalej jest dokładniejszy opis procesu mikrostrukturyzacji warstw do postaci elementów umożliwiających wykonanie dalszych pomiarów elektrycznych. Praca zawiera przykłady zaprojektowanych i użytych masek litograficznych, jak i przykładowe mikrozdjęcia wytrawionych elementów. Dalej jest opis metod pomiarów elektrycznych, w szczególności wykorzystujących pomiary drugiej harmonicznej w efekcie Halla i metodę analizy takich danych używaną do uzyskania Metoda taka została po raz pierwszy użyta przez Hayashi et al. w 2014 i rozwinięta również dla warstw z prostopadłą anizotropią. Implementacja takiej metody pomiarowej i połączenie jej z układem obracającym mierzoną próbkę wewnątrz elektromagnesu wykonanym w laboratorium IE AGH pozwala na badanie efektywności SOT w dwuwarstwach FM/HM o różnej anizotropii. Ostatnią opisaną metodą pomiarową jest rejestracja CIMS, co robione jest wykorzystując serie impulsów próbkujących i impulsów prądu próbujących przeorientować warstwę FM. Zarówno wstęp teoretyczny, jak i opis metod eksperymentalnych jest bardzo dobrze napisany. Zaczyna się na odpowiednim dla rozprawy doktorskiej poziomie, zawiera tylko rzeczy które są potrzebne, jest logicznie ułożony, bibliografia jest dobrze dobrana i aktualna.

Rozdział 4 zawiera właściwe wyniki badań. KG, będąc współautorem 12 różnych publikacji, zapewne miał spory wybór co zawrzeć w tej rozprawie. Bardzo logicznie dobrał tematy tak, że pokazują one wyniki dla coraz bardziej skomplikowanych układów. Zaczyna od badań dwuwarstw FM/HF, potem do tego dołożona jest kolejna warstwa ferromagnetyka, otrzymując FM/HF/FM, a przedstawione na końcu badania dotyczą układu z warstwą antyferromagnetyka HF/FM/AFM. Główna treść jest w bezpośrednio wstawionych stronach publikacji P1–P5 oraz ich Supporting Information. Do każdej publikacji jest krótki wstęp (1-2 strony) pokazujący logiczny związek pomiędzy kolejnymi pracami.

Praca P1 opublikowana w Sci.Rep. (IF=5.0) dotyczy dwuwarstw w których rolę HM pełni Au, W lub Pt, a rolę FM pełni Co lub stop CoFeB. Część użytych próbek ma liniowo zmieniającą się grubość warstwy FM lub HM, co pozwala na uzyskanie na jednej próbce całej serii elementów. Przykładowo, rysunek S2 tej publikacji pokazuje, że dla jednej sekwencji tych warstw robiono pomiary dla nawet 20 różnych grubości. Ponieważ prąd płynie równolegle w obu warstwach, to pierwszym etapem było wyznaczenie prądów (i oporności) każdej z warstw. Głównym wynikiem są pomiary magnetorezystancji w zależności od kąta przyłożonego pola, dla różnych grubości warstw i maksymalne wartości tej magnetorezystancji pokazane na Fig. 1 i 2 tej pracy. Jak rozumiem, dalszą analizą tych danych i rozdzieleniem zmierzonej magnetorezystancji na anomalną (AMR) i spinową (SMR) zajmowali się inni współautorzy.

Praca P2 opublikowana w IEEE Trans. Elect. Dev. (IF=3.2) bardziej skupia się na metodologii robienia pomiarów drugiej harmonicznej napięcia Halla w zależności kątowej i na opisie konstrukcji układu obracającego próbkę tak, żeby uniknąć związanych z tym szumów. Jako przykład użycia takiego układu pomiarowego (oporu metodą czterokontaktową na takich strukturach, napięcia Halla oraz rezonansu ferromagnetycznego), pokazane są wyniki dla dwuwarstw Pt/CoFeB oraz wielowarstw (Pt/Ti)_m. Pomiary pozwalają wyznaczyć efektywność spinowego efektu Halla i innych parametrów zebranych w Tabeli II w P2.

Dalej rozdział 4 zawiera 5 stron (podrozdział 4.1.3) o indukowanym prądowo przełączaniu magnetyzacji wspomaganym przez oddziaływanie Dzyaloshinskii-Moriya. Pokazane tam wyniki nie były jeszcze publikowane, a dotyczą warstw Pt/Co/MgO, w których Co ma prostopadłą

anizotropię magnetyczną. Pokazane są wyniki pomiarów efektu Halla w zależności od pola magnetycznego lub prądu z widocznym skokiem sygnału. Na podstawie tych pomiarów wyznaczone jest pole odpowiadające wpływowi DMI, które przekracza 1 kOe. Wyniki są uzupełnione obrazami z mikroskopu wykorzystującego magnetoptyczny efekt Kerra, gdzie widoczna jest ewolucja domeny magnetycznej w badanym elemencie.

Praca P3 opublikowana w ACS Appl. Mater. Inter. (IF=10.4) poprzedzona jest 4 stronicowym tekstem, który opisuje wybrane z P3 wyniki, koncentrując się na danych pokazanych na Fig. 6,7,8,9,5,11. Jak rozumiem są to wyniki otrzymane lub analizowane przez KG. Praca dotyczy układu dwóch warstw ferromagnetycznych rozdzielonych metalem ciężkim FM/HM/FM, a konkretnie Co/Pt/Co ze zmienną grubością Pt. Dla takiego układu możliwa jest zarówno anizotropia prostopadła jak i anizotropia w płaszczyźnie warstwy. Fig.5 zawiera wyniki parametrów magnetycznych układu (efektywnej anizotropii, magnetyzacji saturacji, sprzężenia między warstwami) otrzymane dla 13 różnych grubości warstwy Pt na podstawie pomiarów rezonansu ferromagnetycznego diody spinowej. Dalej pomiary magnetorezystancji (Fig.6) powiązane są z kierunkami anizotropii poszczególnych warstw FM w zależności od grubości Pt. Fig.7 prezentuje SMR i AMR dla tych układów (ponad 25 punktów oznacza wykonanie pomiarów dla tylu elementów). Fig. 8 pokazuje wyniki pomiaru drugiej harmonicznej w efekcie Halla, a Fig. 9 zależności kątowne takiego sygnału. Końcowe wyniki analiz są na Fig. 11, gdzie pokazane jest efektywne pole SOT i kąt spinowego efektu Halla w zależności od grubości Pt w takiej warstwie Co/Pt/Co. Rozprawa zawiera również Supporting Information do P3 z m.in. zdjęciami przykładowych elementów i dodatkowymi wynikami analiz pomiarów elektrycznych.

