

dr hab. Andrzej Wawro, prof. nzw. PAN

Instytut Fizyki PAN w Warszawie

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Sławomira Ziętka pt.:
*Spin diode effect in metallic multilayers and multiferroic heterostructures***

Autorem recenzowanej rozprawy doktorskiej jest mgr inż. Sławomir Ziętek z Wydziału Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji (Katedra Elektroniki) Akademii Górniczo Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Promotorem rozprawy był prof. dr hab. Tomasz Stobiecki, a rolę promotora pomocniczego pełnił dr inż. Witold Skowroński.

Praca doktorska opisuje oryginalne wyniki badań doświadczalnych dynamiki namagnesowania cienkowarstwowych struktur magnetycznych. Ich uzupełnieniem są modele teoretyczne oraz symulacje mikromagnetyczne, które w pełniejszy sposób pozwalają zinterpretować obserwowane zjawiska fizyczne. Podjęte zagadnienie zawiera się w jednym z głównych nurtów badań właściwości ciała stałego, które znajdują zastosowania w intensywnie rozwijającej się obecnie nowej gałęzi elektroniki - spintronice. Obejmuje ona nowy obszar wykorzystujący nie tylko ładunek elektryczny elektronu, jak to miało miejsce w ostatnim stuleciu, ale również jego moment magnetyczny - spin. Uwzględnienie tej właściwości pozwala na znacznie szersze możliwości kontrolowania przepływu prądu elektrycznego nie tylko napięciem elektrycznym, ale również przy użyciu pola magnetycznego. Oddziaływania mogą zachodzić również w stronę przeciwną: kierunek namagnesowania może być regulowany polem elektrycznym lub przepływem elektronów z wypadkową polaryzacją spinową. Omawiana dziedzina stanowi nie tylko szerokie pole badawcze nowych materiałów i zachodzących w nich zjawisk fizycznych, ale również pozwala na wytwarzanie nowych urządzeń dających istotny wkład do rozwoju nowoczesnej elektroniki. W oparciu o wymienione oddziaływania można wytwarzać zminiaturyzowane do skali submikronowej pamięci, czujniki, oscylatory, detektory, (de)modulatory.

Zasadniczym celem recenzowanej pracy doktorskiej było zbadanie rezonansu ferromagnetycznego (FMR) oraz stojących fal spinowych (SSW) przy pomocy diodowego efektu spinowego (SDE) w cienkowarstwowych metalicznych strukturach magnetycznych. Właściwości te były analizowane w układach wykazujących anizotropowy magnetoopór (AMR) (warstwy i struktury wykonane z permaloju) oraz w zaworach spinowych charakteryzujących się gigantycznym magnetooporem (SVGMR) (złożone struktury wielowarstwowe). Identyczne efekty - znacznie silniejsze - można obserwować również w niebadanych w tej rozprawie magnetycznych złączach tunelowych (MTJ), które mogą jednak pracować w ograniczonych warunkach, biorąc pod uwagę wydzielaną moc, czy możliwość wystąpienia przebicia elektrycznego. Diodowy efekt spinowy - bardzo uzasadniony do przeprowadzenia podjętych badań - polega na indukowaniu się stałego napięcia przy przepływie prądu elektrycznego o częstotliwości mikrofalowej przez materiał o oscylującej z tą samą częstotliwością wartości oporu elektrycznego. Oscylacje te spowodowane są zmieniającym się w czasie kierunkiem namagnesowania warstwy jednorodnej (AMR) lub warstwy swobodnej w zaworze spinowym (GMR) pod wpływem nieskompensowanego pola Oersteda, wywołanego płynącym prądem mikrofalowym.

