

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Michała Matczaka pt.:  
**„Modyfikacje anizotropii i oddziaływań w magnetycznych  
strukturach cienkowarstwowych”**

wykonanej w Instytucie Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska przygotowana przez mgra Michała Matczaka ma formę sześćcio-elementowego zbioru artykułów opublikowanych w czasopismach naukowych w latach od 2012 do 2015, opatrzonego komentarzem oraz streszczeniem w języku polskim i angielskim. Elementy tego zbioru są następujące (z zachowaniem przyjętych przez Autora oznaczeń, od [Mat-A] do [Mat-F]):

- [Mat-A] M. Matczak, P. Kuświk, B. Szymański, M. Urbaniak, M. Schmidt, J. Aleksiejew, F. Stobiecki, A. Ehresmann, *Co/Au multilayers with graded magnetic anisotropy for magnetic field sensing*, APPLIED PHYSICS LETTERS 100, 162402 (2012); DOI: 10.1063/1.4704176.
- [Mat-B] M. Matczak, B. Szymański, M. Urbaniak, M. Nowicki, H. Głowiński, P. Kuświk, M. Schmidt, J. Aleksiejew, J. Dubowik, and F. Stobiecki, *Antiferromagnetic magnetostatic coupling in Co/Au/Co films with perpendicular anisotropy*, Journal of Applied Physics 114, 093911 (2013); DOI: 10.1063/1.4819380.
- [Mat-C] M. Matczak, B. Szymański, P. Kuświk, M. Urbaniak, F. Stobiecki, Z. Kurant, A. Maziewski, D. Lengemann and A. Ehresmann, *Tailoring magnetic anisotropy gradients by ion bombardment for domain wall positioning in magnetic multilayers with perpendicular anisotropy*, Nanoscale Research Letters 9, 395 (2014); DOI:10.1186/1556-276X-9-395.
- [Mat-D] M. Matczak, Ł. Frąckowiak, P. Kuświk, M. Urbaniak, B. Szymański, F. Stobiecki, *Magnetization Reversal and Domain Replication in Co-Au-Co Film with Perpendicular Anisotropy*, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS 50 (11), 6000604 (2014), DOI: 10.1109/TMAG.2014.2324756.
- [Mat-E] M. Matczak, P. Kuświk, M. Urbaniak, B. Szymański, F. Stobiecki, *Influence of Domain Replication on Magnetoresistance of Co/Au/Co Film With Perpendicular Anisotropy and Antiferromagnetic Coupling*, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 50 (11), 4400804 (2014), DOI: 10.1109/TMAG.2014.2326463.
- [Mat-F] M. Matczak, R. Schäfer, M. Urbaniak, B. Szymański, P. Kuświk, A. Jarosz, M. Schmidt, J. Aleksiejew, S. Jurga, F. Stobiecki, *Domain wall generated by graded interlayer coupling in Co/Pt/Co film with perpendicular anisotropy*, APPLIED PHYSICS LETTERS 107, 012404 (2015); DOI:10.1063/1.4926357.

Analizując powyższą listę publikacji, łatwo jest zauważyć dwie rzeczy istotne dla oceny rozprawy. Po pierwsze: wszystkie artykuły stanowiące rozprawę doktorską zostały opublikowane w recenzowanych czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym, wyróżnionych w Journal Citation Reports (JCR). Aby nie być gołosłownym, w umieszczonej poniżej tabeli przytaczam liczbę punktów z wykazu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz wskaźnik Impact Factor (IF), jaki należy przypisać każdej spośród tych publikacji:

Publikacja	Czasopismo	Liczba punktów z wykazu MNiSW	IF*
[Mat-A]	Appl. Phys. Lett.	40	3.302
[Mat-B]	J. Appl. Phys.	30	2.183
[Mat-C]	Nanoscale Res. Lett.	30	2.779
[Mat-D]	IEEE Trans. Magn.	25	1.386
[Mat-E]	IEEE Trans. Magn.	25	1.386
[Mat-F]	Appl. Phys. Lett.	40	3.302

\*wg: <http://impactfactor.pl/aktualnosci/10-edycja-2014-impact-factor>.

Wyrażona liczbowo ocena tego zestawu publikacji wypada bardzo pozytywnie, wręcz imponująco, bowiem zestaw zawiera po dwie prace za 40, 30 i 25 punktów „ministerialnych”, a wartości Impact Factor są duże, w zakresie od 1.4 do 3.3. Oznacza to wysoki ciężar gatunkowy zestawu i jego bardzo mocną pozycję, trudną do naruszenia przez ewentualną wtórną krytykę.

