

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Filipa Lisieckiego pt.:
**„Fale spinowe w strukturyzowanych warstwach permaloju
tworzących periodyczne, kwazi-periodyczne nanostruktury
magnoniczne oraz falowody”**

wykonanej w Instytucie Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu.

W przedstawionej do recenzji rozprawie doktorskiej mgr inż. Filip Lisiecki zaprezentował oryginalne wyniki badań eksperymentalnych mających na celu – jak to określił w Streszczeniu: (1) „*dobranie odpowiedniego materiału i geometrii struktur*” o ciekawych właściwościach magnonicznych, oraz (2) „*opracowanie efektywnych sposobów wzbudzania krótkich fal spinowych przy pomocy emiterów o rozmiarach w skali nanometrowej*”.

Rozprawa wydrukowana została w tradycyjnej formie książkowej o formacie A4 i liczy łącznie 113 stron. Rozpoczyna się streszczeniem w języku polskim i angielskim, listą publikacji Autora, spisem treści i krótkim opisem współpracy naukowej Autora. Dalej następuje zasadnicza część, która została podzielona na siedem rozdziałów. Rozprawa kończy się spisem literatury, liczącym 116 pozycji.

Pierwszy rozdział stanowi wstęp ogólny i omawia m.in. korzyści z ewentualnego wykorzystania fal spinowych w urządzeniach do przesyłania i przetwarzania informacji, zamiast transportu elektronów czy fotonów. W mojej opinii przekonująco uzasadnia celowość podjętych przez Autora badań.

Rozdział drugi omawia podstawy: (1) ferromagnetyzmu, (2) oddziaływań determinujących przestrzenny rozkład magnetyzacji, (3) dynamiki namagnesowania, (4) dipolowych fal spinowych, (5) metod wzbudzania fal spinowych i (6) kryształów magnonicznych. Muszę stwierdzić, że Autor w sposób zwięzły i zgrabny wyjaśnił w tym rozdziale niezbędne podstawowe pojęcia używane w dalszej części pracy.

Rozdział trzeci poświęcony jest ogólnemu opisowi technik zastosowanych do wytwarzania próbek oraz do badania ich właściwości statycznych i dynamicznych. Autor wytwarzał próbki z wykorzystaniem litografii elektronowej, fotolitografii, rozpylania jonowego, rozpylania magnetronowego i trawienia zogniskowaną wiązką jonów. Badania statycznych właściwości magnetycznych wykonał za pomocą mikroskopu polaryzacyjnego, którego działanie oparte jest o magnetoptyczny podłużny efekt Kerra, natomiast właściwości dynamicznych – za pomocą spektrometrii rezonansu ferromagnetycznego z wektorową analizą obwodów (FMR-VNA), spektrometrii rozpraszania światła Brillouina (BLS) oraz skaningowej transmisyjnej mikroskopii rentgenowskiej (STXM). Rozdział trzeci zawiera także podstawowe informacje dotyczące obliczeń numerycznych wykonanych dwiema metodami: elementów skończonych i Monte Carlo, oraz symulacji mikromagnetycznych, przeprowadzonych z zastosowaniem programu MuMax3. W opisie współpracy naukowej Autor wyraźnie zaznaczył, że zaprezentowane w rozprawie wyniki teoretyczne uzyskane zostały bez jego bezpośredniego udziału „*i służą (...) jako uzupełnienie wyników eksperymentalnych i pomoc w ich analizie*”.

Moim zdaniem zamieszczone w tym rozdziale opisy zostały wykonane poprawnie, poza dwoma drobiazgami. Po pierwsze: wielopanelowy rysunek 3.8, przedstawiający „*Schemat pomiaru STXM z rozdzielczością czasową*” nie został omówiony z należytą dokładnością. W szczególności rzuca się w oczy brak komentarza dotyczącego fotografii ukazanych w lewym górnym rogu tego rysunku. Po drugie: na str. 41 Autor podał trochę skróconą nazwę techniki: „*z ang. Brillouin scattering – BLS*”. Pełna nazwa, lepiej oddająca genezę powszechnie stosowanego skrótu BLS, brzmi: Brillouin light scattering.

