

Poznań, 19 kwietnia 2023

Prof. UAM dr hab. Sławomir Mamica
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu,
Wydział Fizyki
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 2, 61-614 Poznań

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgra inż. Błażeja Anastaziaka
zatytułowanej „Wpływ utleniania plazmowego na właściwości magnetyczne warstw Co/Ni”

Przedstawiona do recenzji dysertacja autorstwa mgra inż. Błażeja Anastaziaka została napisana pod kierunkiem dra hab. inż. Piotra Kuświka, prof. Instytutu Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk, a promotorem pomocniczym była pani dr Weronika Andrzejewska z Centrum NanoBioMedycznego Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Praca ma charakter doświadczalny i dotyczy szeroko zakrojonych badań zmierzających do opisanie i zrozumienia wpływu utleniania plazmowego na strukturę i właściwości warstw Co/Ni, szczególnie tych, które mają swoje konsekwencje w ich własnościach magnetycznych. Tematyka pracy jest bardzo aktualna tak z poznawczego punktu widzenia, jak i w kontekście potencjalnych zastosowań w urządzeniach spintronicznych czy magnonicznych.

Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów opatrzonych spisami treści, cytowanej literatury (obejmującej 184 pozycje), rysunków i tabel, a także streszczeniem w języku polskim i angielskim, wstępem oraz podsumowaniem. Autor zawarł w niej również listę 6 publikacji, których jest współautorem (w tym 2 pierwszo-autorskich), oraz wykaz trzech projektów badawczych, w ramach których współfinansowane były badania będące podstawą doktoratu.

We Wstępie Kandydat jasno sprecyzował cel poznawczy rozprawy, tj. określenie mechanizmów pozwalających opisać wpływ procesu utleniania plazmowego na zmiany właściwości magnetycznych warstw Co/Ni, a w szczególności ich anizotropii magnetycznej, oraz wypracowanie metody pozwalającej na lokalną zmianę tychże właściwości magnetycznych.

Pierwsze 5 rozdziałów, które stanowią ok. 2/3 tekstu rozprawy, zawierają wprowadzenie do technik użytych w trakcie badań. W rozdz. 1 Autor rozpoczyna od wkładów do energii ferromagnetyka pochodzących z dwóch źródeł, oddziaływań wymiennych i energii Zeemana. W kolejnym podrozdziale ze szczegółami przybliża czytelnikowi anizotropię magnetyczną oraz możliwe do niej przyczynki. Następnie przechodzi do tworzenia się domen i ścian domenowych, kończąc ten rozdział opisem oddziaływań wymiennych typu *exchange bias* oraz oddziaływania Dzyaloshinskiego-Moriya. Tak więc lektura rozdz. 1 daje dobrą podstawę do zrozumienia dalszej części pracy.

Wśród badanych zjawisk są efekty magnetooporowe i te zostały bardzo zgrabnie opisane w rozdz. 2, a wśród nich gigantyczny magnetoopor oraz anizotropowy efekt magnetooporowy. W kolejnym rozdziale mamy wprowadzenie do technik wytwarzania oraz modyfikacji (strukturyzacji) cienkich warstw zastosowanych przez Autora rozprawy, a są to: rozpylanie magnetronowe, ablacja laserowa, utlenianie plazmowe oraz fotolitografia. Mamy tu także wzmiankę o bombardowaniu jonowym. Rozdz. 4 poświęcony jest technikom pomiarowym zastosowanym przez Doktoranta do

badania własności otrzymanych układów warstwowych: mikroskopii opartej na magnetoptycznym efekcie Kerra, pomiarowi magnetooporu metodą czteropunktową, mikroskopii sił atomowych, rentgenowskiej spektroskopii fotoelektronów oraz profilometrii kontaktowej. Następnie, w rozdz. 5, mamy bardzo treściwe przedstawienie najważniejszych zastosowań właściwości magnetycznych układów warstwowych Co/Ni.