Po drugie: wszystkie publikacje stanowiące rozprawę doktorską są wieloautorskie. Jest to typowe dla opisu badań eksperymentalnych prowadzonych w dziedzinie nauk fizycznych, ale jednocześnie oznacza, że w świetle obowiązujących przepisów rozprawę należy postrzegać jako samodzielną i wyodrębnioną część pracy zbiorowej. Nakłada to na mnie – jako na recenzenta – obowiązek dokonania oceny indywidualnego wkładu mgra Michała Matczaka. W związku z tym stwierdzam, że w każdej publikacji, od [Mat-A] do [Mat-F], nazwisko mgra Michała Matczaka znajduje się na pierwszym miejscu na liście autorów (ułożonej – co jest istotne – nie według kolejności alfabetycznej), odzwierciedlając jego szczególną autorską rolę. Stwierdzam też, że dołączone do rozprawy oświadczenia wszystkich pozostałych współautorów niezbiecie potwierdzają dominujący wkład mgra Michała Matczaka w powstanie tych prac, poczynając od zaplanowania próbek i

eksperymentów, poprzez przeprowadzenie pomiarów, ich analizę i interpretację, a kończąc na edycji tekstów i rysunków. Na tej podstawie wysoko oceniam udział mgra Michała Matczaka w przeprowadzeniu opisanych w publikacjach badań. Wynika z tego, że – biorąc pod uwagę wspomnianą powyżej bardzo mocną pozycję zestawu publikacji – pozytywna ocena rozprawy wydaje się być już niejako z góry przesądzona.

Tę intuicję potwierdza analiza merytorycznej zawartości artykułów stanowiących rozprawę doktorską, która pokazuje, że tworzą one spójny tematycznie zestaw obejmujący oryginalne badania magnetycznych właściwości struktur cienkowarstwowych, złożonych z dwóch ultracienkich warstw kobaltu o prostopadłej do powierzchni warstwy orientacji osi łatwego magnesowania, otoczonych i oddzielonych od siebie albo warstewkami złota [Mat A – Mat E], albo platyny [Mat F]. Autor wytwarzał próbki metodą magnetronowego rozpylania jonowego, przy czym niektóre warstwy zaprojektował i zrealizował w postaci klinowej (czyli o zmieniającej się monotonicznie grubości wzdłuż jednego z kierunków w płaszczyźnie), wbudowując tym sposobem w próbkę albo gradient anizotropii magnetycznej (gdy kształt klina miała jedna z warstw ferromagnetycznych), albo gradient magnetycznego oddziaływania pomiędzy warstwami ferromagnetycznymi (w przypadku zastosowania klinowej przekładki niemagnetycznej). Część płaskich próbek Autor poddawał dodatkowo bombardowaniu wiązką jonów  $\text{He}^+$  o energii 10 keV i o różnej dozie w różnych obszarach próbki, w celu wygenerowania gradientu anizotropii magnetycznej. Tak przygotowane próbki badał głównie z zastosowaniem kerrowskich metod magnetooptycznych i technik magnetooporowych, a także za pomocą szerokopasmowej spektroskopii rezonansu ferromagnetycznego z wykorzystaniem wektorowego analizatora obwodów (VNA-FMR), mikroskopii sił atomowych (AFM), oraz reflektometrii (XRR) i dyfrakcji (XRD) rentgenowskiej.

Mgr Michał Matczak uzyskał szereg interesujących wyników, z których jednym z najciekawszych jest – moim zdaniem – wytworzenie próbek o tak dobranych parametrach magnetycznych, że w jednej z warstw ferromagnetycznych proces przemagnesowania w zewnętrznym polu magnetycznym skierowanym prostopadle do płaszczyzny warstwy polega na przemieszczaniu się pojedynczej prostej ściany domenowej. Kluczem do sukcesu było wytworzenie w próbce gradientu anizotropii, a tym samym gradientu pola koercji, co Autor uzyskał na dwa sposoby: albo poprzez nadanie klinowego kształtu jednej z warstw ferromagnetycznych [Mat A], albo poprzez bombardowanie wiązką jonów z gradientem dawki [Mat C]. Autor wykazał, że taki sposób przemagnesowania zachodzi

