

Warszawa, 6 września 2023 r.

dr hab. inż. Robert Mroczynski, prof. uczelni
Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych
Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki
ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa
tel.: 22 234 6065
e-mail: robert.mroczynski@pw.edu.pl

SECRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia **13. 09. 2023**

Zarejestrowano pod nr

Podpis *Jm*

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra Rzeszuta

p.t.

**Statyczna i dynamiczna charakteryzacja magnetycznych złącz tunelowych z anizotropią
prostopadłą**

Podstawą do przygotowania recenzji rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Piotra Rzeszuta jest pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, Pana dr. hab. inż. Ryszarda Sroki, profesora uczelni, z dnia 6 lipca 2023 r. Niniejsza recenzja została przygotowana zgodnie z wymogami sprecyzowanymi w umowie na wykonanie recenzji rozprawy doktorskiej z dnia 20 lipca 2023 r., a oceniana rozprawa rozpatrywana jako osiągnięcie naukowe w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

1. Tytuł rozprawy doktorskiej stanowiącej podstawę ubiegania się w aktualnym postępowaniu o nadanie stopnia doktora

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgra inż. Piotra Rzeszuta zatytułowana jest: „Statyczna i dynamiczna charakteryzacja magnetycznych złącz tunelowych z anizotropią prostopadłą” (ang.: „Static and dynamic characterization of magnetic tunnel junctions with perpendicular anisotropy”).

2. Ocena układu rozprawy doktorskiej, w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych

Dysertacja została przygotowana w języku angielskim i liczy łącznie 81 stron. Rozprawa została podzielona na 8 rozdziałów podstawowych, zawiera bibliografię liczącą 100 pozycji oraz dodatek prezentujący listę najważniejszych osiągnięć naukowych Doktoranta. Praca rozpoczyna

się stronami tytułowymi napisanymi w języku angielskim i polskim, następnie przedstawiony jest ponownie tytuł pracy (w języku angielskim) oraz deklaracja oryginalnego wkładu Doktoranta w uzyskane wyniki w trakcie realizacji badań. Kolejne części pracy to streszczenia, również przygotowane w języku angielskim i polskim oraz strona podziękowań. Następnie przedstawiony jest spis treści oraz lista trzech publikacji współautorskich, które stanowiły podstawę przygotowania rozprawy doktorskiej. Do dokumentacji, już w trakcie procesu recenzji, dołączono oświadczenie Pana mgra inż. Piotra Rzeszuta, określające Jego procentowy udział w każdej z publikacji oraz wskazanie na czym ten udział polegał. Oświadczenie to zostało podpisane również przez opiekuna naukowego Doktoranta, Pana dr hab. inż. Witolda Skowrońskiego, profesora uczelni.

Jak wspomniano powyżej, główna część pracy składa się z 8 rozdziałów. **Rozdział pierwszy**, liczący 3 strony, stanowi krótkie wprowadzenie do tematyki badawczej rozprawy doktorskiej, która poświęcona jest problemom technologii i charakteryzacji magnetycznych złącz tunelowych (MTJ) oraz próbom praktycznego wykorzystania tego typu struktur w przyrządach pamięciowych, w szczególności pamięci magnetycznej o dostępie swobodnym (MRAM) oraz jako elementy sztucznej sieci neuronowej. W rozdziale tym przedstawiono również cel naukowy rozprawy oraz opisano, w sposób syntetyczny, jej zawartość.

W **rozdziale drugim** (8 stron) przedstawiono podstawy teoretyczne budowy magnetycznych złącz tunelowych oraz opisano pokrótce podstawowe zjawiska fizyczne i parametry charakteryzujące i towarzyszące działaniu tego typu struktur, jak efekt tunelowej magnetorezystancji (TMR), spinowy transfer momentu siły (STT) czy zmiana magnetyzacji indukowana transportem spinowo spolaryzowanych elektronów (CIMS). Autor rozprawy wprowadza również do problemów dynamiki procesów namagnesowania i oscylacji oraz stabilności termicznej złącz tunelowych. W sposób syntetyczny zostały również zaprezentowane technologie innych typów struktur pamięciowych, konkurencyjnych do przedstawionej w pracy pamięci typu MRAM.