W podrozdziale 4.2.3 opisana jest na 3 stronach możliwość wielostopniowego procesu przełączania magnetyzacji prądem, w warstwie Co/Pt/Co o odpowiednich grubościach. Jest to logiczna kontynuacja prezentowania wyników w tej rozprawie i jednocześnie wybranie najważniejszych informacji z preprintu P4 (z 2022-10), który jest zamieszczony dalej. W układzie z silnym sprzężeniem ferromagnetycznym między warstwami FM i asymetrycznymi warstwami obserwowane jest 4 stanowe przełączanie, co autorzy wiążą z różnymi efektywnymi polami dla poszczególnych warstw Co.

Rozdział 4.3 dotyczy ostatniej sekwencji warstw HM/FM/AFM. Pięcio-stronicowe streszczenie niektórych wyników z P5 poprzedza samą P5 (opublikowaną w Phys. Rev. Appl., IF=4.9) i suplement do niej. Celem badań było uzyskanie przełączania prądem bez zewnętrznego pola magnetycznego poprzez zastąpienie go efektywnym polem oddziaływań wymiennych. Idea użycia dodatkowej warstwy AFM do zamocowania magnetyzacji warstwy FM jest znana z magnetycznych złączy tunelowych i od lat używana w spintronice. Jako FM użyto Co, jako HM użyto Pt (tak jak w poprzednich pracach P3 i P4) oraz W, natomiast jako AFM wykorzystano izolator NiO. Cała P5 bazuje na pomiarach elektrycznych dla takich elementów. Publikacja P5 jest obszerna, to 12 stron Phys.Rev., a KG jest jej pierwszym autorem. Streszczenie zaczyna się od porównania Pt/Co/MgO z Pt/Co/NiO, żeby wyznaczyć grubość Pt gdzie jest maksymalna SMR. Wyniki dla MgO i NiO są wyraźnie różne. Dalej są próby wyznaczenia kierunków momentów magnetycznych w NiO i rozważania o możliwym powstawaniu CoO między warstwami. Pomiary elektryczne oporu w stałym zewnętrznym polu w zależności od prądu pokazują przełączanie związane z SOT. Wyznaczone są efektywne pola oddziaływań wymiennych w zależności od grubości warstwy HM i pola te są większe dla Pt niż dla W. Dodatkowo dla W pole H_{exb} ma ujemny znak. Pomimo tego efektywny SHA jest większy dla W. W końcu autorzy pokazują, że deterministyczne przełączanie zachodzi również w zerowym zewnętrznym polu. Na Fig. 6 pokazane są gęstości prądu potrzebnego do przełączenia magnetyzacji. Rozprawę kończy 2-stronicowy rozdział, który zawiera zarówno

elementy wstępu jak i streszczenia wszystkich pięciu publikacji.

Uwagi techniczne

Cała rozprawa jest napisana po angielsku, poprawnym i ścisłym językiem. Rozprawa złożona jest pod Latex, co zapewnia zachowanie technicznej jakości. Na pochwałę zasługuje staranne przygotowanie rysunków, np. 2.2, 3.4, 3.8, 3.11 oraz staranne przygotowanie bibliografii, która liczy ponad 170 pozycji, dobrze merytorycznie dobranych. Publikacje P1–5 mają swoją bibliografię. Używanie wielu skrótów jest typowe w czasopismach naukowych, pozwala oszczędzać miejsce i zachować ścisłość. Mój jedyny zarzut dotyczy pomniejszenia stron publikacji P1-5, które są wstawione z dużymi marginesami co przy zwięźeniu stron Letter do A4 powoduje dalszą miniaturyzację. Ratunkiem dla czytającego jest wersja elektroniczna tych publikacji.

Zauważone drobne błędy nie mające wpływu na końcowe wnioski:

1. W [P1] Fig. S3 dla próbki W3 zależność od grubości jest niemonotoniczna, ale na Fig.2.c MR rośnie monotonicznie z $t_{F,eff}$.
2. Czy w równaniu 2.20 po jednej stronie jest skalar, a po drugiej wektor? Skąd jest ten wzór? Brakuje podanych referencji, które pozwalałyby to łatwo wyjaśnić.
3. W równaniu 2.5 jest błąd (równanie nie jest dalej używane).
4. s.9 niepotrzebne są słowa 'also theoretical papers on'.
5. s.22 brak jakiegoś słowa z zdaniu: 'two main peaks of about 15 eV in TM and TM-oxides'
6. s.36 urwane zdanie 'Due to the different crystallinity nature...'
7. rozdz.4.3.2 brak logiki w pierwszym zdaniu: 'switching is replaced by H'?
8. P5 'stability of the above equation' raczej powinno być 'stability of solutions of the above equation'
9. P5 'in the system with Pt (after about 20 switches) in contrast to the Pt-based system' Porównywane jest chyba W i Pt.
10. s.65 'The 1D of the domain wall velocity' ?

Ogólniejsze pytania na które mam nadzieję poznać odpowiedź podczas obrony

1. Jaka jest powtarzalność wyników wyznaczanego spinowego efektu Halla dla osobnej preparatyki takich samych w zamierzeniu próbek (osobna synteza warstw, lub inny element na tym samym waflu). Np. w P1 Table 1 próbka W4 daje $\theta_{SH} = 23 \pm 2\%$, a próbka W3 daje $\theta_{SH} \simeq 0$. Używane zakresy parametrów t_F i t_H obejmują ustaloną grubość 5 nm w drugiej próbce, więc dla pewnych t_F i t_H powinna być taka sama grubość wszystkich warstw. Podobna różnica jest w Table 1 dla próbek P3 i P4. Jaki jest powód takich różnic?
2. Praca P4 i wstęp do niej dotyczy sekwencji warstw FM/HM/FM i dla takiej sekwencji prowadzona jest cała dyskusja. W opisie syntezy jest podana pełna sekwencja warstw jako Si/SiO₂/Ti(2)/Co(1)/Pt(0-4)/Co(1)/MgO(2)/Ti(2). Jak jest rola MgO w tej sekwencji?