efektywnie przy dużych wartościach pola koercji i jednocześnie przy dużej wartości gradientu pola koercji, a samo zjawisko może być wykorzystane do skonstruowania sensora magnetooporowego nowego typu, umożliwiającego rejestrację maksymalnej wartości pola magnetycznego, jakie działało na sensor. Podobny sposób przemagnesowania, poprzez odwracalną propagację pojedynczej ściany domenowej, udało się Autorowi zaobserwować w strukturze pseudo-zaworu spinowego z wbudowanym silnym gradientem międzywarstwowego oddziaływania ferromagnetycznego pomiędzy dwiema warstwami ferromagnetycznymi, charakteryzującymi się różną twardością magnetyczną. W tym przypadku gradient sprzężenia był wymuszony poprzez klinowy kształt platynowej przekładki rozdzielającej warstwy kobaltu i powodował dodatkowo hamowanie ruchu ściany domenowej [Mat F].

Drugim bardzo ciekawym rezultatem jest pokazanie, że w strukturach pseudo-zaworów spinowych o ferro- lub antyferromagnetycznym sprzężeniu pomiędzy warstwami ferromagnetycznymi (determinowanym przez grubość niemagnetycznej przekładki), w trakcie procesu przemagnesowania możliwe jest kopiowanie (odpowiednio proste lub inwersyjne) przestrzennego rozkładu magnetyzacji z warstwy twardszej pod względem magnetycznym do warstwy magnetycznie bardziej miękkiej [Mat D, Mat E].

Za bardzo wartościowy wynik uważam też udowodnienie, że w strukturze pseudo-zaworu spinowego amplituda międzywarstwowego sprzężenia RKKY (Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida) rośnie wraz ze wzrostem rozmiarów krystalitów i szorstkości międzypowierzchni, wywołanym zwiększaniem się grubości warstwy buforowej. Jednocześnie Autor stwierdził pojawienie się magnetostatycznego oddziaływania (typu „orange peel”) o antyferromagnetycznym charakterze [Mat B].

Podsumowując przegląd merytorycznej zawartości rozprawy pragnę stwierdzić, że tematyka opracowana przez Autora jest bardzo ważna i aktualna, bowiem mieści się w jednym z głównych nurtów badawczych współczesnej fizyki magnetyzmu, jakim jest badanie magnetycznych układów niskowymiarowych. Układy takie mają ogromny walor nie tylko poznawczy ale i aplikacyjny. I właśnie ten drugi walor jest wyraźnie zaakcentowany w rozprawie, bowiem Autor już na etapie opracowywania koncepcji i planowania eksperymentów zakładał uzyskanie próbek o pewnych specyficznych właściwościach, mających istotne znaczenie z aplikacyjnego punktu widzenia, a jako jeden z efektów końcowych zaproponował zastosowanie osiągniętych przez siebie wyników do skonstruowania magnetooporowego czujnika pola magnetycznego.

W trakcie swych badań Autor posłużył się nowoczesnymi metodami preparacyjnymi i badawczymi, wykorzystując przy tym możliwości współpracy z innymi ośrodkami naukowymi krajowymi i zagranicznymi. Warto w tym miejscu podkreślić wprowadzenie pewnych twórczych modyfikacji, takich jak zastosowanie niestandardowej 11-kontaktowej sondy w pomiarach magnetooporowych [Mat A] czy też opracowanie nowej metody naświetlania jonowego, zapewniającej uzyskanie monotonicznej zmiany dozy (pomimo stałego natężenia wiązki jonów), prowadzącej do wygenerowania gradientu anizotropii magnetycznej w warstwie o stałej grubości [Mat C].

Analiza merytorycznej zawartości rozprawy doktorskiej definitywnie przesądza – moim zdaniem – jej jednoznacznie pozytywną ocenę. W rozprawie Autor zaprezentował oryginalne rozwiązanie interesującego problemu związanego z inżynierią anizotropii i oddziaływania międzywarstwowego w magnetycznych strukturach cienkowarstwowych. Autor spreparował odpowiednie próbki i – stosując odpowiednie techniki badawcze – uzyskał wartościowe wyniki, które opracował, przedstawił i przedyskutował w sposób niebudzący zastrzeżeń i które mają dużą szansę na komercjalizację. Wykazał się przy tym posiadaniem ogólnej wiedzy teoretycznej w zakresie fizyki i umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Reasumując stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa mgr Michała Matczaka z naddatkiem spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuje o:

- 1) dopuszczenie mgr Michała Matczaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego,
- 2) wyróżnienie przygotowanej przez mgr Michała Matczaka rozprawy doktorskiej.

