

prof. dr hab. inż. Marek Przybylski
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
i Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii,
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

R E C E N Z J A

Rozprawy Doktorskiej mgr Tomasza Zalewskiego
pt. „Ultrafast coherent photo-magnetic switching in ferrimagnetic garnets”

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska p. mgr Tomasza Zalewskiego pt. „Ultrafast coherent photo-magnetic switching in ferrimagnetic garnets” została napisana na podstawie badań przeprowadzonych pod kierunkiem prof. dr hab. Andrzeja Stupakiewicza na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Białymstoku. Badania prowadzone przez p. mgr Tomasza Zalewskiego dotyczyły ultraszybkiej dynamiki przełączania magnetyzacji za pomocą impulsów promieniowania laserowego.

Celem badań podjętych przez mgr Tomasza Zalewskiego było zrozumienie mechanizmów ultraszybkiego koherentnego przełączania magnetyzacji poprzez indukowanie i kontrolę anizotropii magnetycznej w warstwach granatów domieszkowanych jonami kobaltu w szerokim zakresie temperatur. Badania realizowane były przy wykorzystaniu przygotowanego przez mgr T. Zalewskiego stanowiska pomiarowego do przestrzennego i czasowo-rozdzielczego obrazowania dynamiki precesji oraz przełączania magnetyzacji indukowanej femtosekundowymi impulsami światła laserowego.

Rozprawa doktorska p. mgr Tomasza Zalewskiego jest napisana w poprawnym i zrozumiałym języku angielskim. Rozprawa ma raczej klasyczny układ, czyli rozpoczyna się od wstępu (rozdz.1) będącego bardzo skrótowym omówieniem problemu dynamiki magnetyzacji, termicznego i nietermicznego wyłącznie optycznego przełączania magnetyzacji i opisem celów pracy. W kolejnym rozdziale Doktorant opisuje materiały i próbki, które są przedmiotem jego badań (rozdz.2), a następnie opisuje stosowane przez siebie techniki eksperymentalne (rozdz.3), zaczynając od magneto-optycznego efektu Faradaya, poprzez magneto-optyczne obrazowanie (czyli mikroskopię opartą o efekt Faradaya lub efekt Kerra), na ultraszybkich metodach czasowo-rozdzielczych kończąc. Kolejne trzy rozdziały mają charakter merytoryczny i są poświęcone trzem zagadnieniom badawczym: przestrzenno-czasowej dynamice przełączania magnetyzacji wyindukowanej światłem (rozdz.4), asymetrycznemu nietermicznemu przełączaniu fotomagnetycznemu różnych stanów (kierunków) magnetyzacji (rozdz.5) i nietermicznemu ultraszybkemu wyłącznie optycznemu przełączaniu magnetyzacji w trybie przełączania („toggle”) (rozdz.6), po czym następuje podsumowanie, lista referencji literaturowych i lista publikacji, których współautorem jest Doktorant.

Wstęp (rozdz.1) jest napisany w sposób skondensowany i zajmuje zaledwie 7-10 spośród 122 stron całej rozprawy. Po krótkim ogólnym opisie zjawisk w ultrakrótkiej skali czasowej (rozdz.1.1) Doktorant opisuje dynamikę magnetyzacji ograniczając się do równania Landaua-Lifshitz-Gilberta (LLG) i tylko zauważenia innych czasem koniecznych formalizmów opisu zachodzących zjawisk (rozdz.1.2), szybko przechodząc do najważniejszych mechanizmów ultraszybkiego przełączania magnetyzacji z wykorzystaniem światła takich jak wyłącznie optyczne termiczne przełączanie magnetyzacji i wyłącznie optyczne nietermiczne przełączanie foto-magnetyczne. Tutaj zauważam, że równanie LLG coraz częściej oznacza się jako LLGS dodając nazwisko