W moim przekonaniu, znacznie lepszym miejscem na przedstawienie powyżej wspomnianych informacji byłby **rozdział trzeci**, liczący 7 stron, w którym Autor rozprawy prezentuje pierwszą próbę wykorzystania złącz MTJ w przyrządzie pamięciowym typu STT-MRAM. W rozdziale tym zamieszczono motywację wykorzystania złącz tunelowych do projektu, konstrukcji i charakteryzacji elektrycznej wielobitowej komórki pamięciowej. Wyniki przeprowadzonych badań zostały opublikowane w renomowanym periodyku naukowym z listy ISI-JCR [P1]. W publikacji tej Pan mgr inż. Piotr Rzeszut był pierwszym i jednocześnie korespondencyjnym Autorem.

[P1] P. Rzeszut, W. Skowronski, S. Zietek, J. Wrona, T. Stobiecki, "Multi-bit MRAM storage cells utilizing serially connected perpendicular magnetic tunnel junctions," Journal of Applied Physics, vol. 125, no. 22, p. 223907, 2019.

Kolejny rozdział pracy – **rozdział czwarty** – to krótkie, gdyż zaledwie 4-stronicowe, wprowadzenie do tematyki sztucznych sieci neuronowych. W tej części pracy Doktorant przedstawił ogólne założenia tworzenia sieci neuronowych oraz porównał główne architektury budowy tego typu sieci. W tym kontekście zaznaczył możliwość projektowania sztucznych sieci neuronowych poprzez wykorzystanie przyrządów elektroniki spinowej, jakimi są np. oscylatory spintroniczne. W dalszej części rozdziału zaprezentowane są przykładowe algorytmy uczenia sieci neuronowych, tj. propagacja wsteczna, metoda gradientu prostego oraz algorytmy genetyczne. W ostatniej części tego rozdziału Autor przedstawia metodykę kodowania informacji wewnątrz sieci neuronowej oraz do sygnałów wejściowych i wyjściowych, którą zastosował w ramach realizacji pracy doktorskiej.

W **rozdziale piątym** (13 stron) zaprezentowano wyniki prac teoretycznych związanych z wykorzystaniem przyrządów MTJ jako fundamentalnych bloków tworzących sztuczne sieci neuronowe. Na podstawie przeprowadzonych prac eksperymentalnych w poprzednich częściach pracy przygotowano model behawioralny złącz tunelowych, a następnie zasymulowano układ szeregowo połączonych złączy. Wyodrębniono parametry elektryczne układu sterującego możliwego do realizacji w technologii CMOS oraz połączono je z modelem wielostanowych struktur pamięciowych. Przeprowadzono symulację zaprogramowanej sieci w trakcie których postawionym celem było rozpoznawanie cyfr pisanych odręcznie. Rezultaty zrealizowanych badań stanowią drugą publikację [P2], która również została opublikowana w znakomitym periodyku naukowym. Ponownie, Autor recenzowanej dysertacji, jest w tej publikacji pierwszym i korespondencyjnym autorem.

[P2] P. Rzeszut, J. Checinski, I. Brzozowski, S. Zietek, W. Skowronski, T. Stobiecki, "Multi-state MRAM cells for hardware neuromorphic computing," Scientific Reports, vol. 12, no. 1, pp. 1–11, 2022.

Rozdział szósty, liczący 9 stron, stanowi podsumowanie oryginalnych prac eksperymentalnych zrealizowanych przez Autora rozprawy. Wyniki zaprezentowane w tym rozdziale dotyczą ważnego problemu mechanizmów synchronizacji oscylatorów spintronicznych zrealizowanych w postaci złącz tunelowych. W odróżnieniu od poprzednich części pracy, zrealizowane eksperymentalnie i badane złącza tunelowe w tej części pracy charakteryzowały się równoległą osią namagnesowania do płaszczyzny warstwy referencyjnej oraz prostopadłą osią namagnesowania do płaszczyzny warstwy 'swobodnej'. Autor prezentuje rezultaty badań

synchronizacji wzajemnych, jak i do zewnętrznych sygnałów o częstotliwościach radiowych. Przedstawione są również wyniki eksperymentalne dwóch szeregowo połączonych złącz MTJ przy zmiennym polu magnetycznym oraz próby optymalizacji parametrów jakości sprzężenia. Badania te wzbogacone są również symulacjami numerycznymi. Rezultaty opisane w rozdziale szóstym, zostały zebrane w trzeciej publikacji będącej podstawą dysertacji doktorskiej [P3].

[P3] P. Rzeszut, J. Mojsiejuk, W. Skowronski, S. Tsunegi, H. Kubota, and S. Yuasa, "Towards mutual synchronization of serially connected Spin Torque Oscillators based on magnetic tunnel junctions," arXiv:2306.11608, 2023.