Rozdział czwarty prezentuje szczegółowo preparatykę badanych próbek. Autor samodzielnie przygotował próbki w formie przestrzennie strukturyzowanych cienkich warstw permaloju, osadzonych na podłożu krzemowym lub na podłożu z membraną z azotku krzemu. Autor wytworzył trzy rodzaje próbek: (1) kwaziperiodyczne sieci pasków typu Fibonacciego, zbudowane z dwóch zestawów pasków o dwóch różnych szerokościach (350 nm i 700 nm, oraz 700 nm i 1400 nm; o długościach 5 μm lub 10 μm i grubościach 30 nm lub 50 nm; paski oddzielone były odstępami o szerokości 80 nm i ułożone były – jak to nazwał Autor – we wstążki o długości 100 μm , przy czym wstążki były albo pojedyncze albo wielokrotne, z różnymi odstępami pomiędzy wstążkami, wynoszącymi 760nm, 1.5 μm lub 10 μm , tworząc w sumie strukturę o rozmiarach 100 μm \times 200 μm) oraz – jako próbki referencyjne – periodyczne sieci pasków (ułożone na przemian z pasków szerokich i wąskich); (2) pojedyncze paski (o szerokości równej m. in. 1.4 μm lub 6 μm i długości 10 μm); (3) sieci antykropek (o średnicy 200 nm, wytrawione za pomocą zogniskowanej wiązki jonów w warstwie permaloju o

grubości 10nm w trzech różnych formach: (i) pojedynczej antykropki, (ii) rzędu pięciu antykropek o odstępach 500 nm i (iii) matrycy 5×4 antykropek o stałych sieci 500 i 480 nm odpowiednio w dwóch ortogonalnych kierunkach). W przypadku próbek przeznaczonych do pomiaru wzbudzeń za pomocą anteny koplarnarnej, antenę taką Autor osadzał bezpośrednio na próbce wykorzystując w tym celu technikę fotolitografii.

W tym rozdziale chciałbym podkreślić dwie rzeczy: po pierwsze wyszczególnienie kolejnych etapów preparacji próbek, które dowodzą iż jest to proces bardzo złożony i zależny od wielu parametrów, które trzeba odpowiednio dobrać, oraz – po drugie – umieszczenie dodatkowych informacji dotyczących optymalizacji procesu litografii elektronicznej poprzez ustawienie odpowiedniej dawki elektronów, ilustrowane wymownymi obrazkami zarejestrowanymi za pomocą skaningowego mikroskopu elektronicznego – w tym także takimi, które pokazują nieudane i zdeformowane struktury. Informacje te świadczą o tym, że opanowanie technologii wytwarzania próbek było dla Autora niełatwym problemem, z rozwiązaniem którego jednak ostatecznie poradził sobie znakomicie.

Rozdział piąty przedstawia wyniki statycznych i dynamicznych badań kwaziperiodycznych i periodycznych struktur paskowych. Autor zaprezentował tu na początek pętle histerezy zmierzone na obu typach struktur paskowych za pomocą kerrowskiego mikroskopu polaryzacyjnego. Kształt tych histerez jest dosyć skomplikowany, bowiem *„widoczne są dwa główne stopnie oraz obszar plateau między nimi”*, co Autor wytłumaczył w ten sposób, że *„skok w niższych wartościach pola magnetycznego związany jest z przemagnesowaniem pasków szerokich, natomiast w wyższych – z przemagnesowaniem pasków wąskich, co związane jest ich odpowiednio mniejszą i większą anizotropią kształtu”*. Obszar plateau jest zaś skutkiem preferowania antyrównoległego ustawienia magnetyzacji w sąsiednich paskach, wynikającego z oddziaływania magnetostatycznego pomiędzy nimi. Następnie Autor pokazał statystyki przemagnesowania szerokich pasków w strukturach kwaziperiodycznych w zależności od wielkości przyłożonego pola magnetycznego i udowodnił, że różnice w procesie przemagnesowania struktury Fibonacciego w stosunku do struktury periodycznej wynikają z występowania co jakiś czas dwóch szerokich pasków obok siebie w strukturze Fibonacciego, co nie ma miejsca w strukturze periodycznej. Przytoczył też pętle histerezy uzyskane z symulacji Monte Carlo i stwierdził ich dobrą zgodność z obserwacjami eksperymentalnymi. Podobny schemat: *”pętle histerezy z eksperymentu / statystyka pasków / pętle histerezy z symulacji”* Autor zastosował następnie do wyjaśnienia wpływu oddziaływania dipolowego pomiędzy wstążkami pasków na proces przemagnesowania.