Badania opisane w rozprawie realizowane były na Wydziale Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji AGH. Udział doktoranta w prowadzonych badaniach i upowszechnianiu ich wyników był bez wątpienia dominujący. Autor rozprawy samodzielnie przeprowadził wszystkie opisane pomiary oraz opracował uzyskane wyniki. Wytworzył część spośród badanych warstw

i wykonał niezbędną strukturyzację techniką litografii elektronowej. Zestawił niektóre układy pomiarowe, w czym niewątpliwie pomocna była wiedza uzyskana w czasie studiów na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH. Podstawowym urządzeniem wykorzystanym do pomiarów był analizator obwodów. Doktorant brał również udział w obliczeniach teoretycznych i symulacjach mikromagnetycznych. Napisał wszystkie manuskrypty artykułów. Pozostała część wyników została uzyskana we współpracy z zespołami z Instytutu Fizyki Politechniki Warszawskiej, Instytutu Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu, Wydziału Fizyki Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydziału Fizyki Stosowanej Aalto University w Finlandii. Próbkę typu SVGMR zostały wykonane przez firmę Singulus AG z Niemiec.

Rozprawa doktorska została napisana w języku angielskim w formie tzw. „zszywki”. Zawiera ona pięć artykułów (P1-P5) współautorstwa doktoranta, które są przeplecione krótkimi wprowadzeniami do badanych zjawisk fizycznych czy stosowanych technik pomiarowych. Cztery z tych artykułów opublikowane zostały w bardzo dobrych czasopismach fizycznych o zasięgu międzynarodowym: P2 w Physical Review B (impact factor: 3.718), P3 i P4 w Applied Physics Letters (3.142), P5 w Journal of Magnetism and Magnetic Materials (2.357). Piąta praca pokonferencyjna (P1) ukazała się w formie elektronicznej. Należy zaznaczyć, że we wszystkich tych pracach mgr inż. Sławomir Ziętek jest pierwszym współautorem.

Rozprawa rozpoczyna się od spisu treści, po której przedstawiona jest lista rysunków zamieszczonych w opisach wprowadzających, lista używanych skrótów, krótka notatka biograficzna autora i lista artykułów stanowiących podstawę rozprawy. Rozdział 1 jest wprowadzeniem do praktycznych zastosowań spintroniki i usytuowania w tym kontekście tematyki przedłożonej rozprawy. W dalszej części omówione zostały podstawowe właściwości i zjawiska fizyczne badane w trakcie realizacji doktoratu: zjawisko różnego typu magnetooporu: AMR, GMR i TMR (rozdział 2), dynamika namagnesowania (rozdział 3) i techniki eksperymentalne, służące do jej badania (rozdział 4). Spinowy efekt diodowy w zaworach spinowych omówiony jest w rozdziale 5, a w heterostrukturach o rozdzielonych właściwościach multiferroicznych – w rozdziale 6. Rozprawę kończy podsumowanie wyników oraz krótki plan dalszych badań (rozdział 7), opis aparatury do litografii elektronowej, stosowanej do wytworzenia struktur (dodatek 8) oraz powtórzona lista bibliograficzna z części opisowej.

W pracy P1 porównane zostały różne techniki służące do badania FMR i SSW w ciągłej warstwie i mikrometrowym pasku wykonanych z permaloju. Tłumienie wzbudzonego namagnesowania było badane przy pomocy impulsowej magnetometrii mikrofalowej (PIMM), a mody rezonansu magnetycznego z użyciem skalarnej analizatora obwodów (SNA). Badania transportowe struktury paskowej z wykorzystaniem SDE pozwoliły na określenie modów FMR i SSW, również prostopadłych (PSSW). Techniki PIMM i SNA dały bardzo zbliżone wartości współczynnika tłumienia Gilberta α – podstawowego parametru materiałowego, który charakteryzuje tłumienie wzbudzeń namagnesowania i rozchodzenie się fal spinowych. Nieco mniejsza wartość α wyznaczona w strukturze paskowej wynikała z wpływu geometrii badanego obiektu.