3. W pracy P5 dyskutowany jest m.in. wpływ grzania się elementów na działanie układu. Czy są jakieś przewidywania jak takie efekty powinny się skalować przy zmniejszaniu powierzchni układu (czy wpływ ciepła Joula będzie rosnać czy maleć?) Jest to ważne przy ewentualnej miniaturyzacji badanych elementów które mają $100 \times 10 \mu\text{m}^2$, do rozmiarów porównywalnych do produkowanych elementów pamięciowych STT-MRAM.
4. Co oznacza w P4 'The thickness variation of the Pt layers in the device was less than 0.006 nm' w porównaniu do grubości pojedynczej warstwy rzędu 0.2 nm?

Wnioski końcowe recenzji

Uważam, że rozprawa pana Krzysztofa Grochota spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 z późniejszymi zmianami. W szczególności:

1. Rozprawa prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie nauki fizyczne. Świadczy o tym dobrze przygotowany wstęp teoretyczny opisujący zjawiska magneto-transportowe w cienkich warstwach metalicznych, opis zastosowanych metod eksperymentalnych oraz wykorzystanie współczesnych teorii fizycznych do analizy wyników eksperymentalnych w publikacjach.
2. Rozprawa prezentuje umiejętność samodzielnego prowadzenia przez kandydata pracy naukowej. Autor wykazał umiejętność zrobienia opisu problemu badawczego w odniesieniu do współczesnych badań (przegląd literatury), sformułowania hipotez badawczych, zaproponował i przeprowadził eksperymenty, opracował wyniki tych eksperymentów oraz potrafił wyciągnąć wnioski.
3. Przedmiotem rozprawy jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Przedstawione w rozprawie wnioski bazują na własnych eksperymentach i analizach. Prace zawarte w rozprawie zostały opublikowane w bardzo dobrych czasopismach peer review, a pan Grochot ma w nich znaczący, dający się wydzielić wkład.

W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie pana Krzysztofa Grochota do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora.

Ponadto, biorąc pod uwagę kompleksowość tej rozprawy, dobry logicznie dobór poruszanych tematów, współczesność poruszanych problemów, obszerność i jakość prezentowanych wyników oraz imponujący jak na doktoranta dorobek publikacyjny, **stawiam wniosek o wyróżnienie tej rozprawy.**



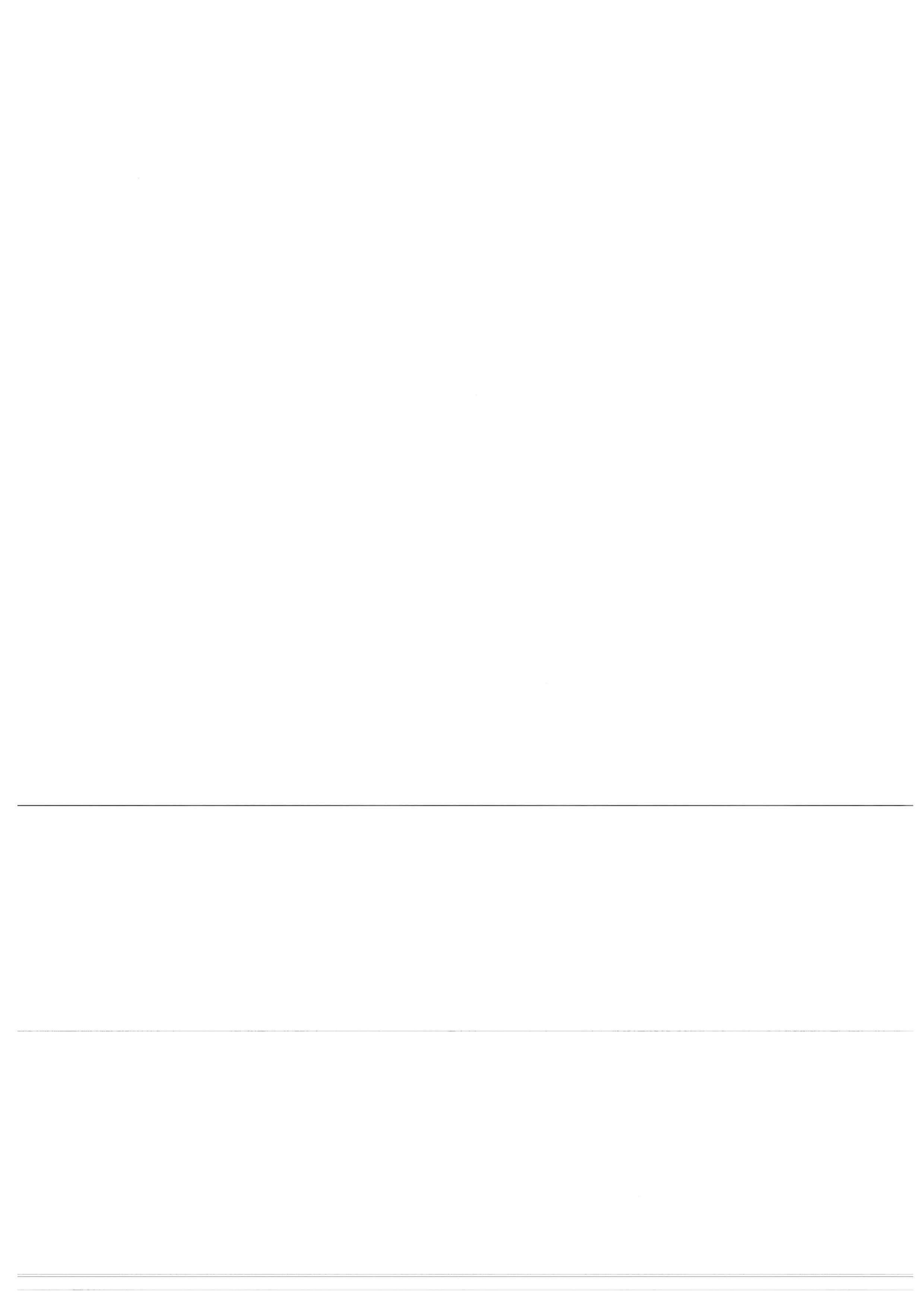
Warszawa, 09 lipca 2023 r.