W **rozdziale siódmym**, liczącym 12 stron, Doktorant przedstawił technologię struktur testowych zawierających przyrządy MTJ, które były przedmiotem badań w ramach realizowanej pracy oraz metody elektrycznej charakteryzacji wykonanych struktur testowych. W rozdziale tym zawarto również zastosowaną metodologię akwizycji i obróbki danych pomiarowych uzyskiwanych w trakcie charakteryzacji struktur testowych.

Rozdział ósmy (2 strony) to podsumowanie, w którym w sposób syntetyczny Doktorant przedstawia najważniejsze rezultaty i wnioski wynikające z przeprowadzonych badań oraz wskazuje na pewne wyzwania towarzyszące realizacji zadań badawczych pracy doktorskiej.

Dysertację doktorską kończy **bibliografia** zebrana w postaci 100 pozycji na 10 stronach oraz dwustronicowe podsumowanie najważniejszych **osiągnięć naukowych** Doktoranta.

Układ pracy jest poprawny, prowadzona przez Autora narracja jest właściwa i logiczna. Każdy rozdział przedstawiający oryginalne wyniki badań poprzedzony jest wstępem teoretycznym, który wprowadza do przedstawionych w publikacjach wyników oraz ułatwia zrozumienie i motywację prowadzonych eksperymentów. Niestety, pracę czyta się trudno z uwagi na liczne usterki. Do błędów tych należą nie tylko błędy interpunkcyjne i literówki, ale również i poważne błędy językowe, które powinny zostać wyeliminowane w jak największym stopniu, tym bardziej że Autor rozprawy zdecydował się na przygotowanie pracy w języku obcym. Tego typu błędy są bardzo łatwo wychwytywane przez oprogramowanie typowo wykorzystywane do redakcji tekstów, tym bardziej dziwi dość pokaźna liczba takich błędów. Usterki te zostaną wymienione w dalszej części niniejszej recenzji. W mojej ocenie, zbyt skromnym wstępem teoretycznym charakteryzuje się rozdział szósty, który poświęcony jest skomplikowanym zagadnieniom synchronizacji złącz MTJ. Lektura tego rozdziału zdecydowanie jest niewystraszająca do pełnego zrozumienia wyników przedstawionych w pracy [P3]. Nieco zagmatwany, tym bardziej, że pisany w języku obcym, jest fragment poświęcony omówieniu wyników zawartych w pracy [P3]. Rozszerzenie tego rozdziału o podstawy teoretyczne działania oscylatorów miałoby wartościowy walor edukacyjny.

3. Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej

Bibliografia zawiera 100 pozycji literaturowych, na które składają się w szczególności publikacje znajdujące się w prestiżowych czasopismach z dziedziny fizyki półprzewodników i przyrządów półprzewodnikowych o zasięgu światowym. Są to publikacje obejmujące przegląd najważniejszych pozycji wydanych w ostatnich dwóch dekadach, ale wymienionych jest także kilka publikacji, które są historyczne z punktu widzenia tematyki badawczej recenzowanej rozprawy. W wykazie tym znajdują się również trzy odwołania do publikacji będących podstawą realizacji rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Piotra Rzeszuta. Przedstawiony w bibliografii wykaz pozycji literaturowych świadczy o bardzo dobrym rozpoznaniu przez Kandydata aktualnego stanu wiedzy w dziedzinie elektroniki spinowej oraz technologii przyrządów spintronicznych. To świadczy o bardzo wysokim stopniu ogólnej wiedzy Doktoranta w podejmowanej tematyce badawczej. Odniesienia w tekście do poszczególnych pozycji są w większej części prawidłowe, ale Autor rozprawy od pozycji [90] zamieszcza w bibliografii pozycje literaturowe, do których nie odwołuje się w treści rozprawy. Do pozycji tych należą współautorskie publikacje i komunikaty konferencyjne Autora, które umieszczone są w dodatku zawierającym najważniejsze osiągnięcia naukowe Doktoranta. Odniesienia te powinny zostać z bibliografii usunięte. Pewną usterką jest również rozpoczęcie narracji w rozdziale pierwszym od powołania się na pozycje literaturowe 4 oraz 5. Skoro występują one w tekście po raz pierwszy, to taką numerację powinny przyjąć. Taki zabieg utrudnia właściwe śledzenie piśmiennictwa dysertacji. Natomiast odwołania do publikacji współautorskich Doktoranta, które stanowiły podstawę edycji dysertacji, a tym samym zastosowana numeracja tych pozycji powinna być zgodna z układem rozprawy.