Otrzymane wyniki są szczegółowo przedstawione i przeanalizowane w rozdz. 6, a najważniejsze wnioski zostały podkreślone w Podsumowaniu. Dzięki takiemu układowi rozprawa stanowi spójną i logiczną całość.

Praca wykonana przez Autora w trakcie doktoratu jest bardzo szeroka i pokazuje jego wszechstronność w stosowaniu technik doświadczalnych poczynwszy od wytwarzania układów cienkowarstwowych, poprzez ich strukturyzację, a na zróżnicowanych metodach pomiarowych skończywszy.

Otrzymane wyniki są opisane bardzo skrupulatnie (w zasadzie – o czym później), a wyciągane wnioski są ich naturalną konsekwencją. Zarówno jedne jak i drugie stanowią znaczny wkład w rozwój naszej wiedzy na temat własności warstw Co/Ni oraz możliwości modyfikacji tych własności poprzez utlenianie plazmowe. Wyniki prezentowane w rozprawie zostały częściowo opublikowane w renomowanych czasopismach fizycznych, a niektóre z nich zostały otrzymane w czasie dwóch długoterminowych (2-miesięcznych) staży zagranicznych.

Biegłe posługiwanie się zróżnicowanymi metodami eksperymentalnymi oraz naukowa dokładność w opisie i interpretacji wyników robią bardzo dobre wrażenie, wskazując na dojrzałość naukową Kandydata.

Wśród największych mankamentów recenzowanej rozprawy wymienilibym przede wszystkim bałagan w terminologii w rozdz. 1, gdzie Autor najwyraźniej zamiennie używa pojęć energia i gęstość energii. Np. wielkość opisana wzorem 1.4 raz jest nazywana gęstością energii (str. 8), a raz energią (str. 9). Ponadto, jeżeli rzeczywiście niektóre z zawartych tu formuł dotyczą energii, a inne gęstości energii, to wypadłoby rozróżnić je stosując inne oznaczenia, np. E drukowane i pisane. Oczywiście o ile istnieje taka potrzeba, tj., jeśli któreś ze wzorów dot. gęstości energii, a nie samej energii. Niestety problem ten, w mojej opinii, psuje ewentualny dydaktyczny charakter tego rozdziału. A szkoda, bo, nie licząc tej usterki, wprowadzone tu pojęcia są całkiem zgrabnie opisane.

W niektórych fragmentach rozprawy następuje bardzo „gładkie” przechodzenie pomiędzy wynikami uzyskanymi w ramach pracy doktorskiej, a tymi z literatury, tak, że trudno się czasem zorientować, co jest przytaczane, a co stanowi nowe wyniki. Zwłaszcza, że miejscami przeplatają się one w tekście bez żadnego komentarza, a jedynie z odnośnikami do literatury, wśród której są też prace ze współautorstwem Doktoranta. Wyraźne zaznaczenie w tekście pracy tego, które wyniki lub wnioski są zaczerpnięte z literatury, znacznie ułatwiłoby czytanie tego tekstu.

W rozdz. 2.2 Doktorant pisze o nagrodzie Nobla dla A. Ferta i P. Grünberga za odkrycie GMR. Szkoda, że nie wspomina o tym, iż pierwsze wyjaśnienie teoretyczne tego zjawiska jest autorstwa prof. J. Barnasia. Jeśli polscy, a szczególnie polscy, fizycy nie będą o tym przypominać, to kto ma o tym pamiętać?

Początek drugiego akapitu tegoż rozdziału brzmi: „Zmiana oporu elektrycznego jest następstwem zmiany orientacji momentów magnetycznych w warstwach ferromagnetyka, wykazujących antyferromagnetyczne oddziaływanie.” To jest bardzo nieprecyzyjne – zwłaszcza w kontekście poprzednich rozdziałów, w których oddziaływanie AF dotyczyło wnętrza warstwy – tu mamy oddziaływanie AF pomiędzy warstwami i to wypadało od razu podkreślić

W kwestii drobniejszych niedociągnięć, Autor kilkakrotnie wspomina o „migracji tlenu po granicach ziaren”. Dlaczego tylko po granicach? Czy są jakieś przesłanki, aby to rozstrzygnąć?