Prof. dr hab. Maciej Sawicki
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
Al. Lotników 32/46
02-668 Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Krzysztofa Grochota:
“Spinowa magnetorezystancja i spinowy efekt Halla w cienkowarstwowych
układach hybrydowych: metal ciężki, ferromagnetyk, antyferromagnetyk”,
wykonanej pod kierunkiem
prof. dr. hab. Tomasza Stobieckiego i prof. dr. hab. Nika Spirids
w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.**

Rozprawa doktorska pana mgra Krzysztofa Grochota jest pracą doświadczalną, poświęconą badaniom struktur cienkowarstwowych o strukturze przekładkowej, w skład których wchodzi metale ferromagnetyczne, tzw. metale ciężkie i materiały o właściwościach antyferromagnetycznych. W ogólnym zarysie badania te prowadzone były pod kątem określonych rozważań materiałowych mogących znaleźć swoje zastosowania w nowej dziedzinie, w tzw. spintronice. Rozprawa została przygotowana w języku angielskim, liczy 147 stron numerowanych, z których ostatnie 13 zawiera obszerną, bo liczącą 173 pozycje Bibliografię, oraz 12 stron wstępnych. Strony te zawierają między innymi streszczenia rozprawy po polsku i angielsku, listę publikacji Autora, listę użytych skrótów oraz spis treści rozprawy. Część opisowa rozprawy składa się z 5-ciu rozdziałów, z których pierwszy jest wstępem, a ostatni podsumowaniem. Trzy środkowe rozdziały zawierają w kolejności odpowiednio: (Rozdział 2) Podstawy teoretyczne, (Rozdział 3) Opis metod doświadczalnych, oraz (Rozdział 4) Wyniki i dyskusję. Praca ma formę „hybrydową”, tj. w najważniejszym rozdziale 4-tym wszyte zostało 5 publikacji z dorobku Autora rozprawy (jedna się jeszcze nie ukazała, załączona została jej wersja znajdująca się w depozytorium arXiv). Każda z nich została poprzedzona wstępem przybliżającym dane zagadnienie rozprawy, które jest przedstawione w tej konkretnej publikacji.

Rozprawa doktorska mgra Grochota opisuje bogaty i różnorodny materiał doświadczalny, w tym wiele w pełni oryginalnych wyników. Doktorant zajmował się klasą materiałów spintronicznych, których sama funkcjonalność, jak i jej efekty, prowadzą, w końcowym efekcie, do zmian oporu elektrycznego. Stąd tytułowe pojęcia rozprawy: spinowa magnetorezystancja i spinowy efekt Halla. Tematyka tych badań jest bardzo ciekawa i wpisuje się w bardzo ważny nurt badań nad doborem najefektywniejszych kombinacji materiałowych w celu zmaksymalizowania efektywności tytułowych efektów. Prace takie, oprócz ich wagi



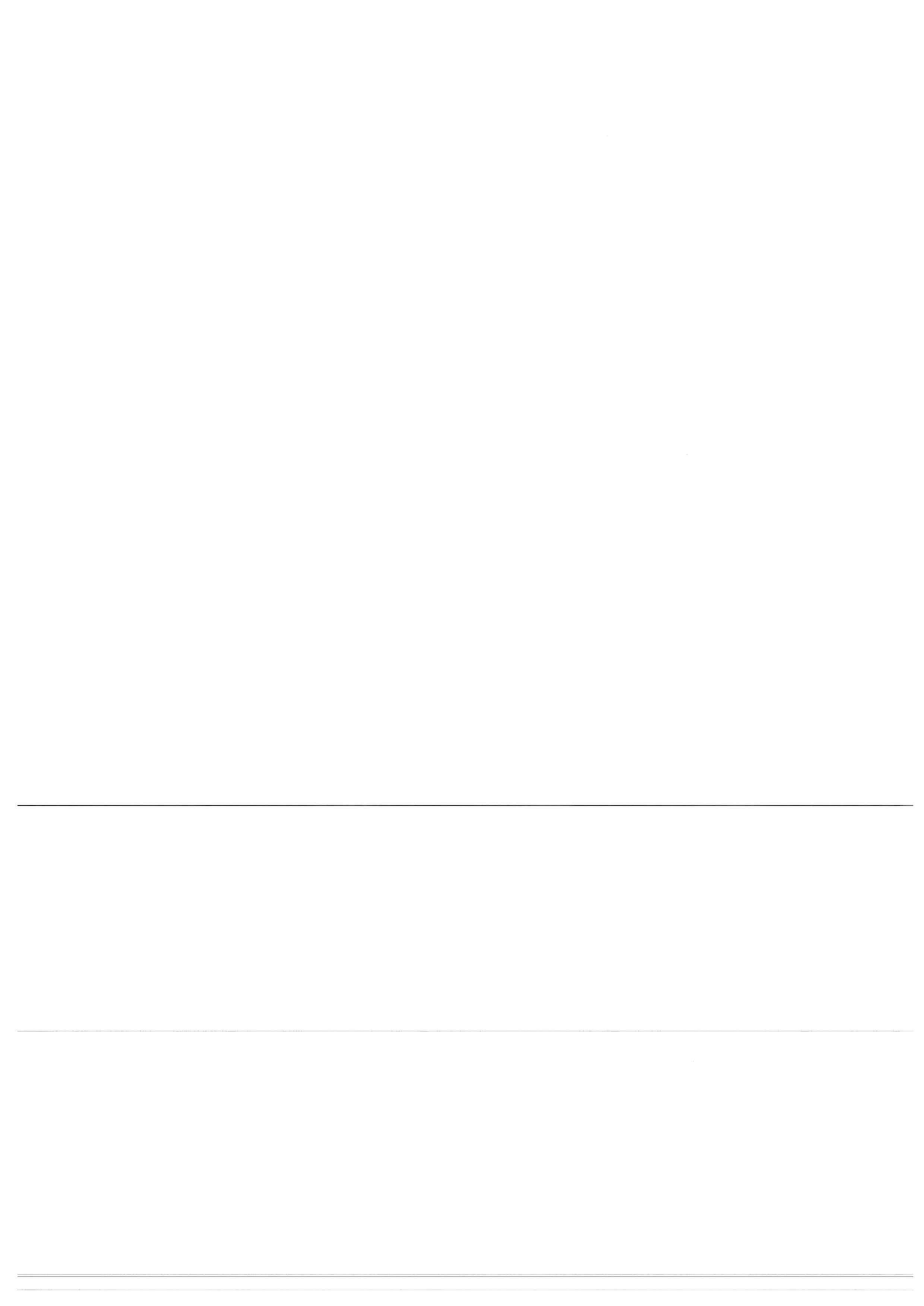
ogólnopoznawczej mają na celu opracowanie i wdrożenie rozwiązań charakteryzujących się większą efektywnością niż współczesne rozwiązania oparte na elektronice półprzewodnikowej i to często o rzędy wielkości. Doprowadzić to ma do znacznych oszczędności, głównie energii, a co za tym idzie do ograniczenia śladu termicznego generowanego przez naszą cywilizację, zapewniając jednocześnie stały wzrost efektywności magazynowania i przetwarzania informacji.