4. Wskazanie oraz ocena celu pracy Kandydata do stopnia doktora

Celem recenzowanej rozprawy doktorskiej były badania właściwości statycznych oraz dynamicznych magnetycznych złącz tunelowych oraz próby praktycznego zastosowania tego typu struktur bazujących na układach wielowarstwowych w ultracienkim zakresie grubości. Cele te zostały zdefiniowane w rozdziale 1.2 rozprawy, w którym jednocześnie podkreślono istotne zagadnienia związane z rozwojem wytwarzania tego typu struktur we współpracy z firmami komercyjnymi. Badania zrealizowane przez Doktoranta dotyczyły wykorzystania przyrządów typu MTJ w strukturach pamięciowych STT-MRAM oraz jako elementy sztucznych sieci neuronowych. Eksperymenty te zostały uzupełnione o wyniki badań zjawisk synchronizacji elektrycznie połączonych oscylatorów zrealizowanych w postaci złącz tunelowych. Tematyka badawcza podejmowana przez Doktoranta jest niezwykle aktualna i interesująca oraz bardzo dobrze wpisuje się w rozwój wiedzy z zakresu fizyki przyrządów elektroniki spinowej oraz możliwości komercyjnego wykorzystania takich przyrządów w przyszłości. Na bazie aktualnego stanu wiedzy

cele badawcze zostały sformułowane w sposób zasadny jednak warto podkreślić fakt, że osiągnięcie tak przedstawionych celów jest zawsze spełnione. W moim przekonaniu, Doktorant mógł pokusić się o nieco bardziej konkretne sformułowanie, do czego będzie dążył i jakie rezultaty będą mogły zostać uznane za satysfakcjonujące. Pomijając ten fakt, lektura rozprawy wskazuje, że uzyskane rezultaty są bardzo wartościowe, a postawione w pracy cele badań zostały osiągnięte.

5. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych

Badane w pracy doktorskiej złącza tunelowe, na które składają się układy ultracienkich warstw, wytwarzane były w laboratoriach technologicznych firmy Singulus Technologies AG (Niemcy) oraz w National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (Japonia). Szczegóły dotyczące wymiarów geometrycznych i materiałów funkcyjnych struktur MTJ podane zostały w publikacjach stanowiących element przygotowanej rozprawy. Materiały te, w ogólności, wytwarzane były za pomocą technik reaktywnego rozpylania magnetronowego. Część prac związanych ze strukturyzacją wytwarzanych materiałów realizowana była w laboratoriach o podwyższonej czystości typu 'clean-room' Akademickiego Centrum Materiałów i Nanotechnologii Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Do tego celu wykorzystano zaawansowane metody strukturyzacji materiałów, tj. litografię bezpośrednią (bezmaskową) w świetle ultrafioletowym (UV). Część prac realizowana była również przy wykorzystaniu naświetlania fotorezystu wiązką elektronów, jednak, jak zauważa Autor rozprawy, technika ta jest niezwykle czasochłonna i wymagająca finansowo. Do definiowania kształtów warstw w celu realizacji właściwych geometrii obszarów złączowych wykorzystano technikę odrywania (tzw. 'lift-off') i standardowe techniki obróbki fotorezystów.

Charakteryzacja elektryczna wykonanych struktur testowych realizowana była poprzez pomiary stałoprądowe (DC) oraz pomiary przy wykorzystaniu częstotliwości radiowych (RF). Wykorzystane do tego stanowisko pomiarowe składające się ze stacji ostrzowej, elektromagnesu liniowego, magnetometru, stolika, na którym umieszczane były badane struktury testowe, programowanego źródła prądowego oraz jednostek SMU. W przypadku pomiarów RF wykorzystywano również generator sygnałowy, analizator widmowy oraz wzmacniacz mocy.

Istotną częścią badań była akwizycja i obróbka uzyskiwanych danych pomiarowych. Doktorant przeprowadził bardzo dużą ilość pomiarów, co wiązało się również z długim czasem obróbki i analizy uzyskiwanych rezultatów. W początkowym etapie realizacji zadań badawczych Autor rozprawy wykorzystywał gotowe oprogramowanie zaimplementowane w środowisku LabView, jednak charakter i mnogość badań zmusił Doktoranta do swojego rodzaju optymalizacji metodyki pomiarowej. W związku z tym, samodzielnie opracował narzędzie do automatycznej

akwizycji i analizy wyników pomiarowych w języku Python. Aplikacja ta pozwoliła na łatwe zestawienie z układem pomiarowym za pomocą dostępnych magistrali (GPIB, RS232) oraz automatyzację realizacji pomiarów.