W pracy P2 zawarte są wyniki SDE mierzonego w strukturach SVGMR z minimalnym sprzężeniem międzywarstwowym, uzyskanym poprzez odpowiedni dobór grubości przekładki Cu. Artykuł zawiera również opis teoretyczny generowania się napięcia wskutek SDE w warunkach ogólnych i dla FMR. Z modelu warstwy odpowiadającego równolegle połączonym opornikom wyznaczone zostało nieskompensowane pole Oersted, powodujące oscylacje namagnesowania w warstwie swobodnej. Określona została zależność oporu warstwy i napięcia SDE w funkcji kąta pomiędzy namagnesowaniem warstwy sztywnej i swobodnej zaworu. Najsilniejszy sygnał FMR został uzyskany gdy namagnesowanie obu warstw zaworu było wzajemnie prostopadłe. Dla tych warunków uzyskano relację dyspersji oraz określono wartość współczynnika tłumienia α . Eksperymentalnie wyznaczone dyspersja i linie rezonansowe dobrze zgadzały się z przebiegami teoretycznymi. Efekt SDE obserwowany w warstwach SVGMR porównano z tym w warstwie permalojowej, charakteryzującej się AMR. Sygnał w strukturach SVGMR był 13-krotnie silniejszy

Wpływ wielkości sprzężenia międzywarstwowego na spinowy efekt diodowy w podobnych warstwach SVGMR przedstawiony został w pracy P3. Sprężenie ferromagnetyczne i antyferromagnetyczne uzyskano poprzez odpowiedni dobór grubości przekładki Cu. Jego energia została wyznaczona z przesunięcia pętli magnetooporu $R(H)$. Pomiar napięcia SDE prowadzony był w warunkach nierezonansowych, ponieważ sygnał był silniejszy i lepiej odzwierciedlał wpływ sprzężenia. Oba rodzaje sprzężeń powodowały obniżenie mierzonego sygnału w porównaniu z układem słabo sprzężonym, bowiem odchodziły one namagnesowanie warstwy swobodnej od kierunku prostopadłego względem namagnesowania warstwy sztywnej, dla którego sygnał SDE jest najsilniejszy.

Wpływ pola elektrycznego na dynamikę namagnesowania badany był w pracach P4 i P5. Efekt taki uzyskano w warstwach magnetycznych permaloju $Ni_{80}Fe_{20}$ w postaci pasków osadzonych na podłożu piezoelektrycznym PMN-PT. Przyłożone pole elektryczne powodowało zmianę rozmiarów podłoża, która z kolei generowała naprężenia w warstwie magnetycznej. Wskutek właściwości magnetoelastycznych w warstwach permaloju indukowała się dodatkowa anizotropia magnetyczna zmieniająca warunki rezonansowe badanych zjawisk.

W pracy P4 przy pomocy SDE badano wpływ pola elektrycznego o ustalonym natężeniu na warunki FMR w zależności od szerokości pasków. Największe przesunięcie częstotliwości zaobserwowano dla najszerzych pasków. Większe pola magnetyczne i mniejsze szerokości pasków obniżały zdolność strojenia częstotliwości rezonansowej wskutek rosnącego wpływu anizotropii kształtu redukującej ten efekt. Obserwacje eksperymentalne zostały uzupełnione obliczeniami pozwalającymi na wykreślenie mapy strojonej częstotliwości FMR, zależnej od szerokości pasków i wielkości przyłożonego pola magnetycznego.

Przy pomocy tej samej techniki w pracy P5 badano wpływ pola elektrycznego na rezonans SSW. Najsilniejszy efekt przesunięcia widma SSW widoczny był dla fal o częstotliwości 5GHz. W celu pełniejszej identyfikacji modów FMR i SSW przeprowadzone zostały symulacje mikromagnetyczne. Dobrze zostało odzwierciedlone przesunięcie widm FMR i SSW pod wpływem pola elektrycznego. Więcej kłopotu sprawiła próba uzyskania przestrzennego rozkładu amplitudy i fazy FMR i SSW. Dopiero implementacja dodatkowego jednorodnego pola magnetycznego w symulacjach mikromagnetycznych pozwoliła na uzyskanie zgodności z eksperymentem i identyfikację harmonicznych SSW.