Funkcjonalność badanych w rozprawie struktur pochodziła z zawartych w nich metali ciężkich, charakteryzujących się silnym sprzężeniem spinowo-orbitalnym: platyny i wolframu. Są one źródłem stosunkowo silnych prądów spinowych mogących przełączać namagnesowanie sąsiadujących z nimi warstw ferromagnetycznych. Wykorzystując dodatkową warstwę materiału antyferromagnetycznego efekt przełączania można uzyskać bez wspomagania zewnętrznego pola magnetycznego. Dlatego w pracy tej skoncentrowano się na dogłębnym testowaniu różnych szczegółów budowy struktur takich jak metal ciężki / ferromagnetyk, ferromagnetyk / metal ciężki / ferromagnetyk, oraz ferromagnetyk / metal ciężki / antyferromagnetyk, by maksymalnie wykorzystać oferowane przez nie funkcjonalności.

Zgodnie z przedstawioną listą publikacji Autor rozprawy jest współautorem 12 publikacji z tej właśnie dziedziny badań, w tym jedna jest jeszcze procesowana w wydawnictwie. To bardzo imponujący wynik, szczególnie że kilka z nich ma współczynnik wpływu powyżej 5, a dwie powyżej 10. Wg deklaracji wkładu osobistego główną rolą Autora w czasie prac badawczych było przygotowywanie struktur do pomiarów, prowadzenie prac doświadczalnych, ich analiza, współpraca w tworzeniu modeli i samo wykorzystanie tych modeli do opisanie uzyskanych wyników. Ten wszechstronny wkład robi wrażenie, choć z drugiej strony rozumiem, że zgromadzenie tak obszernego materiału badawczego jak ten zaprezentowany w publikacjach, możliwe było dzięki intensywnemu wykorzystaniu dedykowanego takim pomiarom stanowiska pomiarowego zbudowanego w macierzystym zakładzie Doktoranta.

Rozdział pierwszy jest krótkim wprowadzeniem do tematyki rozprawy, podaje najważniejsze powody dlaczego warto zajmować się podjętą tematyką. Kończy się syntetycznym przedstawieniem dalszych części rozprawy. Dwa następne rozdziały mają charakter opisowo-informacyjny. Podstawy teoretyczne badanych w rozprawie zjawisk są zarysowane w rozdziale drugim. Osobiście znajduję ten opis jako wystarczający do przedstawienia efektów fizycznych wykorzystywanych w badaniach Autora. W rozdziale trzecim Autor zawarł skrótowy opis metod doświadczalnych stosowanych przez niego w trakcie wykonywania opisanych w rozprawie prac badawczych.

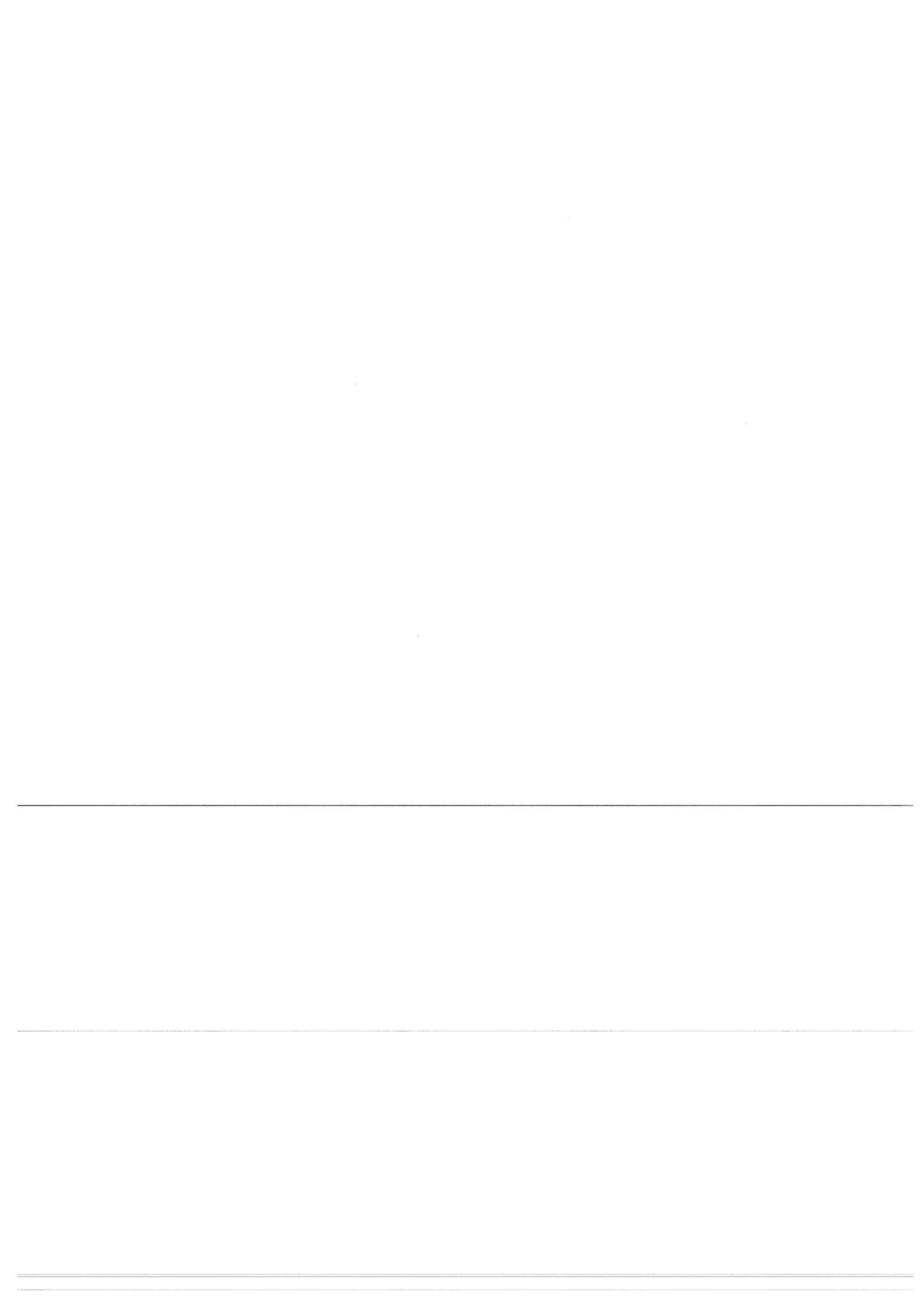
Rozdział czwarty to najważniejsza część doktoratu. Tu znajdujemy opis dokonań na podstawie których Doktorant aspiruje do uzyskania stopnia doktora nauk fizycznych. Składa się on z trzech głównych podrozdziałów, których główne różnice to rodzaj materiału badawczego, na którym skupione były wybrane badania. Część 4.1 opisuje wyniki uzyskane dla warstw