Slonczewski. Na pewno warto to zrobić, bo odkrycie Johna Slonczewskiego jest nie tylko interesujące z punktu fizyki, ale już praktycznie wykorzystywane w niezaniikających pamięciach magnetycznych swobodnego dostępu (MRAM) opartych o efekt *spin transfer torque* (STT). Spośród dyskutowanych mechanizmów ultraszybkiej dynamiki magnetyzacji, coraz częściej mówi się o tej indukowanej wyłącznie ultrakrótkimi impulsami laserowymi. Taki nietermiczny efekt w ostatnich latach zaobserwowano w dielektrycznych warstwach granatów, w których femtosekundowe impulsy promieniowania laserowego pozwalają na przełączanie kierunku wektora magnetyzacji, czyli na ultraszybki zapis fotomagnetyczny. To też ma to ogromne znaczenie technologiczne ze względu na możliwość optycznego zapisu magnetycznego z szybkością znacznie większą niż w dotychczas stosowanych technologiach. Ten rozdział kończy się dobrze przedstawionymi celami jakie autor Rozprawy postawił przed sobą, w szczególności z badawczego punktu widzenia. Podobnie jak w przypadku poprzednio recenzowanej przeze mnie rozprawy doktorskiej z tej samej grupy badawczej, trochę mi przeszkadza zamieszczenie celów pracy i organizacji rozprawy po merytorycznym wstępie, a nie na samym początku pracy (bo zaczyna się czytać pracę nie znając jej celów – celów badań - i organizacji poszczególnych rozdziałów). Mam też wrażenie, że rozprawa doktorska ma m.in. być dowodem na opanowanie przez Doktoranta szeregu zagadnień fizycznych, dla których prowadzone przez niego badania są istotne i znaczące, a także dowodem na orientację w aktualnej literaturze przedmiotu, stąd nie ma nic przeciwko nieco większemu rozbudowaniu tego pierwszego wprowadzającego rozdziału.

W rozdz.2 Doktorant opisuje materiały, które są przedmiotem jego badań, a także badane próbki nawet je numerując wg bliżej nie wyjaśnionego klucza. Jednak to czytelnik musi sobie przyporządkować dane np. z Tabeli 2.1 do wcześniejszego miejsca ich syntezy i zauważyć, że z punktu widzenia dalszych rozdziałów rozprawy najważniejszym parametrem jest blisko zerowy lub znaczący tzw. *misct angle* czyli kąt odchylenia rzeczywistej powierzchni próbki od krystalograficznej płaszczyzny (100). Te próbki to cienkie warstwy (o grubości rzędu 8 μm) granatu itrowo-żelazowego domieszkowanego Co. Wszystkie próbki, określone jako $\text{Y}_2\text{Ca}_1\text{Fe}_{5-x-y}\text{Co}_x\text{Ge}_y\text{O}_{12}$ (w skrócie YIG:Co), zostały wytworzone metodą epitaksji z fazy ciekłej na podłożu GGG albo w *Leibnitz Institute of Photonic Technology (IPHT)* w Jenie w Niemczech ($x=0.1$, $y=1$, seria I), albo w *Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)* w Meudon we Francji ($x=0.08$, $y=0.9$, seria II). W rozdziale tym Doktorant w szczególności opisuje własności magnetyczne i strukturę domenową próbek.

W kolejnym, czyli rozdz.3, mgr T. Zalewski opisuje stosowane przez siebie najważniejsze metody badawcze i techniki pomiarowe. Rozpoczyna od magneto-optycznego efektu Faradaya (rozdz.3.2), dyskutując w szczególności przydatność tej techniki do obrazowania struktury domenowej (rozdz.3.3). Rozdział 3.4 to już ultraszybkie czasowo-rozdzielcze techniki pomiarowe służące realizacji podstawowego celu tej Rozprawy jakim jest zbadanie dynamiki różnorodnych procesów przełączania magnetyzacji. W tym rozdziale opisany został laser femtosekundowy (decydujący o rozdzielczości czasowej w obserwacji niezwykle szybkich procesów) i podstawowa zasada/idea metody *pump-probe*. W kolejnej części tego rozdziału Doktorant omawia czasowo-rozdzielczą spektroskopię magneto-optyczną z uwzględnieniem wcześniej opisanego lasera femtosekundowego i opisanego wcześniej zestawu „*pump-probe*”. Nie bardzo wiem dlaczego ten podrozdział rozdziału o metodach eksperymentalnych jest zatytułowany „*time-resolved magnetization dynamics*” (dynamika magnetyzacji nie jest techniką tylko procesem, nie do końca czasowo-rozdzielczym...). Oczywiście znajomość i umiejętność wykorzystywanie zaawansowanych technik pomiarowych jest warte podkreślenia, szczególnie, jeśli z zamieszczonego opisu tych technik wynikają ich zalety i wady, które Doktorant potrafi wykorzystać do realizacji celów swojej pracy.

