

Warszawa, 20 grudnia 2022 r.

prof. dr hab. Andrzej Wawro
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie

Ocena osiągnięcia naukowego dra Bivasa Rany w związku z postępowaniem o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego

Przedmiotem niniejszej recenzji jest opis osiągnięcia naukowego autorstwa dra Bivasa Rany z Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, sporządzony w celu uzyskania naukowego stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie nauk fizycznych.

Profil naukowy Habilitanta

Dr Bivas Rana uzyskał tytuł magistra (*Master of Science*) w dziedzinie fizyki w Indyjskim Instytucie Technologicznym w Dehli (Indie) w roku 2009. Pięć lat później obronił rozprawę i uzyskał stopień doktora w dziedzinie fizyki na Uniwersytecie w Kalkucie (Indie). Zarówno praca doktorska, jak i późniejsza aktywność naukowa, były poświęcone dynamice namagnesowania. Po przybyciu Habilitanta do Polski w roku 2021 jego dyplom doktorski został nostryfikowany na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Białymstoku.

Po uzyskaniu stopnia doktora Bivas Rana przez siedem lat był związany naukowo z grupą prof. Otaniego w japońskim instytucie badawczym RIKEN. Od początku roku 2021 jest zatrudniony jako adiunkt na Wydziale Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu.

Prace habilitacyjne

Wspólnym mianownikiem przedstawionych siedmiu prac habilitacyjnych, opublikowanych w latach 2017–2020, jest opis dynamiki, w tym rozchodzenia się fal spinowych, w układach typu metal ciężki (przeważnie Ta) / ferromagnetyk (związek CoFeB) / izolator (MgO lub Al₂O₃). Układy takie charakteryzują się właściwościami, które mogą być modyfikowane w szerokim zakresie, umożliwiając tworzenie licznych konfiguracji magnetycznych o zróżnicowanych parametrach statycznych i dynamicznych. Należy do nich zaliczyć silną zależność anizotropii magnetycznej od grubości warstwy ferromagnetycznej, słabe tłumienie wzbudzeń magnetycznych oraz silny magnetoopór tunelowy w strukturach złączowych. Właściwości tego rodzaju

układów powodują, że są one bardzo obiecujące zarówno w kontekście badań podstawowych, jak i praktycznych zastosowań. Wybrane prace habilitacyjne przedstawiają logiczny, spójny i konsekwentny ciąg prowadzonych badań dokumentujących i wyjaśniających: (i) wpływ przyłożonego napięcia na dynamikę namagnesowania, (ii) możliwość lokalizacji tych modyfikacji, (iii) indukowanie kryształów magnonicznych oraz struktur falowodowych, które pozwalają na kontrolowaną propagację fal spinowych i przeprowadzenie operacji logicznych z ich wykorzystaniem oraz możliwość modyfikacji (iv) parametru tłumienia i (v) prostopadłej anizotropii magnetycznej (PMA) wskutek przyłożenia napięcia elektrycznego. Nieco zaskakujący jest całkowity brak analizy wpływu oddziaływań Dzyaloshinskii-Moriya (DMI) na obserwowane właściwości. Konfiguracja strukturalna badanych układów jest bardzo typowa dla występowania silnego DMI. Oddziaływania te istotnie modyfikują propagację fal spinowych, która jest jednym z głównych przedmiotów opisanych badań.

Poniżej zamieszczony jest krótki opis wyników przedstawionych w poszczególnych pracach habilitacyjnych.

W pracy habilitacyjnej [H1] opisane zostały zmiany dynamiki namagnesowania zachodzące pod wpływem przyłożonego napięcia elektrycznego, obserwowane w złączach tunelowych CoFeB/MgO/CoFeB o zróżnicowanej anizotropii okładek. Napięcie modyfikuje anizotropię prostopadłą, co zostało zilustrowane zależnością tunelowego magnetooporu od pola dla różnych wartości napięcia. Charakter wzbudzeń stanu magnetycznego istotnie zależy od energii, która je wymusza. Zarejestrowano wartość progową energii, poniżej której wzbudzenia wykazują liniowy charakter, a powyżej – nieliniowy. Nieliniowa i niekoherentna dynamika namagnesowania obniża odpowiedź magnetyczną wskutek silnego zredukowania rozwartości stożka precesji wektora namagnesowania. Jedną z przyczyn takiego zachowania jest transfer spinowego momentu z jednorodnego wzbudzenia ferromagnetycznego do zdegenerowanych fal spinowych, generujących się poza obszarem wzbudzenia. Przeprowadzone symulacje mikromagnetyczne odzwierciedliły eksperymentalnie obserwowane właściwości magnetyczne. Ilościowe rozbieżności przy określeniu parametrów stożka precesji przypisano m.in. ciepłu Joule'a, które nie jest uwzględniane w symulacjach.