W Podsumowaniu brakuje informacji o stabilności długoczasowej otrzymanych struktur, a przecież była ona badana i jest skomentowana w pracy jako bardzo istotna z punktu widzenia zastosowań.

Przy opisie oddziaływań wymiennych Autor stwierdza, iż „energia oddziaływania wymiennego jest odpowiedzialna za występowanie ferromagnetyzmu”. Co prawda kilka zdań dalej wspomina również o antyferromagnetyzmie, jednak takie stwierdzenie jest trochę zbyt stanowcze, bo przecież nie tylko ferromagnetyzmu. (Samo zdanie jest oczywiście prawdziwe, ale wypadało je trochę inaczej sformułować.)

Początek rozdz. 1.2.5 brzmi „Jak pokazano w rozdziale 1.2.3 ...”, co jest trochę na wyrost, ponieważ nie pokazano, tylko opisano.

W drugim akapicie rozdz. 1.3 stwierdzono, że podział na domeny pozwala zminimalizować energię magnetostatyczną. Nie tyle pozwała, co dąży do – inaczej kłóci się to zdanie nie tylko z sytuacją faktyczną, ale też z tym, co jest napisane tak przed nim, jak i po nim.

Podpis pod rys. 1.5: być może mi to umknęło, ale chyba nigdzie wcześniej nie zostało powiedziane, co to znaczy „warstwa F”.

We wzorze 1.14 (str. 15) pojawia się stała wymiany A. Nie ma do niej niestety żadnego odniesienia przy opisie oddziaływań wymiennych, a przecież można było energię tych oddziaływań wyrazić również przez A.

Str. 20, koniec akapitu 2: „... w rozdziale książki autorstwa Radu i Zabela [44]” – w którym rozdziale i do czego odnosi się autorstwo, do książki, czy tylko do rozdziału?

Str. 25, początek ostatniego akapitu: „Oprócz OMR wyróżnia się również wiele innych efektów magnetooporowych. Znalazły one szerokie zastosowania ...” – dlaczego OMR nie znalazł? Brakuje mi tu choćby ogólnikowego wyjaśnienia.

Str. 28: „W przypadku zmiany konfiguracji magnetycznej z $(\uparrow \downarrow)$ na $(\uparrow \uparrow)$ wartość GMR osiąga najwyższą wartość.” – a nie odwrotnie?

Str. 30: „Antyferromagnetyczna konfiguracja magnetyczna w sąsiednich warstwach ferromagnetycznych pojawiała się jedynie przy pewnych grubościach przekładki. Wykazano, że było to wynikiem sprzężenia RKKY (ang. Ruderman–Kittel–Kasuya–Yosida interaction) między sąsiednimi warstwami ferromagnetycznymi.” – A jaki to ma związek? Dlaczego tylko przy pewnych grubościach?

Str. 32: „Takie struktury SV znalazły zastosowanie w głowicach odczytu informacji zapisanej w twardych dyskach, ponieważ pozwalają one na kontrolę orientacji namagnesowania w poszczególnych bitach.” – tylko tyle? Cewka indukcyjna też na to pozwala. Jaka jest przewaga głowic GMR (SV)?

Str. 54: „... z wykorzystaniem siedmiu channeltronów” – słyszałem o siedmiu samurajach, ale „channeltronów” wypadaloby przedstawić.

We wstępie do rozdz. 6 Autor pisze o przeprowadzanych badaniach chiralności ścian domenowych przed i po procesie utleniania. Tu od razu nasuwa się pytanie o ich stabilność w czasie. Takie badania są opisane w dalszych częściach pracy, tym bardziej warto było o nich wspomnieć już tutaj.