Kolejne rozdziały, czyli 4, 5 i 6, mają charakter merytoryczny dedykowany uzyskanym wynikom pomiarowym i ich gruntownej dyskusji. Przedstawione w tych wyniki badań zostały otrzymane przy wykorzystaniu unikatowego stanowiska do przestrzennego i czasowo-rozdzielczego obrazowania magnetoptycznego dynamiki precesji oraz przełączania magnetyzacji indukowanych femto-sekundowymi impulsami światła (układ pomiarowy, w uruchomieniu którego mgr T. Zalewski miał znaczący udział). Ważnym elementem dyskusji otrzymanych wyników jest wykorzystanie przez Doktoranta metod numerycznych, dzięki którym możliwe było modelowanie m.in. fotoindukowanej anizotropii magnetycznej oraz dynamiki przełączania magnetyzacji.

Rozdział 4 został poświęcony analizie różnych scenariuszy przełączania magnetyzacji impulsami światła laserowego w YIG:Co ze względu na różną strukturę domen magnetycznych, a właściwie różne kierunki magnetyzacji dla kubicznej symetrii granatów. Wykorzystując możliwości eksperymentalne opisane w rozdz.3, mgr T. Zalewski kompleksowo zbadał nowe możliwości wyłącznie optycznego (bez zewnętrznego pola magnetycznego) przełączania magnetyzacji, zarówno w przypadku stanu jednodomenowego, jak i stanów wielodomenowych, oraz w przypadku pojedynczych domen cylindrycznych. W celu wyjaśnienia mechanizmu przełączania mgr T. Zalewski przeprowadził czasowo-rozdzielcze badania przestrzennego rozkładu magnetyzacji indukowanej femtosekundowymi impulsami laserowymi. Przestrzenny rozkład magnetyzacji uzyskiwany był poprzez analizę w obszarze kołowym o średnicy rzędu $10\ \mu\text{m}$, przesuwany względem środka badanego obszaru: dla $\Delta d > 60\ \mu\text{m}$ badany obszar nie wykazywał żadnej odpowiedzi na pompujący impuls światła laserowego, natomiast dla $\Delta d < 20\ \mu\text{m}$ lokalna intensywność wiązki światła przekraczała wartość progową skutkując przemagnesowaniem, czyli odwróceniem kierunku prostopadłej składowej magnetyzacji. Warto podkreślić, że mimo stosunkowo prostej sytuacji jaką był jednodomenowy stan magnetyczny próbki, sam proces przemagnesowania nie był pozbawiony niuansów wynikających np. z oczywistych zmian magnetyzacji wraz ze zmianą temperatury. Oczywiście w przypadku próbki wielodomenowej sytuacja była bardziej skomplikowana i wymagała rozdzielnej analizy efektów przestrzennych i czasowych. Metodę postępowania najlepiej oddaje Fig.4.5, gdzie Doktorant pokazał strukturę domenową próbki (po czasie 1 ns od wzbudzenia impulsem światła laserowego) dla różnych wartości strumienia światła (gęstości energii), a także zasięg przełączania magnetyzacji w funkcji wielkości strumienia. Wynik wydaje się intuicyjny zarówno z powodu liniowego charakteru tej zależności, jak i efektywniejszego przełączania w przypadku małych domen magnetycznych względem tych dużych. Ciekawy i ważny wynik badań opisanych w tym rozdziale można podsumować jako zaobserwowanie różnych progowych wartości gęstości energii impulsu laserowego koniecznych do przełączenia domen magnetycznych.