Metodologia badań została precyzyjnie opisana w rozdziale siódmym rozprawy. Wykorzystane przez Doktoranta metody badawcze zostały wybrane wzorowo, a sposób ich wykorzystania nie budzi zastrzeżeń. Należy wyraźnie podkreślić fakt, że zrealizowana przez Doktoranta część eksperymentalno-pomiarowa pracy zasługuje na wyróżnienie i dodatkowo potwierdza szeroką wiedzę Autora pracy w tematyce rozprawy.

6. Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

Przedstawiona do recenzji rozprawa ma charakter eksperymentalno-doświadczalny z istotnym pierwiastkiem o charakterze teoretyczno-symulacyjnym. W związku z tym, praca jest wszechstronna od strony naukowej. Wyniki zawarte w rozprawie przedstawione są przez Doktoranta w sposób przejrzysty i nie budzą zastrzeżeń od strony merytorycznej. Każdorazowo, wyniki badań umieszczone w prezentacjach naukowych poprzedzone są wstępem teoretycznym. Doktorant jednoznacznie udowodnił, że szeregowy układ złącz MTJ może zostać wykorzystany do realizacji koncepcji nowatorskiej, wielostanowej komórki pamięci typu MRAM. W tym celu przeprowadził wszechstronną charakteryzację elektryczną wykonanych struktur testowych. Badania te były poprzedzone projektem sekwencji technologicznej oraz realizacji eksperymentów technologicznych zmierzających do wykonania struktur spintronicznych. Podobne struktury złącz wykorzystano do projektu w pełni sprzętowej sztucznej sieci neuronowej. Doktorant zaproponował behawioralny złącz tunelowych, a następnie zasymulowano układ szeregowo połączonych złączy. Przeprowadzono symulację sieci neuronowej i jednoznacznie wykazano jej zdolność do rozwiązania problemów rozpoznawalności na przykładzie ciągu cyfr. W ostatniej części pracy Doktorant zbadał możliwości synchronizacji propagowanych sygnałów poprzez złącza MTJ oraz synchronizację do sygnałów zewnętrznych w domenie częstotliwości RF. Podsumowując, Doktorant wykazał umiejętność prawidłowego i przekonującego prezentowania rezultatów prac eksperymentalnych oraz analizy wyników badań. Pewnym niedociągnięciem w prezentacji wyników jest brak wyraźnego odniesienia w pracy do wyników uzyskiwanych przez inne grupy badawcze, w szczególności wyników związanych z parametrami struktur pamięciowych typu MRAM.

7. Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań

Zaprezentowane w pracy wyniki badań mogą stanowić niewątpliwie istotny wkład w rozwój technologii i charakteryzacji przyrządów elektroniki spinowej. Przede wszystkim, zaprezentowana

przez Doktoranta metodologia pomiarowa wnosi wiele w obszar wiedzy związany z bardzo skomplikowanymi i subtelnymi pomiarami elektrycznymi struktur nanoelektronicznych bazujących na złączach MTJ oraz analizy uzyskiwanych wyników. Autor pracy zrealizował również szereg eksperymentów technologicznych zmierzających do realizacji struktur nanoelektronicznych. Lektura rozprawy i zawarte w niej podsumowanie wskazuje, że nie wszystko eksperymenty kończyły się sukcesem. To podkreśla złożoność prowadzonych przez Doktoranta prac technologicznych. Do realizacji struktur testowych Pan mgr inż. Piotr Rzeszut wykorzystał nie tylko bazę aparaturową zlokalizowaną w laboratoriach uniwersyteckich, ale także infrastrukturę technologiczną firmy Singulus AG. Może to stanowić ważny przyczynek skalowania tej technologii oraz komercyjnego wykorzystania zaprojektowanych przez Doktoranta struktur MTJ w przyszłości. Niewątpliwie, praca posiada duży element nowości i związana jest z aktualną tematyką badań struktur nanoelektronicznych do zastosowań w spintronice, szczególnie dla zastosowań pamięciowych oraz w sztucznych sieciach neuronowych.