Prace składające się na rozprawę doktorską w sposób spójny i logiczny opisują badane właściwości dynamiki namagnesowania w dwóch rodzajach struktur cienkowarstwowych. W pierwszej pracy porównano różne techniki badawcze prowadzące do wyznaczenia jednego z podstawowych parametrów opisujących dynamikę namagnesowania w warstwach permaloju – współczynnika tłumienia Gilberta. Dwie następne poświęcone są wpływowi magnetycznego sprzężenia międzywarstwowego w zaworach spinowych. Dwie ostatnie prace opisują możliwości strojenia dynamiki namagnesowania przy pomocy pola elektrycznego w strukturach o rozłożonych właściwościach multiferroicznych: ferromagnetycznej warstwie permaloju osadzonej na piezoelektrycznym podłożu. Część wyników eksperymentalnych uzupełniona została opisem teoretycznym lub symulacjami mikromagnetycznymi. Doktorant osiągnął – w dużej mierze samodzielnie – założony cel. Pokazał zastosowanie spinowego efektu diodowego do badań dynamiki namagnesowania w metalicznych układach cienkowarstwowych oraz określił wpływ niektórych parametrów na warunki rezonansowe tych układów.

Recenzowana rozprawa doktorska ma postać zbioru opublikowanych już artykułów opatrzonego dodatkowymi informacjami autora. Niewątpliwą zaletą takiej formy jest lepiej dopracowana zawartość merytoryczna, która była oceniana wcześniej przez innych recenzentów tych artykułów. Przedstawione prace pozbawione są w dużej mierze ewentualnych błędów czy niedociągnięć. Czasochłonność przygotowania rozprawy w tym kształcie jest znacznie mniejsza niż w dotychczas przyjętej praktyce. Jednak, takie podejście ma też kilka wad. Należy do nich zliczyć m. in. brak możliwości przedstawienia pełnego opisu wyników i bardziej podstawowych informacji związanych z podejmowaną tematyką. Taka poszerzona zawartość rozprawy może być bowiem bardzo pomocna dla kolejnych osób podejmujących badania z tej

tematyki. Do silnych stron rozprawy należy zaliczyć aktualne zagadnienie naukowe, ciekawe i oryginalne wyniki opisane w dobrych czasopismach o zasięgu międzynarodowym, dobry język angielski, bardzo staranna strona edytorska.

W czasie czytania rozprawy kilka jej fragmentów wydaje się być jednak niejasnych. Spodziewam się, że będą one omówione przez doktoranta w czasie dyskusji na obronie rozprawy.