Rozdział 5 jest rozwinięciem tezy postawionej w rozdz.4 sprowadzającej się do oczekiwanego znaczenia trajektorii przełączanej magnetyzacji dla wynikowej struktury domenowej (co o tyle nie dziwne, że wyjściowa struktura domenowa może być złożona, przy równie złożonej symetrii magnetokrystalicznej próbek, w szczególności w przypadku *miscut angle* rzędu kilku stopni). Narzucającym się i perfekcyjnie zrealizowanym eksperymentem była analiza uśrednionej orientacji magnetyzacji (czyli jej wartość zredukowana do maksymalnej) w ustalonym obszarze, w funkcji czasu, po wzbudzeniu 50 fs-owym impulsem światła laserowego o różnych kierunkach polaryzacji liniowej. W celu lepszego (ilościowego) zrozumienia charakteru mierzonych zależności mgr T. Zalewski zaproponował model, a właściwie tensorową analizę takiego fotomagnetycznego wzbudzenia ze względu na czasowe zmiany kierunku magnetyzacji zauważając „uderzającą zgodność” z eksperymentem. Co więcej, Doktorant pokusił się o numeryczną symulację trajektorii zmian orientacji magnetyzacji, opracował model

teoretyczny zawierający tensor fotomagnetycznej podatności oraz formalizm Landaua-Lifshitz-Gilberta. Porównanie z danymi eksperymentalnymi pokazało prawie idealną zgodność z eksperymentem (kluczowy jest tutaj Fig.5.7) i stało się istotnym wkładem w zrozumienie szczegółów zachodzącego procesu (w szczególności znaczenia znaku początkowego fotomagnetycznego momentu skręcającego odpowiedzialnego za precesyjny obrót magnetyzacji). Najistotniejszym rezultatem badań opisanych w tym rozdziale jest zademonstrowanie asymetrycznej dynamiki przełączania magnetyzacji, która wynika z magnetokrystalicznej symetrii YIG:Co oraz momentu skręcającego indukowanego sekwencją liniowo spolaryzowanych impulsów światła laserowego o ortogonalnych kierunkach polaryzacji liniowej światła (wzdłuż kierunków krystalograficznych [100] i [010] w warstwie granatu).

I wreszcie, chyba najważniejszy, rozdział 6, w którym mgr T. Zalewski stara się odpowiedzieć na pytanie czy „tryb zwrotnego przełączania” („toggle”) może być osiągnięty bez zmiany kierunku polaryzacji światła i to w sposób nie termiczny, czyli bez lokalnej zmiany temperatury. Dotychczas tego typu przełączanie obserwowano wyłącznie w materiałach metalicznych poprzez indukowane światłem termiczne rozmagnesowanie. Do badań opisanych w tym rozdziale wybrano próbki bez „miscut angle”, czyli o czystej symetrii kubicznej, dla których wszystkie „stany magnetyzacji” są równoważne. W takiej sytuacji pierwszy impuls zmieniał anizotropię magnetyczną powodując przełączenie, a drugi impuls przełączał magnetyzację z powrotem do stanu początkowego. Moją uwagę zwrócił rozdz.6.1, w którym mgr. T. Zalewski wyjaśnia na czym polega jego oryginalne podejście do „trybu przełączania” w stosunku do dotychczasowego rozumienia tego zjawiska w przypadku stopów GdFeCo. W stopach GdFeCo odwrócenie kierunku magnetyzacji było możliwe ze względu na krótkoczasowe zmiany długości wektora magnetyzacji spowodowane ultraszybkim lokalnym grzaniem próbki. Natomiast celem Doktoranta było znalezienie takiego sposobu, który pozwoliłby na „zimny tryb przełączania” możliwy, czyli niesprzeczny z termodynamiczną zasadą symetrii Curie (mówiącą, że symetria zjawisk jest równa lub wyższa od symetrii przyczyn je wywołujących), tylko w przypadku przyczyny przełączenia działającej w znacznie krótszej skali czasowej niż czas potrzebny na uzyskanie równowagi termodynamicznej. Takie przełączanie znacząco redukowałoby rozpraszanie energii, np. w przypadku aplikacyjnego wykorzystania tej metody do magnetycznego zapisu informacji. Aby pomysł zrealizować mgr T. Zalewski musiał wygenerować efektywne pole magnetyczne działające na magnetyzację dokładnie przez połowę okresu precesji. Solidnie przeprowadzony eksperyment pokazał, że przy zoptymalizowanej polaryzacji impulsów laserowych względem kierunków krystalograficznych (i odpowiadających im osi łatwych anizotropii magnetycznej), praktycznie każdy impuls (zwłaszcza o tej samej polaryzacji) powodował odwrócenie prostopadłej składowej magnetyzacji. To wykreowało kilka kolejnych narzucających się pytań, m.in. o sekwencję impulsów, etc., etc., a także o wpływ temperatury. Warty uwagi jest tutaj Fig.6.7c) pokazujący niekoniecznie intuicyjny wzrost czasu przełączania wraz ze wzrostem temperatury próbki. Ciekawym wynikiem badań opisanych w tym rozdziale jest więc zaobserwowanie efektu nietermicznego, zwrotnego przełączania magnetyzacji indukowanego wyłącznie kolejnością femtosekundowych impulsów lasera bez zmiany ich polaryzacji. Takiej obserwacji dokonano po raz pierwszy, jak pisałem wcześniej jedyny dotychczas znany mechanizm zwrotnego przełączania dotyczył termicznego rozmagnesowania. Nowy efekt, wykraczający poza przewidywania zasady symetrii Curie, został zaobserwowany w bardzo szerokim zakresie temperatur w warstwach YIG:Co wytworzonych z zachowaniem symetrii magnetokrystalicznej.