8. Informacje o ewentualnych nieprawidłowościach, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej

W rozprawie trudno znaleźć istotne niedociągnięcia lub błędy merytoryczne. W moim przekonaniu warto jednak zwrócić uwagę na dwie grupy nieprawidłowości, które mają charakter dyskusyjny oraz edycyjny:

8.1 Nieprawidłowości dyskusyjne

- Doktorant podkreśla aplikacyjny charakter pracy i wytwarzanych struktur nanoelektronicznych oraz możliwości skalowania opracowanych technologii. Niestety, przedstawione wyniki badań zarówno w załączonych publikacjach, a także w treści pracy, są ubogie w krytyczne komentarze co do statystyki wyników, powtarzalności funkcjonalności wykonanych struktur oraz uzysku technologicznego.
- Predestynowanym miejscem do przedstawienia technologii pamięciowych konkurencyjnych do struktur typu MRAM (str. 19, rozdział 2.3) jest rozdział trzeci. W moim przekonaniu, wartościowo edukacyjnie byłoby dodatkowo przedstawienie w tym rozdziale rysunków prezentujących schematy podstawowych komórek pamięciowych wykonanych w każdej technologii oraz zebranie w formie tabelarycznej podsumowania najważniejszych parametrów charakteryzujących działanie przyrządów, np. czasu przełączania, czasu utrzymywania ładunku, gęstości upakowania, itp. Pozwoliłoby to czytelnikowi na pełne zrozumienie motywacji prowadzonych badań oraz umiejscowienie struktur MRAM na tle innych technologii, zarówno tych już dojrzałych, jak i intensywnie rozwijanych.

- W rozdziale trzecim brakuje ogólnego wprowadzenia do technologii struktur MRAM i ich złożoności technologicznej. Realizacja eksperymentalna tego typu struktur, a tym samym osiągnięte funkcjonalności, determinowane są nie tylko przez zastosowane materiały do budowy układów periodycznie ułożonych warstw, ale również przez ich jakość i własności, np. jednorodność, gęstość, grubość, itp. Zasadne byłoby rozbudowanie tego rozdziału, ponieważ w pracy zawarto wyniki bazujące na wykorzystaniu bardzo podobnych do siebie złącz tunelowych. Wartościowe byłoby również wskazanie przez Doktoranta, dlaczego zdecydował się na wykorzystanie w swoich badaniach tych konkretnych struktur wielowarstwowych.
- W pracy poświęconej wielostanowej komórce pamięciowej typu MRAM [P1] brakuje podstawowych wyników charakteryzujących typową strukturę pamięciową, czyli czasu utrzymywania stanu logicznego (retention) ekstrapolowanego do 10 lat. Badania te z reguły prowadzone są również w podwyższonych temperaturach (np. 85°C).
- W ogólnodostępnych zasobach można znaleźć informacje, że publikacja [P1] powstała na bazie wyników pracy magisterskiej Doktoranta, która została napisana i obroniona w 2018 roku. Jaki jest wkład naukowy w realizację rozprawy doktorskiej Kandydata zawarty we wspomnianej publikacji?
- W rozdziale 7.1, przedstawiającym opis technologii złącz MTJ, wyraźnie brakuje pełnych informacji o zastosowanych metodach inżynierii materiałowej, m.in. w jaki sposób zostało przygotowane podłoże półprzewodnikowe przed procesami wytwarzania warstw, jakie źródła rozpylanego materiału (targety) zostały wykorzystane (czystość, skład, wymiary geometryczne) do osadzania warstw tlenkowych i elektrodowych, w jakim celu zastosowano rekrytalizację warstw i jakie były parametry tego procesu, w jaki sposób materiały były trawione jonowo (parametry technologiczne, typ procesu). Warto zauważyć, że niektóre procesy technologiczne opisane są dość szczegółowo, np. metoda 'lift-off', w innych miejscach tych szczegółów brakuje. Doceniam jakość graficzną przedstawienia ciągu technologicznego struktur MTJ, jednak wartościowe byłoby przygotowanie tej części rozdziału w formie przewodnika technologicznego, który stanowiłby edukacyjny walor recenzowanej pracy.

8.2 Nieprawidłowości edycyjne

- W 'Streszczeniu' (w języku polskim) dość niefrasobliwie sformułowano: „...wokół praktycznego zastosowania ich wyników w rozwiązaniach praktycznych...”
- Błędy językowe, np. str. 11 – „...alternative for conventional CMOS...”, „Spintronics rely...”, „...tunnel junctions allows...”, „...MTJs makes...”, str. 14 – „...the different in...”,

“...elements are parallel...”, “...as usually MTJs are compatible...”, str. 16 - ...anisotropy Energy (Keff) is defining...”, str. 22 - „...transistor required...”, „...that it have to...”, „...this lead to...”, „...opposite have to be used.”, str. 29 - „...for a given types of computational tasks...”, „The advantage of...solutions are usually...”, str. 30 - „...any computational tasks...”, „...family of ANN are...”, str. 32 - „Than a fitness...”, str. 33 - „...research lead...”, str. 47 - „...higher then desired...”, „...parameters was tested...”, „...need of further investigation...”, „...data had to been collected...”, „The ideas include...”, str. 55 - „...the measurement setup used...devices are presented...”, „...process and its description was adapted...”, str. 60 - „...is mechanically build on...”, str. 61 - „...is primarily...”, str. 68 - ...research...were done...”, „...often loosing...”, „...various kind...”.