Treścią pracy [H2] jest porównanie sposobów wzbudzania fal spinowych w cienkowarstwowych strukturach Ta/CoFeB/MgO za pomocą prądu płynącego przez antenę oraz poprzez przyłożenie napięcia elektrycznego do przygotowanego kontaktu. Propagacja fal spinowych była rejestrowana z wykorzystaniem efektu Kerra w urządzeniu pozwalającym na czasowo rozdzieloną rejestrację sygnału. Pokazano, że wzbudzenia fal za pomocą napięcia są bardziej zlokalizowane niż przy użyciu anteny prądowej i pośrednictwu pola Oersteda. Amplituda fal jest proporcjonalna do amplitudy wzbudzającego napięcia. Wytworzone w ten sposób fale mogą rozchodzić się na odległość kilku mikrometrów, ale zasięg ten maleje ze wzrostem przyłożonego pola magnetycznego. Zdefiniowano parametr λ_d , będący miarą odległości, na jakie propagują

się fale spinowe, i pokazano jego malejącą zależność od pola magnetycznego. Obie metody wzbudzeń (antena i napięcie) charakteryzują się podobnymi zasięgami fal spinowych, choć nieco odmiennym przebiegiem zaniku ich intensywności z odległością. Wyniki eksperymentalne są zbieżne z symulacjami mikromagnetycznymi. Zauważono, że wzbudzenia napięciowe fal spinowych pozwalają na znacznie większą lokalizację, która może mieć istotne znaczenie w przypadku projektowania i konstruowania urządzeń wykorzystujących tego rodzaju fale.

Wyniki symulacji numerycznych, opublikowane w pracy [H3], ukierunkowane są na praktyczne wykorzystanie fal spinowych w operacjach logicznych. Symulacje przeprowadzono dla falowodów o parametrach odpowiadających strukturze Ta/CoFeB/MgO. Falowody zostały wygenerowane w jednorodnym płaszczyznowo układzie po przyłożeniu napięcia elektrycznego pomiędzy dolną warstwą struktury i górną elektrodą. Powoduje ono lokalną modyfikację parametrów magnetycznych, tworząc w ten sposób materiał o odmiennych właściwościach. Jego kształt jest zdefiniowany przez kształt elektrody. Umożliwia to wytworzenie falowodu o dowolnej geometrii. Zamodelowano relacje dyspersji dla różnych wartości napięć oraz propagację fal spinowych dla różnej geometrii falowodu. Uzyskany wynik pozwolił na optymalne dobranie napięcia prowadzącego do powstania falowodu. W dalszym kroku przeprowadzono analizę rozchodzenia się fal spinowych w pojedynczych falowodach i ich grupach o zróżnicowanych kształtach planarnych oraz w formie rozgałęziających się układów. Modyfikacje ich parametrów polem elektrycznym umożliwiają jednocześnie rozchodzenie się w tym samym falowodzie fal spinowych o różnych wektorach falowych. Na złożonych układach falowodów o strukturze bramek zademonstrowano możliwość wykonania operacji logicznych (XNOR i NAND) oraz przełączania propagacji fal spinowych w rozgałęzionych falowodach pod wpływem przyłożonego napięcia. Efekt ten może znaleźć zastosowanie w bardziej złożonych urządzeniach typu multiplexer lub demultiplexer.

Praca [H4] opisuje możliwość wytworzenia kryształów magnonicznych konfigurowanych za pomocą przyłożonego napięcia, wykorzystując wcześniej uzyskane wyniki. W tym celu przeprowadzono badanie warstw Ta/CoFeB/MgO z naniesionym układem równoległych elektrod wykonanych z ITO, dzięki którym wytwarzano pole elektryczne w warstwie MgO. Po przyłożeniu napięcia, modyfikującego lokalnie PMA w materiale magnetycznym, powstały dwa rodzaje obszarów paskowych o zróżnicowanych parametrach rozchodzenia się fal spinowych. Za pomocą pomiarów BLS pokazano pojawienie się w tych obszarach dwóch współistniejących relacji dyspersji wzbogacających magnoniczną strukturę pasmową warstwy. Propagacja fal spinowych w obszarach pod elektrodami może być dodatkowo modyfikowana wartością i znakiem przyłożonego napięcia. Jego wyłączenie przywraca jednorodność całej warstwy, dowodząc, że modyfikacje wywołane przyłożonym napięciem są całkowicie odwracalne. Wyniki eksperymentalne zostały potwierdzone w obliczeniach

numerycznych, wykonanych przy użyciu metody fal płaskich oraz w postaci wysymulowanych profili rozchodzących się fal spinowych w wytworzonym napięciowo systemie falowodów.