W swojej rozprawie mgr T. Zalewski zaprezentował także możliwość sterowania energią przełączania oraz dyssypacją ciepła, poprzez zmiany zarówno intensywności impulsu lasera (czyli gęstości energii na próbce), jak i magnetycznej anizotropii warstw granatów.

Co więcej, Doktorant wykazał, że czas i efektywność przełączenia są wzajemnie konkurencyjne i skrócenie tego czasu efektywności przełączania nie poprawia. Uzyskane wyniki wskazują na rekordową wydajność zapisu fotomagnetycznego, do którego, jak pokazał mgr T. Zalewski, nie jest wymagana zmiana polaryzacji światła. Wartość energii dyssypacji ciepła w trakcie przełączania magnetyzacji jest rekordowo niska – ok. 3 J/cm^3 (odpowiada to energii ok. 10 aJ/bit przy ekstrapolacji do objętości jednego bitu magnetycznego o rozmiarach $20 \times 20 \times 10 \text{ nm}^3$). Ze względu na bardzo krótki czas przełączania i wykorzystując efekt zwrotnego przełączania, w granatach YIG:Co możliwy jest zapis magnetyczny z częstotliwością nawet 50 GHz . Dzięki temu wyniki uzyskane przez Doktoranta otwierają nowe możliwości badań w dziedzinie topologicznej opto-spintroniki i zimnego ultraszybkiego zapisu magnetycznego. W tym miejscu warto podkreślić możliwość sterowania magnetyzacją wyłącznie za pomocą impulsów światła laserowego, która kryje w sobie ogromny potencjał nowych technologii umożliwiających szybszy niż dotychczasowy sposób zapisu danych przy minimalnym zużyciu energii. Rozprawa doktorska mgr T. Zalewskiego zdecydowanie wpisuje się w ten nurt badań, wyróżniając się głębszym zrozumieniem metody zapisu fotomagnetycznego.

Tradycyjnie rozprawę kończą konkluzje, które są w większości podsumowaniem badań. Trochę brakuje wyraźnego podkreślenia co z tych badań wyniknęło, czyli co jest wartością dodaną w stosunku do stanu naszej dotychczasowej wiedzy. Jednak to wrażenie równoważy ostatnia część konkluzji, zatytułowana „*outlook*”, która wymienia co należałoby jeszcze zrobić aby zapis fotomagnetyczny rzeczywiście zastąpił zapisy dotąd stosowane. Najogólniej mówiąc chodzi o optymalizację mechanizmów odpowiedzialnych za dynamikę magnetyzacji wzbudzoną szybkimi impulsami laserowymi, i o materiały, dla których wyłącznie optyczne (bez zewnętrznego pola magnetycznego) ultraszybkie przemagnesowywanie byłoby najbardziej efektywne.