- Błędy/braki przedimków, np. str. 11 - “For the reason spin-based...”, “...to be used as a storage...”, str. 12 - “In the work...”, str. 14 - “...since the time...”, str. 15 - “...from first FM...”, “...therefore result is...”, str. 16 - „...measure of degree...”, „...in case...”, „PMA in context...”, „...while in context...”, str. 17 - „...however, necessity...”, „...more in opposite direction...”, str. 18 - „...overcome energy barrier...”, „Higher the parameter...”, is - harder it is...”, str. 19 - „...as well as thickness...”, „...- bigger the magnetization...”, „...fit desired purpose...”, str. 21 - „...derive solution for...”, „...explain dynamics of...”, „...use dynamic response...”, str. 22 - „...increase capacity...”, „...reassemble ratcheting...”, str. 23 - „...while maximum current...”, „...with precise characterization...”, str. 30 - „...in fact is a closest...”, „...or an ability...”, „...use opposite behavior...”, str. 31 - „...perform desired operation...”, str. 33 - „as a memristive devices...”, „...during purely-software...”, „...and fabrication...”, str. 34 as a potential...”, „...towards the synchronization...”, str. 46 - „...used a building blocks...”, „...use wide range...”, „...on topic of synchronization...”, „...with bottom (reference)...”, str. 47 - „...to inability...”, „such approach...”, „...results, large amount...”, „...in RF regime.”, „...leads to need...”, „in more precise...”, str. 55 - „During work on...”, „...while reducing time...”, str. 60 - „...lead to preparation...”, „...by means of usage...”, „...in a repeatable conditions.”, str. 61 - „...for placement...”, „...in ability...”, str. 62 - „...observing generation...”, „...with DC power supply.”, str. 67 - „...was multi-state MRAM...”, „related to switching current...”, „...synchronization to external signal...”, „Also a mutual effects...”, str. 68 - „...even due to slightest variation...”, „...that outcome...”.
- Błędy/braki przyimków, np. str. 14 - „...difference relative angle...”, dwa razy „in” w „...was presented in in...”, str. 16 - „...the effect a tunneling...”, str. 22 - „...would have

lower resistance...”, str. 30 – „...in radio frequency (RF)...”, „...enabling for completely...”, „...in regime...”, str. 62 – „...is completed with means...”.

- Błędy interpunkcyjne, np. str. 12 – “In the work...”, “In chapter 2...”, “In chapter 3...”, “In chapter 4...” itd. również na str. 13, kolejność rozdziałów 3 i 4 jest zamieniona, str. 15 – „materials, like Fe or Co exhibit...”, „Also this...”, “...into account it might...”, “...in P state (Fig. 2.1a) then...”, “...of AP state (Fig. 2.1b) the majority...”, str. 19 – „...more robust until...”, str. 22 – „Theoretically a few...”, „Initially a paralel connection...”, str. 23 – „Additionally such a...”, „During experiments...”, „Also observations...”, str. 29 – „forecasting [65,...] it is allowed...”, „Usually ANN...”, „...hidden layer and ANN...”, str. 30 – „...speed of operation due...”, „...device increases as...”, „...hardware implementation is...”, “...such solutions usually...”, str. 31 – „Also a concept...”, str. 32 – „For such a network...”, str. 33 – „...was not sufficient a decision...”, „Finally all the...”, „...was made that...”, „Also an energy...”, str. 34 – „...developed such a n...”, „Particularly interesting...”, „...therefore research...”, str. 46 – „...efficient oscillation a configuration...”, str. 47 – „Initially experiments...”, „...available to use was too...”, „...it was expected that...”, „...current density and...”, „...simulations crried out...”, „...conlude the research it is...”, „...effects observed both...”, „...ideas include, but not...”, str. 55 – „...insulation is applied, to...”, str. 61 – „In the station sample...”, str. 67 – „Also an comprehensive...”, „Considering the fact that...”, „Basing on previous research, and...”, „First an behavioral...”, „...MTJ was prepared that...”, str. 68 – „Also a research...”, „...in industry as well as...”.
- Skrót „CIMS” jest trzykrotnie wyjaśniony w tekście – str. 14, str. 17 oraz str. 18.
- Opis do rysunku 2.1 powinien być wyczerpująco rozbudowany. Czym jest pomarańczowy prostokąt, co oznaczają skróty „FM1”, „FM2” – te informacje powinny znaleźć się również w podpisie do rysunku. Podobnie, bardziej rozbudowany powinien być podpis pod rysunkiem 2.2.
- Odmiana stosowanego w pracy języka powinna być konsekwentna. Czasami Autor rozprawy wykorzystuje odmianę tzw. angielskiego brytyjskiego czasem amerykańskiego, jak np. na str. 17 przy wykorzystaniu słowa „magnetis(z)ation”.
- Niewłaściwe oznaczenie parametru „delta” – str. 19.
- Brak odniesienia do pozycji literaturowej dot. STO na str. 21.