Praca [H5] omawia strojenie rezonansu magnetycznego oraz częstotliwości rozchodzących się fal spinowych z istotnym wkładem oddziaływań dipolowych w warstwach Ta/CoFeB/MgO za pomocą przyłożonego napięcia elektrycznego. Do detekcji propagujących się fal spinowych wykorzystano zjawisko pompowania spinów oraz odwrotny spinowy efekt Halla. Badania zostały przeprowadzone dla różnych napięć i grubości warstwy magnetycznej, której zmiana wpływa na efektywną anizotropię magnetyczną układu. Częstotliwość wzbudzonych fal spinowych jest wyższa od rezonansowych. Efektywność rozchodzenia się fal spinowych istotnie wzrasta, gdy efektywna anizotropia jest najslabsza. Jednocześnie zmiana częstotliwości fal spinowych z przyłożonym napięciem jest największa w tych warunkach. Przeprowadzone symulacje mikromagnetyczne, pokazały, że takich warstwach fale spinowe mogą dobrze propagować w wirtualnych falowodach wytworzonych lokalnie przez odpowiednie przyłożenie napięcia elektrycznego.

Kolejnym parametrem warstw FeCoB, który był analizowany pod kątem modyfikacji przyłożonym napięciem, było tłumienie wzbudzeń rezonansowych namagnesowania. Opis tego zagadnienia stanowi zawartość pracy [H6]. Parametr tłumienia odgrywa kluczową rolę w efektywności propagacji fal spinowych. Zaobserwowano, że pomimo liniowej zmiany PMA z napięciem, przebieg współczynnika tłumienia może mieć charakter nieliniowy, w szczególności dla cieńszych warstw magnetycznych. Ze względu na istotną rolę rodzaju okładek niemagnetycznych przeprowadzono badania porównawcze warstwy zasadniczej Ta/FeCoB/MgO w odniesieniu do różnych rodzajów tych okładek (Cu i Al₂O₃) w warstwach referencyjnych. Zmiany te miały zweryfikować przypuszczenie, że wspomniana nieliniowość może być spowodowana efektywnością pompowania spinów, zależną od obecności warstwy Cu (wpływającą na relaksację spinową), oraz określić rolę efektu Rashby na interfejsie z okładką izolatora. W celu potwierdzenia obserwacji eksperymentalnych zaproponowany został uproszczony model teoretyczny. Na jego podstawie wywnioskowano, że nieliniowa zmiana parametru tłumienia z napięciem związana jest z relaksacją prądu spinowego na interfejsie tlenkowym, wykazującym efekt Rashby.

Ostatnia z prac habilitacyjnych, [H7], miała na celu określenie wpływu metalicznej niemagnetycznej warstwy spodniej struktury na charakter współczynnika określającego efektywność modyfikacji anizotropii napięciem. Podobnie jak w pracy poprzedniej, przeprowadzono pomiary porównawcze struktury zasadniczej Ta/CoFeB/MgO z układami referencyjnymi, zawierającymi inne rodzaje okładek niemagnetycznych (Cu, Pt, Al₂O₃). Wyniki eksperymentalne pokazały, że dla spodniej warstwy Pt analizowany współczynnik wykazywał asymetryczne zachowanie względem

polaryzacji napięcia, szczególnie dla małych grubości warstwy magnetycznej. Takiego zachowania nie zanotowano w przypadku dwóch pozostałych warstw spodnich (Ta i Cu). Obserwowane różnice przypisane zostały odmiennemu wzrostowi warstw, obecności defektów oraz szorstkości na interfejsie tlenkowym. Powodują one asymetryczną zależność interfejsowej struktury elektronowej od przyłożonego napięcia. Przedstawiona argumentacja ma jednak charakter spekulacyjny i nie jest poparta bezpośrednimi badaniami strukturalnymi warstw.