Ostateczne zamknięcie rozprawy to bibliografia, składająca się w tym przypadku z 154 pozycji literaturowych, do których Doktorant odnosi się w tekście rozprawy, i lista pięciu własnych publikacji (do których Doktorant odwołuje się na początku każdego rozdziału merytorycznego). Lista 14 prezentacji konferencyjnych (z nie zawsze zaznaczoną formą prezentacji) jest dobrym końcowym podkreśleniem zaangażowania i aktywności naukowej mgr Tomasza Zalewskiego.

Praca zawiera dużą ilość wyników eksperymentalnych, w większości uzyskanych z wykorzystaniem własnego układu eksperymentalnego dedykowanego do konkretnych pomiarów będących przedmiotem tej rozprawy. Publikacje wymieniane na początku każdego rozdziału (i na końcu rozprawy) są wieloautorskie. Prosiłoby się więc, aby Doktorant w jakiś sposób w tekście rozprawy zaznaczał swój udział. Jakkolwiek w tym przypadku lista autorów poszczególnych publikacji nie jest długa, i stosunkowo łatwo można rozstrzygnąć co jest bezpośrednim efektem pracy i osiągnięciem Doktoranta, a co pozostałych członków Zespołu.

Jak w każdej rozprawie można znaleźć drobne uchybienia redakcyjne, czy też nieliczne błędy edytorskie, które zwykle nie mają one znaczenia dla merytorycznej oceny rozprawy (także i w tym przypadku nie zmieniają oceny przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej). Wymienianie takich drobnych usterek recenzenci traktują często jako ich obowiązek, który jednak niczemu nie służy. No bo polskie przepisy nie przewidują możliwości wprowadzania poprawek do zrecenzowanej rozprawy doktorskiej, a przecież znacznie logicznym rozwiązaniem byłoby publikowanie (nawet tylko wewnątrz-universyteckie), czy choćby tylko umieszczanie w uniwersyteckich repozytoriach, już rozpraw poprawionych, czyli uwzględniających uwagi recenzentów (dokładnie tak jak robimy to recenzując manuskrypty przysyłane do redakcji różnych czasopism naukowych). Ograniczam się więc tylko do naprawę kilku uwag tego typu:

- (1) rysunki i opisy osi: gdzieś pojawiają się opisy osi, których nie do końca rozumiem; np. „*time-resolved Faraday rotation*” (chodzi pewno o „*Faraday rotation*”),
- (2) rysunki i opisy osi: gdzieś niekompletne, np. jest podane, że „*normalized*”, ale nie wiadomo do czego,
- (3) niektóre rysunki nie są omówione/wzmiankowane w tekście rozprawy, dotyczy to np. Fig.6.7b) i c), Fig.6.8 c) i d), etc.

Już „tradycyjnie” recenzując rozprawę doktorską w grupie prof. Stupakiewicz w Uniwersytecie w Białymstoku, mam pytanie ogólne: czy Doktorant i jego Promotor zamierzają upowszechnić tekst recenzowanej rozprawy doktorskiej inaczej niż w formie kilku publikacji, na których proces doktoryzowania jest oparty? No bo skoro można zrobić tzw. zszywkę, skoro jest z czego ją zrobić, to po co pisać monografię? A skoro ma być monografia, to na pewno zawiera wstęp umożliwiający dalsze czytanie, a więc może być publikacją przeglądową, a może rozdziałem w książce? Innymi słowy, co zrobić aby poszerzyć krąg czytelników, i aby uzyskanie stopnia doktora nie było jedynym celem pracy włożonej w przygotowanie stu kilkudziesięciu stron solidnych naukowych rozważań...

I wreszcie, korzystając z przywilejów recenzenta, byłbym zobowiązany, gdyby w trakcie publicznej obrony Doktorant zechciał przedstawić własny punkt widzenia na przyszłość magnetooptycznego zapisu informacji, w świetle tak ostatnio eksploatowanej orbitroniki, czyli możliwości oparcia logiki komputerowej nie na spinie elektronu (tego dotyczy tzw. spintronika), tylko na jego momencie orbitalnym. Czy te nowe technologie są konkurencyjne dla metod optycznych opisywanych w rozprawie i rozwijanych w Uniwersytecie w Białymstoku?