podwójnych: W/Co, Co/Pt, W/Co₂₀Fe₆₀B₂₀, Co₂₀Fe₆₀B₂₀/Pt i Au/Co₂₀Fe₆₀B₂₀ (publikacja P1), następnie Pt/Co₂₀Fe₆₀B₂₀ i Pt-Ti/Co₂₀Fe₆₀B₂₀ (publikacja [P2]), a rozdział kończy opis badań roli oddziaływania Dzyaloshinskiego-Moriya w układzie platyna-kobalt-tlenek magnezu w procesie przełączania prostopadle ustawionego namagnesowania warstwy Co przy pomocy impulsów prądu elektrycznego, które były przepuszczane w płaszczyźnie struktury. Część 4.2 opisuje wyniki uzyskane dla trójwarstwy kobalt-platyna-kobalt o płynnie zmienianej grubości przekładki platynowej. Część 4.3 opisuje modyfikacje wprowadzone do badanych układów materiałowych przez dodanie warstwy antyferromagnetycznej, w tym konkretnym przypadku w układzie Pt/Co/NiO i W/Co/NiO, o zmiennej grubości warstwy metalu ciężkiego.

Przyznaję, że jestem pod wrażeniem tak rozległego materiału faktograficznego, choć rozumiem, że z włączonych do rozprawy publikacji należy odfiltrować dużą ilość materiału przygotowanego przez innych współautorów. Do najważniejszych wyników podłożonej rozprawy uważam w sferze ogólnej tak udane zmierzenie się ze skomplikowaną materią zagadnienia, a w szczególności:

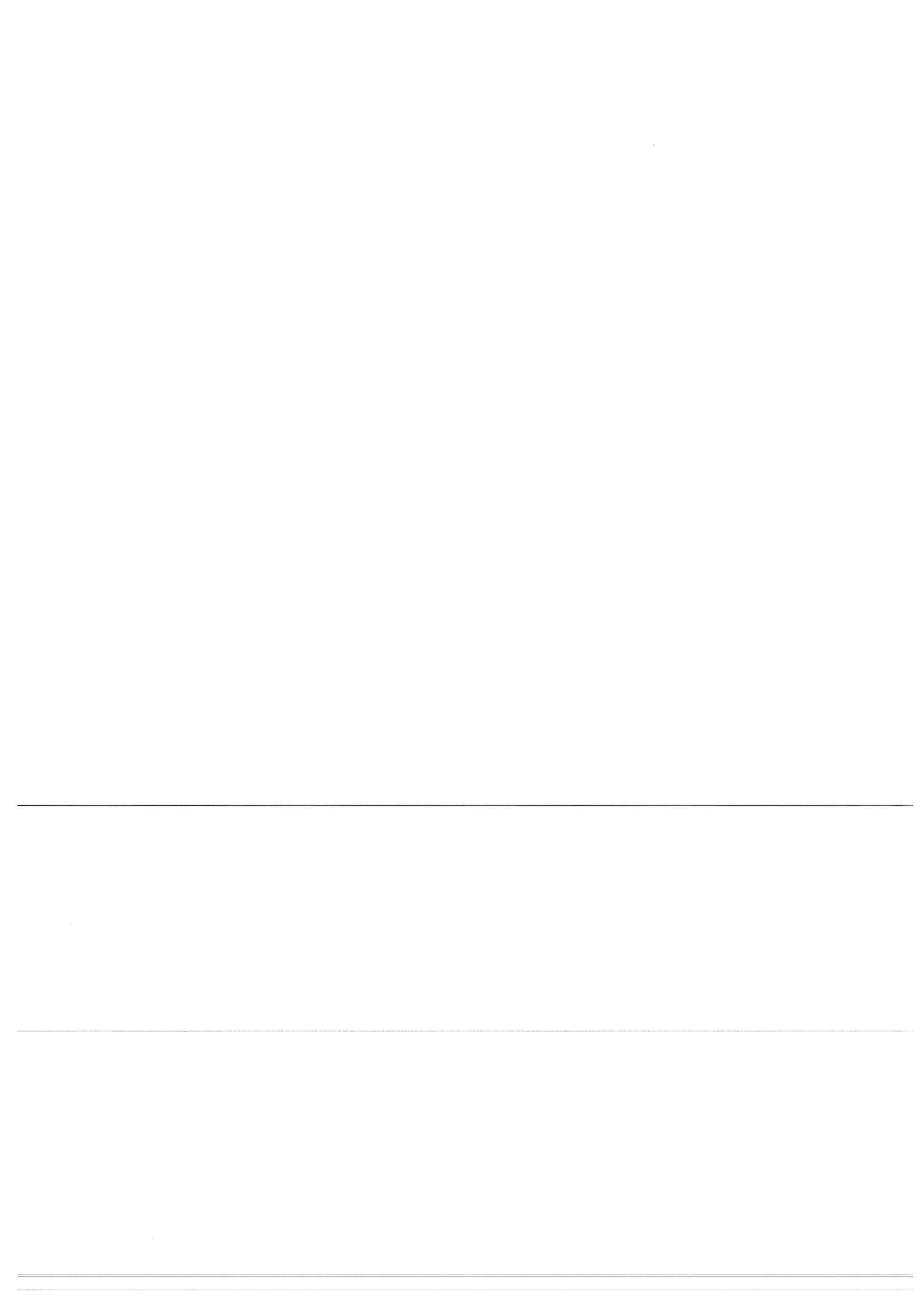
- Separacja efektów wnoszonych przez efekty spinowej magnetorezystancji i anizotropowego magneoporu oraz określenie roli danego metalu ciężkiego do wyznaczenia wagi z jaką każdy z tych efektów jest obserwowany.
- Pokazanie jak grubość przekładki platynowej w warstwach potrójnych kobalt/platyna/kobalt wpływa na wartość sprzężenia wymiennego pomiędzy warstwami platyny, ich anizotropię magnetyczną, namagnesowanie nasycenia i inne istotne parametry takiej struktury.
- Pokazanie, że obecność antyferromagnetycznej warstwy NiO poniżej warstwy podwójnej platyna/kobalt wpływa na wartość jej spinowej magnetorezystancji.
- Wyznaczenie wpływu grubości platyny na wartość efektywności konwersji ładunek - spin tzw. kąta spinowego efektu Halla (SHA) i przewodnictwa spinowego efektu Halla (SHC) w warstwach podwójnych zawierających platynę.
- Pokazanie w tym ostatnim przypadku, że wprowadzenie warstwy tytanu do platyny zwiększa efektywność tej konwersji.
- Pokazanie, że kształt pętli obrazujących efekt przełączania namagnesowania przy pomocy prądu elektrycznego (CIMS) zależy od struktury domenowej wynikającej z obecności oddziaływania Dzyaloshinskiego-Moriya.
- Zademonstrowanie 4-poziomowego przełączania efektu CIMS w przypadku obecności silnego sprzężenia wymiennego pomiędzy warstwami platyny i asymetrii transmisji spinowej obu między-wierzchni kobalt/platyna i platyna/kobalt w układzie kobalt/platyna/kobalt o zmiennej grubości platyny.
- Pokazanie, że obecność anizotropii jednozrotnej w płaszczyźnie warstwy platyna/kobalt/antyferromagnetyczny tlenek niklu umożliwia przełączanie