Wybrane prace habilitacyjne zostały przygotowane w japońskiej grupie badawczej prof. Otaniego. Prawie wszystkie są eksperymentalne i wieloautorskie (4-8 współautorów). Wyjątkiem wśród nich jest czysto numeryczna, dwuautorska praca [H3], opisująca wyniki symulacji mikromagnetycznych. W sześciu pracach Habilitant jest pierwszym współautorem, a w pięciu ponadto korespondencyjnym.

Pełna aktywność publikacyjna

Dr Bivas Rana jest współautorem przynajmniej 40 prac opublikowanych w czasopiśmie naukowych (łącznie z habilitacyjnymi). Spośród nich 22 prace były opublikowane po roku 2014, a więc po uzyskaniu stopnia doktora. W bazie *Web of Science* w dniu przygotowania niniejszej oceny, w połowie grudnia 2022 r., po zadaniu tytułu kwerendy „Autor: Rana Bivas” znalazłem 31 pozycji. Najwyraźniej nie wszystkie prace zostały tam wylistowane (np. brak pracy *Realization of a micrometre-scale spin-wave interferometer* opublikowanej w *Scientific Reports* 5, 9873 (2015)). Wśród tych prac kilka jest blisko związanych z tematyką prac habilitacyjnych ([P1-P10] wymienione w Autoreferacie), a 5 innych ([P11-P15], tamże) ma charakter prac przeglądowych, w których nakreślone są perspektywy dalszego rozwoju omawianej dziedziny. Niektóre z tych prac zostały opublikowane w wysoko notowanych czasopiśmie, np. *Nature Nanotechnology* (impact factor: 39), *Science Advances* (14). Wiele z nich uzyskało wyróżnienie ze strony redaktorów czasopiśmie, w których były publikowane, a także w macierzystej jednostce RIKEN.

Habilitant jest również współautorem rozdziału w książce (monografii) zatytułowanej: *Nanomaterials and Their Applications*, wydanej przez Allied Publishers Pvt. Ltd.

Dr Rana swoje wyniki przedstawiał wielokrotnie na międzynarodowych konferencjach naukowych. Wygłosił 5 zaproszonych referatów, z czego dwa były prezentowane w Polsce, dwa w Indiach oraz jeden na dużej konferencji magnetycznej. Uzyskane rezultaty omawiał też dziewięciokrotnie w formie regularnego referatu. Był również współautorem 60 prezentacji plakatowych, z których 19 objaśniał osobiście. Jego dwie prezentacje konferencyjne (jedna w formie referatu i jedna plakatowa) uzyskały wyróżnienie.

Wyniki bibliometryczne

Przedstawiona przez Habilitanta statystyka bibliometryczna jego publikacji, wg danych bazy *Scopus*, wygląda następująco:

- * całkowita liczba cytowań : 995,
- * liczba cytowań bez autocytowań: 882,
- * indeks Hirscha: 18.

Ponadto średnie wartości czynnika wpływu (*impact factor*) i punktów ministerialnych na pracę wynoszą odpowiednio: 5,58 i 113,25.

W chwili obecnej parametry te przyjmują zapewne wyższe wartości. Liczba cytowań wszystkich prac habilitacyjnych i wybranych pozostałych wg bazy *Web of Science* przewyższa te podane przez Habilitanta w Autoreferacie.

Staż naukowe

Habilitant odbył dwa krótkoterminowe zagraniczne staże naukowe oraz brał udział w szkole naukowej. Staże te należy rozumieć jako pobyt w innym ośrodku niż macierzysty w danym czasie. Należy podkreślić, że po uzyskaniu stopnia doktora w Indiach przez wiele lat był zatrudniony w ośrodku japońskim (RIKEN), a obecnie w Polsce, zdobywając tym samym bogate doświadczenie w instytucjach naukowych z różnych rejonów świata.

Działalność dydaktyczna i recenzencka

Praca w instytucji badawczej, jaką jest RIKEN, która nie prowadzi regularnej dydaktyki, zmniejsza możliwości nauczania studentów. W związku z tym Habilitant ma ograniczone doświadczenie dydaktyczne. Podczas studiów doktoranckich w instytucji indyjskiej był współopiekunem trzech projektów realizowanych przez studentów. Z kolei w czasie pracy w Japonii wspierał w działaniach naukowych i opiekował się czterema doktorantami i studentami. Obecnie w Polsce sprawuje nadzór nad doktorantem zatrudnionym do realizacji projektu w konkursie *Sonata*, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

Dr Bivas Rana był recenzentem propozycji projektów nadesłanych na konkurs ogłoszony w RIKENie. Ponadto oceniał prace przesyłane do publikacji w wielu czasopismach, w tym w renomowanych, takich jak: z grupy *Physical Review* czy *Applied Physics Letters*.