W swojej recenzji chciałbym też dodać, że mgr Tomasz Zalewski jest absolwentem Szkoły Doktorskiej Nauk Ścisłych i Przyrodniczych działającej w Uniwersytecie w Białymstoku, której był uczestnikiem w latach 2019-2023. W latach 2019-2022 był wykonawcą w projekcie FNP TEAM pt. „*Innovative technology of cold ultrafast photo-magnetic recording and novel approach to ultrafast optospintronics*” realizowanym na Wydziale Fizyki UwB. Mgr Tomasz Zalewski odbył staż zagraniczny w Radboud University w Nijmegen (Holandia), uczestniczył w *European School on Magnetism* w Brnie (Czechy) w 2019 roku. Brał udział w szkołach z femtomagnetyzmu i magnoniki organizowanych w ramach europejskiego projektu COST CA17123: *Magnetofon Summer School* w Lizbonie (Portugalia), *Summer School „Ultrafast magneto-electrics”* w Samoborze (Chorwacja) i *International Advanced School on Magnonics* w Porto (Portugalia). W latach 2020-2022 mgr T. Zalewski przeprowadził cykl zajęć dydaktycznych oraz aktywnie uczestniczył w akcjach promocyjnych Wydziału Fizyki UwB.

Mgr T. Zalewski jest współautorem dwóch prac już opublikowanych (jedna została wyróżniona przez edytora czasopisma *Applied Physics Letters*). Natomiast kolejne trzy prace zostały złożone w tak prestiżowych czasopismach jak *Physical Review Letters*, *Physical Review Applied* i *Nature Communications*, i już za chwilę powinny ukazać się drukiem. Doktorant jest współautorem 14 prezentacji na konferencjach, w większości międzynarodowych, takich jak coroczne *Joint European Magnetic Symposia* (2020, 2022 i 2023) oraz *Joint MMM-Intermag Conference* w USA (2022), podczas których wygłosił 9 referatów.

Podsumowując należy stwierdzić, że dorobek jak i tematyka pracy doktorskiej mgr Tomasza Zalewskiego są bardzo aktualne, bo dotyczą ultraszybkiego magnetyzmu, intensywnie rozwijającego się obszaru badań w fizyce. Zainteresowanie tym obszarem badań ma zarówno charakter podstawowy związany ze zrozumieniem mechanizmów oddziaływania ultrakrótkich impulsów światła laserowego z materiałami magnetycznymi,

jak i aplikacyjny wynikający z możliwości sterowania magnetyzacją wyłącznie za pomocą impulsów laserowych. Taka możliwość to rozwój nowych technologii bazujących na najszybszym jak dotąd zapisie danych przy minimalnym zużyciu energii. Rozprawa doktorska mgr Tomasza Zalewskiego jest znaczącym wkładem do tego nurtu, rozwijając metodę zapisu fotomagnetycznego w oparciu o femtosekundowe impulsy światła.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr Tomasza Zalewskiego spełnia wszystkie wymagania obowiązującej ustawy „Prawo o nauce i szkolnictwie wyższym”, jest dowodem naukowej dojrzałości Doktoranta i jednoznacznie kwalifikuje do stopnia naukowego doktora w dyscyplinie „nauki fizyczne”, w dziedzinie „nauk ścisłych i przyrodniczych”. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie mgr Tomasza Zalewskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Biorąc pod uwagę aktualność i wartość naukową uzyskanych wyników badań opisanych w recenzowanej rozprawie doktorskiej, sposób dyskusji opisywanych problemów badawczych, osiągnięcia naukowe Doktoranta takie jak 5 (praktycznie) opublikowanych prac w wysoko notowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym (w których mgr T. Zalewski jest zawsze pierwszym autorem, a w czterech z nich jest także autorem korespondującym) oraz udział w kilkunastu konferencjach naukowych, stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej p. mgr Tomasza Zalewskiego.

prof. dr hab. inż. Marek Przybylski

Kraków, 12 lutego 2024