W kilku miejscach Doktorant pisze o „pętlach histerez”, a w innych o „pętlach histerezy” – można to było ujednolicić, ze wskazaniem na pętle histerezy.

Str. 69, rys. 6.7: W podpisie do rysunku jest informacja, iż wykresy w obu kolumnach dot. próbek z klinem Ni, natomiast co innego wynika z opisu na wykresach (a) i (b), gdzie jest podana konkretna grubość warstwy Ni.

Rys. 6.26 (str. 89) wygląda jakby był z jakiejś pracy zaczerpnięty, ale w podpisie nie ma odnośnika. Jeśli natomiast jest to rys. wykonany do rozprawy, to dlaczego napisy są po angielsku i skąd jego słaba jakość (wygląda na wstawiony jako bitmapa)?

Usterki techniczne:

Jeśli formuła matematyczna jest częścią akapitu, to w kolejnej linii nie powinno być wcięcia.

Zmora tej rozprawy są przecinki. Czasem ich brakuje, a często pojawiają się tam, gdzie być ich nie powinno. Trochę to wygląda na nawyk z języka angielskiego, podobnie jak słowo „Augerowskimi” napisane wielką literą zamiast małą. W jednym miejscu brakuje po przecinku spacji (str. 12, ostatnie zdanie trzeciego akapitu).

Str. 31, akapit 1: jest „... związana jest przemagnesowaniem ...”, powinno być „związana jest z przemagnesowaniem”.

Str. 35, akapit 1: jest „Przy za dużym ciśnienie ...”, powinno być „Przy za dużym ciśnieniu”.

Str. 39, rys. 3.3: jeden z napisów częściowo wchodzi na rysunek, przez co nie tylko wygląda nieestetycznie, ale też jest mało czytelny.

Str. 48: „... trafia na detektor CMOS” – chyba lepiej „do detektora”, tak jak to jest w dalszej części tego tekstu.

Str. 55, akapit 2: jeśli po kropce nie następuje koniec zdania, to należy skrócić odstęp.

Str. 57: „anizotropia powierzchniowa jest również wykorzystywane ...” – powinno być „wykorzystywana”.

Str. 58, akapit 1: „w temperaturze RT” – jeśli RT znaczy „temp. pokojowa”, to po co jeszcze „temperaturze”.

Str. 75, akapit 2: „... ; 2) Obserwowane w eksperymencie ...” – skoro przed 2 jest średnik, to *obserwowane* powinno być z małej litery. No i 2) należało przenieść do nowej linii, a nie zostawiać na końcu obecnej, skoro numeruje drugi element z wymienianych w tym zdaniu.

Str. 82, rys. 6.18: nie widać pod którą pętlą (niebieską czy czerwoną) schowała się pętla szara.

Str. 82, rys. 6.20: w podpisie powtórzone jest „dla dwóch kierunków”.

Estetyka: W ostatnim zdaniu na str. 9 Doktorant pisze o *międzywierzchni*, zaznaczając, że jest ona często nazywana *interfejsem*. Jaka szkoda, że dalej już konsekwentnie stosuje tę kalkę z języka angielskiego, tj. interfejs, a nie międzywierzchnia, zwłaszcza, że pojęcie to zostało ukute i przez lata propagowane przez fizyków poznańskich, pionierów badań cienkich warstw magnetycznych (m.in. prof. Henryka Puzkarskiego).

Ostatecznie wymienione powyżej mankamenty, choć oczywiście wpływają na odbiór tekstu rozprawy, to jednak niczego nie ujmują z opisanych w niej wyników oraz wniosków. Tak więc stwierdzam, iż przedstawiona do recenzji dysertacja pana mgr inż. Błażeja Anastaziaka z powodzeniem spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Ponadto, ze względu na bardzo szerokie spektrum metod doświadczalnych zastosowanych osobiście przez Kandydata wnioskuję o wyróżnienie recenzowanej rozprawy doktorskiej.

/podpisał: dr hab. Sławomir Mamica, prof. UAM/