Rozwój warsztatu naukowego i zdobywanie funduszy

Habilitant posługuje się swobodnie wieloma technikami eksperymentalnymi, pozwalającymi na prowadzenie badań statycznych, dynamicznych i transportowych właściwości magnetycznych systemów cienkowieściowych. Jest również biegły w technologii wytwarzania tego typu materiałów i w procedurach litograficznych, niezbędnych do wykonania wspomnianych pomiarów transportowych. Posiada również umiejętność prowadzenia symulacji mikromagnetycznych (OOMMF), w szczególności w zakresie propagacji fal spinowych.

W celu przeprowadzenia wyrafinowanych pomiarów Habilitant zaangażował się w rozwój aparatury badawczej i jej oprogramowania, głównie z zakresu magnetoptyki. Należy tu wymienić: opracowanie magnetoptycznego mikroskopu Kerra z czasową rozdzielczością z wykorzystaniem femtosekundowego lasera (fs-TRMOKE), magnetoptyczny mikroskop Kerra o rozdzielczości pikosekundowej (ps-TRMOKE) ze wzbudzeniem elektrycznym, wykorzystanie szerokopasmowego spektrometru ferromagnetycznego rezonansu z wektorowym analizatorem (VNA-FMR) oraz wysokoczęstotliwościowe pomiary elektryczne z wykorzystaniem spinowego efektu Halla (SHE) i odwróconego spinowego efektu Halla (ISHE) do wykrywania dynamiki magnetyzacji.

Dr Bivas Rana aktywnie uczestniczył w zdobywaniu funduszy na prowadzone przez niego badania. W przeszłości był kierownikiem zakończonych już projektów finansowanych przez instytucje japońskie (Hitachi i RIKEN). Obecnie kieruje dwoma projektami: większym, trzyletnim – finansowanym przez Narodowe Centrum Nauki w Polsce i mniejszym, 15-miesięcznym – wspieranym z funduszy Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza.

Opinia końcowa

Dr Bivas Rana uzyskał stopień doktora w dziedzinie fizyki na Uniwersytecie w Kalkucie w Indiach, który został nostryfikowany w Polsce przez Wydział Fizyki Uniwersytetu w Białymstoku. Jeszcze przed nadaniem tego stopnia rozpoczął pracę w japońskim ośrodku badawczym RIKEN. Po siedmiu latach przeniósł się do Polski i podjął pracę w Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Wyniki swoich dotychczasowych badań, prowadzonych w dziedzinie dynamiki namagnesowania, opublikował w ok. 40 pracach naukowych. Spośród nich dr Bivas Rana wybrał 7 prac będących podstawą do ubiegania się o stopień doktora habilitowanego. Stanowią one cykl powiązanych ze sobą tematycznie artykułów naukowych. Zarówno pierwsza pozycja na liście autorów, funkcja autora korespondencyjnego oraz złożone oświadczenia współautorów dowodzą, że Habilitant miał decydujący wkład w ich powstanie. Wybrane prace zostały opublikowane w recenzowanych i uznanych

czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym, znajdujących się na listach *Journal Citation Report* oraz Ministerstwa Edukacji i Nauki. Prace te wniosły istotny wkład w rozwój dziedziny obejmującej dynamikę namagnesowania i jej modyfikacje pod wpływem pola elektrycznego. Wzbudziły one duże zainteresowanie środowiska naukowego, które zostało wyrażone w wysokiej ich cytowalności. Ponadto dr Bivas Rana zdobywał środki na badania naukowe w postaci finansowanych projektów, którymi kierował. Przyczynił się do rozwoju aparatury badawczej. Może wykazać się również zaangażowaniem na polu dydaktyki, wspierając studentów w przygotowaniu ich prac magisterskich i doktorskich.

Opisane powyżej osiągnięcia dowodzą, że Wnioskodawca posiada wszelkie niezbędne umiejętności oczekiwane od samodzielnego pracownika naukowego.

Przedstawione osiągnięcia spełniają również formalne wymogi Ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 r.

W kontekście powyższej oceny z pełnym przekonaniem popieram wniosek dra Bivasa Rany o nadanie mu stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauk fizycznych.