namagnesowania kobaltu przy pomocy prądu elektrycznego bez konieczności wspomagania przez zewnętrzne pole magnetyczne.

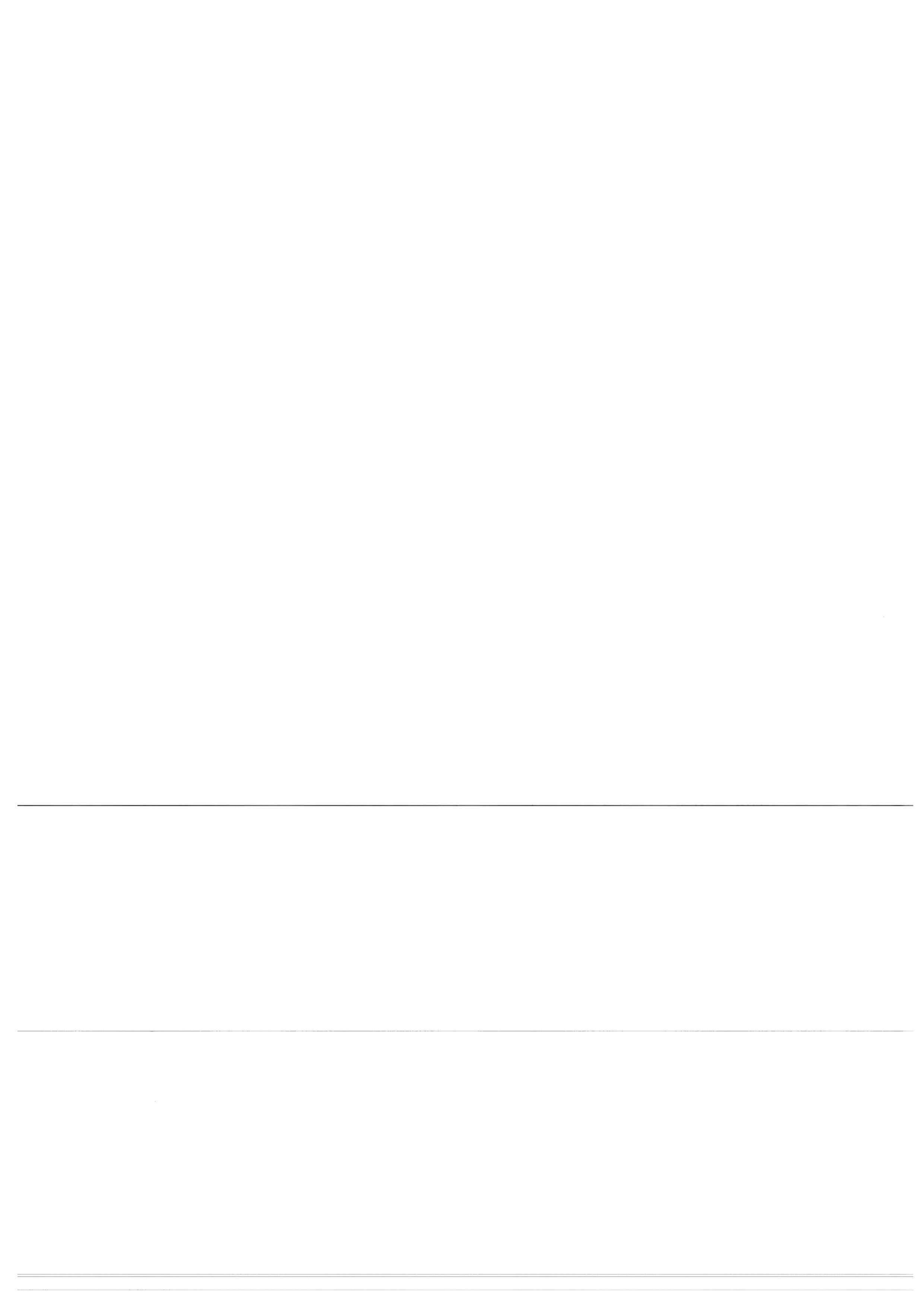
Rozprawa doktorska mgra Krzysztofa Grochota zawiera wiele mankamentów. Obowiązek recenzenta zmusza mnie do wymienienia przynajmniej najważniejszych z nich.