1. Pomiar spinowego efektu diodowego wykonany był w konfiguracji dwusondowej. Przez te same złącza przepływał więc prąd mikrofalowy i z nich rejestrowane było dość subtelne napięcie. Czy taka konfiguracja (w porównaniu do czterosondowej) nie wpływała na dokładność otrzymywanych wyników? Czy pomiar czterosondowy był możliwy?
2. Dlaczego warstwy tworzące zawór spinowy miały tak złożoną strukturę (np. rys. 2 w pracy P2)? Jak jest rola np. warstwy Ru i podwójnej warstwy swobodnej?
3. Do oszacowania nieskompensowanego pola Oersteda działającego na warstwę swobodną w strukturze SVGMR (praca P2) zastosowano model oporników połączonych równolegle. Czy wartości oporu właściwego poszczególnych warstw składowych zostały przyjęte jak dla materiału litego? Założenie takie nie musi być prawdziwe, szczególnie w warunkach, gdy droga swobodna elektronu jest porównywalna z grubością warstwy składowej, a rozpraszanie na interfejsach silne. Czy efekty naskórkowe mogą mieć wpływ na rozkład gęstości prądu? W powyższym kontekście zabrakło w rozprawie wyników badań strukturalnych warstw wielokrotnych (np. dyfrakcja czy reflektometria rentgenowska) obrazujących strukturę warstw składowych i jakość interfejsów.
4. W pracach P2 i P3 wyznaczone zostały współczynniki odmagiesowania warstwy swobodnej leżącej w płaszczyźnie yz (rys. 3 w pracy P2; zakładam, że w pracy P3 przyjęto tę samą orientację osi współrzędnych, ponieważ nie zauważyłem informacji na ten temat). Zaskakująca wydaje się istotnie największa wartość tego współczynnika dla kierunku z wzdłuż szerokości paska (rzędu kilku mikrometrów). Intuicyjnie należałoby oczekiwać, że największa wartość powinna być dla kierunku x wzdłuż grubości warstwy swobodnej wynoszącej 6 nm (por. np. zależności składowych dla nieskończonej warstwy, czy pręta, zmiana D_z w cytowanej pracy A. Aharoni J. Appl. Phys. 83 (1998) 3432).
5. Wygrzewanie warstwy NiFe w celu wzmocnienia AMR przeprowadzono jedynie w eksperymencie opisanym w pracy P4. Czy w pozostałych podobnych eksperymentach (prace P1 i P5) nie wygrzewano warstw, czy tylko nie opisano tego faktu? A jeśli rzeczywiście nie wygrzewano, to dlaczego?

Poniższe uwagi techniczne dotyczą drobnych niedociągnięć rozprawy i nie wymagają komentarza autora:

1. W równaniu (3.3) podany został wzór na energię anizotropii w układzie z osią łatwą. W ogólnym przypadku (jaki chyba był intencją autora w tej części opisu) postać wzoru na anizotropię magnetokrystaliczną zależy od symetrii kryształu.
2. Niejasny jest rysunek 1 w pracy P2: orientacja wektora H_{ext} , zbliżona do osi x, zaznaczony kąt ϕ_0 pomiędzy osiami x i z.
3. W tekście rozdziału 6 nawiasy okrągłe użyte zostały zarówno do opisu kierunków, jak i płaszczyzn krystalograficznych.

Oprócz oceny samej rozprawy na uwagę zasługuje również całkowity dorobek doktoranta. W bazie Web of Science znalazłem 12 prac jego współautorstwa (w tym 5 przedstawionych w rozprawie) opublikowanych w latach 2015-2017. Doktorant wygłosił 2 referaty oraz prezentował 6 plakatów na konferencjach międzynarodowych. Jest współautorem dwóch zgłoszeń patentowych z dziedziny spintroniki. Jest lub był wykonawcą trzech projektów międzynarodowych: szwajcarskiego oraz polskich finansowanych przez Narodowe Centrum Nauki (Harmonia) i Narodowe Centrum Badan i Rozwoju (Lider). Doktorant obronił swoją pracę magisterską w roku 2013. Licząc od tej daty, czas realizacji badań eksperymentalnych

i przygotowania pracy doktorskiej nie przekroczył 4 lat. Podjęta tematyka, tempo realizowanych badań oraz jakość opublikowanych wyników stanowią o ponadprzeciętnym poziomie przedłożonej rozprawy.

Rozprawa doktorska mgra inż. Sławomira Ziętka pt. *Spin diode effect in metallic multilayers and multiferroic heterostructures* spełnia również wszystkie wymogi formalne zapisane w Art. 13 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003. Stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, opisane w spójnym tematycznie zbiorze artykułów, wykazuje ogólną wiedzę doktoranta w dziedzinie fizyki, zawiera streszczenie w języku angielskim.

Wnioskuje o dopuszczenie mgra inż. Sławomira Ziętka do kolejnych etapów przewodu doktorskiego. W przypadku zadowolającego przebiegu obrony oraz odpowiedzi na postawione pytania proponuję wyróżnienie recenzowanej rozprawy.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'A. Zięta', is positioned in the lower right quadrant of the page.