- Odwołanie do rysunku 6.1 następuje już po wstawieniu tego rysunku do tekstu. Wyjaśnienie skrótu „FWHM” powinno znaleźć się w podpisie do rysunku, a następuje dopiero na następnej stronie (47).
- Co oznacza parametr „Q” na str. 47?
- W nagłówku na str. 78 jest błąd w podpisie – jest to nadal bibliografia, a nie osiągnięcia naukowe Autora pracy.

9. Ocena czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

W rozprawie Pana mgr inż. Piotra Rzeszuta zawarto istotne wyniki stanowiące wkład do rozwoju wiedzy z zakresu elektroniki spinowej oraz zaprezentowano oryginalne podejście do postawionych celów zadań badawczych. Doktorant opracował szczegółowo ideę, podstawy teoretyczne oraz projekt złącza tunelowego. Dokonał symulacji teoretycznych potwierdzających założenia funkcjonalności projektowanych złącz. Opracował model behawioralny złącz tunelowych oraz model symulacyjny układu połączonych szeregowo złącz, które w dalszych częściach pracy zostały wykorzystane do badań eksperymentalnych. Zaprojektował sekwencje technologiczne realizacji struktur testowych bazujących na złączach MTJ oraz brał aktywny udział w ich realizacji przy wykorzystaniu zaawansowanych metod technologii nanoelektronicznych. W końcu, przeprowadził subtelną charakteryzację elektryczną zrealizowanych struktur testowych oraz opracował i zastosował metodologię pomiarową. Niewątpliwie, wyszczególnione powyżej osiągnięcia Doktoranta są oryginalne, a uzyskane wyniki opisane w ramach recenzowanej pracy wskazują na osiągnięcie postawionych celów.

10. Ocena czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata do stopnia doktora w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Realizacja celów badawczych pracy, w szczególności wyrafinowana i czasochłonna charakteryzacja elektryczna wykonanych struktur testowych bazujących na ciągach połączonych złącz tunelowych typu MTJ, nie byłaby możliwa bez obszernej i wszechstronnej analizy literatury z zakresu tematyki badawczej dysertacji doktorskiej. Ten rzetelnie przeprowadzony przegląd pozwolił Doktorantowi na wyselekcjonowanie właściwych metod i technik eksperymentalnych oraz pomiarowych niezbędnych do rozwiązania postawionych problemów badawczych. Dodatkowo, Doktorant w sposób krytyczny podszedł do zaplanowanych prac i samodzielnie zmodyfikował metodologię prowadzonych badań. Doktorant w sposób logiczny zaplanował sekwencję kolejnych etapów prowadzonych badań oraz prawidłowo opracował i opisał uzyskane wyniki. Uzyskane wyniki zostały opublikowane w trzech artykułach naukowych, w tym dwie z tych publikacji

indeksowane są na prestiżowej liście ISI-JCR. Udział Doktoranta w powstanie tych publikacji był dominujący. Przedstawione fakty świadczą o zdobytych przez Autora rozprawy kompetencjach do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i bezdyskusyjnie wskazują na dużą wiedzę teoretyczną Kandydata, szczególnie w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Potwierdzeniem powyższej tezy są również dotychczasowe osiągnięcia i aktywność naukowa Kandydata przedstawione jako dodatek do recenzowanej rozprawy.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa, pomimo pewnych niedociągnięć, w szczególności edytorskich, w związku z art. 179 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1669 z późn. zm.), spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 13 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789, ustawa znowelizowana) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Wnoszę zatem o przyjęcie i dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Piotra Rzeszuta do publicznej obrony.

Robert Mwoyo Li