1. Rozprawa doktorska została przygotowana w języku angielskim, ale widać wyraźnie, że Autor nie radzi sobie w tej materii najlepiej. Dokładniej, niektóre fragmenty są napisane jasno i przejrzysto, w innych liczne uchybienia językowe bardzo przeszkadzają w odbiorze pracy, czasami zamazując tok myślowy wypowiedzi. Rażą braki w słownictwie fachowym lub zwyczajowo przyjętym w tej dziedzinie badań. I tak, tylko dla przykładu:
 - (a) Opisując osadzanie warstw Autor je „aplikuje” (str. 20). Powinno być „deposited”, lub najlepiej w tym przypadku „sputtered”.
 - (b) Na tej samej stronie znajdujemy: „A shutter was used to apply the samples where the wedge layer occurred”; I zaraz poniżej znajdujemy dziwnie brzmiącą zbitkę “... a constant velocity gradient gives ...” .
 - (c) Naprawdę mało czytelne są zdania: 2-gie ze strony 64 zaczynające się od: „It is worth noting that the resistance value R_{xy} not reached by a single CIMS loop the value equal to the upper or lower state of the AHE loop indicates...”,
 - (d) oraz ze str. 131: „In-plane $H(x)_{\text{exb}}$ field could achieve field-free magnetization switching ...”
- (2) W rozdziale 2-gim, przy opisie wiodących efektów fizycznych, brakuje mi zaprezentowania przykładów zależności oczekiwanych w doświadczeniu. Szczególnie brakuje takiej ilustracji dla tytułowej spinowej magnetorezystancji. W szczególności, co odróżnia ten efekt od innego powszechnego zjawiska anizotropowego magnetooporu? Jakie pomiary należy wykonać by jednoznacznie odróżnić jedno zjawisko od drugiego? Poprosiłbym o naświetlenie tego zagadnienia w trakcie obrony.
- (3) Pomimo, że rozdział 3-ci jest znacznie obficie ilustrowany, to nie rozumiem dlaczego w rozdz. 3.5 traktującym o mikrostrukturyzacji, czyli działalności której Autor poświęcał tak wiele swojego czasu, na rys. 3.6 widzimy tylko pola kontaktowe – brakuje choćby jednego powiększenia przybliżającego czytelnikowi prawdziwą formę badanej próbki i podającej jej rzeczywiste rozmiary. Z drugiej strony sam opis procesu strukturyzacji nie informuje o celowości każdego z kroków opisanego tam procesu. Nie dowiadujemy się więc co było trawione najpierw, co potem i w jakim celu wykonywano kolejne metalizacje i procesy lift-off.
- (4) Duża doza niezrozumienia pojawia się w trakcie lektury rozdziału 3.6.3 opisującego metodykę badania efektywności przełączania namagnesowania impulsem prądowym



- (ang. CIMS). Według rys. 3.11 pomiary elektryczne odbywają się poprzez podawanie na kontakty prądowe impulsów napięcia wymuszających prąd pomiarowy o natężeniu wynikającym z prawa Ohma – o ile znany jest opór próbki w trakcie ekscytacji. Ale zaraz w 4-tej linii na stronie 33 Autor oznajmia, że te impulsy były generowane przez komercyjne źródło prądowe, co ma większy sens z praktycznego punktu widzenia. Po czym pojawia się zdanie, że pomiary napięcia (poprzecznego) wykonywane były woltomierzem wykorzystującym „low sampling voltage”. Bardzo proszę o zapoznanie komisji na obronie z pełnym schematem układu pomiarowego, z wyszczególnieniem jakie przyrządy były podłączane i w jakiej sekwencji, tj. z protokołem pomiarowym wykorzystywanym w trakcie, szczególnie tych, pomiarów.
- (5) W rozdziale 2.4 Autor zauważa, że „The AFM has a fixed magnetic direction”, by potem pisać: „the angle between the magnetizations of the ferromagnet and the antiferromagnet.” To ostatnie budzi już mój sprzeciw.
 - (6) Nie wiem czym jest „increasingly finer domain structure” i jak ona wynika z rys. 4.1 Poproszę o wyjaśnienie. Także o przybliżeniu komisji znaczenia następującego zdania z podpisu do rys. 4.2: „As it is easy to notice in $j_e=0$, the most remagnetization occurs in case (a) and is confirmed by the domain image in Fig.4.1(c).” Tu poproszę zacząć od wyjaśnienia terminu “remagnetization”.
 - (7) Myślę, że cały akapit zaczynający się od „At points...” na stronie 67 jest do wymiany. Nie wiem co się skąd wzięło, raz jest prąd raz napięcie. Jest to bardzo duża niestaranność.
 - (8) Nie jest wyjaśnione na czym polegał proces dobierania optymalnej wartości spinowej średniej drogi swobodnej, o którym Autor wspomina na stronie 106. W publikacji też tego nie odnalazłem.
 - (9) Na stronie 109 pojawia się dziwny termin: „interstitial zero dopants”.
 - (10) W 3-ciej linii drugiego akapitu podsumowania na str. 131 jest stwierdzenie, które jest sprzeczne ze danymi przedstawionymi na rys. 4.9. Poproszę o odniesienie się do tej uwagi.
 - (11) Uwaga ogólna. Autor korzysta w rozprawie zbyt często ze skrótów. Owszem, są one zdefiniowane, choć nie wszystkie (np. „RT” na str. 23). Dobry obyczaj nakazuje rezygnować ze skrótów w tytułach, wstępach, podsumowaniach i podpisach pod rysunkami. Oczywiście, pod warunkiem, że w grę nie wchodzi czynniki nadrzędne, np. ograniczenie miejsca w publikacjach typu „Letters”. W pozostałych wypadkach jest to miły ukłon w stronę czytelnika.

Podsumowując, pomimo przedstawionych uwag krytycznych, uważam, że, przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra Krzysztofa Grochota prezentuje wysoki poziom naukowy. Zawiera dokumentację bardzo bogatego materiału doświadczalnego uzyskanego różnymi technikami pomiarowymi, co jednoznacznie wskazuje na duży talent



Doktoranta jako fizyka doświadczalnika. Omawiane badania dotyczą ważnych problemów z punktu widzenia rozwoju fizyki tej tematyki i być może wpłyną na opracowanie nowych technologii, są oryginalne i zdecydowanie poszerzają wiedzę.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra Krzysztofa Grochota spełnia wymogi formalne i zwyczajowe stanowione przez odnośne przepisy dotyczące rozpraw doktorskich. W szczególności rozprawa ta stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego przez Doktoranta, wykazuje odpowiednią wiedzę teoretyczną i umiejętność prowadzenia badań naukowych i dlatego wnoszę o dopuszczenie mgra Krzysztofa Grochota do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania jemu stopnia naukowego doktora nauk fizycznych, w tym do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Warszawa, 09 lipca 2023 r.

Maciej Gawlicki