Ta opisana powyżej analiza właściwości statycznych jest – moim zdaniem – wykonana przez Autora bardzo rzetelnie. Przede wszystkim na podkreślenie zasługuje to, że Autorowi udało się uzyskać strukturę magnoniczną o ciekawych właściwościach (a więc osiągnąć pierwszy cel rozprawy) w stosunkowo prosty sposób – poprzez utworzenie wstążki z umieszczonych obok siebie pasków permalojowych o dwóch różnych szerokościach. W takim układzie, za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego, można wymuszać różne stany namagnesowania sąsiednich pasków: albo stan antyrównoległy albo równoległy, wykorzystując przy tym naturalne oddziaływania magnetostatyczne występujące pomiędzy paskami. Ta dwu-stanowość okaże się potem być przyczyną interesujących właściwości dynamicznych.

Jedyną rzeczą, jakiej mi tutaj brakuje, a która z pewnością mocno wzbogaciłaby tę część pracy, jest zestaw przykładowych obrazów pasków zarejestrowanych w trakcie przemagnesowania, na podstawie których Autor wyliczał pętle histerezy i zliczał swoje statystyki, i na których widać byłoby zmieniającą się liczbę pasków przemagnesowanych wraz ze wzrostem wartości pola. Szkoda, że Autor nie zaprezentował takich obrazów, które w tym wypadku były przecież podstawowym wynikiem eksperymentalnym i materiałem wyjściowym do dalszych analiz.

Pozostała część rozdziału piątego ukazuje wyniki badań dynamicznych. I tak na podstawie widm VNA-FMR (podrozdział 5.2) Autor stwierdził, że: (1) wzbudzenia kolektywne spinów w strukturach kwaziperiodycznych i periodycznych są do siebie bardzo podobne, (2) częstotliwość rezonansowa zależy od szerokości pasków w ten sposób, że dla węższych pasków częstotliwość rezonansowa jest większa, (3) częstotliwość rezonansowa zależy również od tego czy sąsiednie paski są namagnesowanie równoległe czy antyrównoległe, a więc dodatkowo w specyficzny sposób zależy od pola magnetycznego. Na podstawie widm BLS (podrozdział 5.3) Autor sporządził zależności dyspersyjne dla pasków o szerokości 350 nm i 700 nm, porównał je z wynikami obliczeń numerycznych uzyskanych metodą elementów skończonych i stwierdził występowanie przesunięcia pasm w stronę mniejszych częstotliwości przy zmianie konfiguracji namagnesowania pasków z namagnesowania równoległego na antyrównoległe. Na podstawie obrazów wzbudzeń zarejestrowanych za pomocą STXM dla wybranych częstotliwości dla pasków o szerokości 700 nm i 1400 nm (podrozdział 5.4), Autor sporządził profile modów fal spinowych dla struktury Fibonacciego, oszacował długość propagacji na $\sim 14 \mu\text{m}$ i doszedł do wniosku, że *„kwazikryształy magnoniczne typu Fibonacciego mogą być uznawane za skuteczne układy ferromagnetyczne do transmisji fal*

spinowych, nie gorsze niż struktury periodyczne". Różnice w obrazach wzbudzeń uzyskanych dla struktury kwaziperiodycznej i periodycznej, Autor wyjaśnił posiłkując się wykresem struktury pasmowej (rys. 5.15) obliczonej metodą elementów skończonych, na którym w przypadku układu Fibonacciego widocznych jest „wiele dodatkowych, wąskich zakresów częstotliwości wzbronionych, znajdujących się wewnątrz głównych pasm”, a „obecność takich mini-przerw jest konsekwencją długozasięgowego kwaziperiodycznego uporządkowania układu oraz samo-podobieństwa systemu.” Podobny schemat: „obrazy STXM / profile modów fal spinowych / obliczony wykres struktury pasmowej” Autor zastosował następnie (w podrozdziale 5.5) do analizy wzbudzeń fal spinowych w sieci kwaziperiodycznej pasków o szerokości 700 nm i 1400 nm w obu konfiguracjach namagnesowania: równoległej i antyrównoległej, wykazując „możliwość kontrolowania transmisji fal spinowych (...) poprzez zmianę konfiguracji namagnesowania”. Stanowiło to rozwinięcie analizy dokonanej w podrozdziale 5.3 za pomocą BLS dla węższych pasków i pozwoliło Autorowi na sformułowanie znaczącego wniosku, że magnoniczne właściwości układów kwaziperiodycznych pasków pozostają takie same niezależnie od ich skali przestrzennej. Na zakończenie rozdziału piątego Autor zaprezentował jeszcze (w podrozdziale 5.6) analizę modów z wyższych pasm, ponownie uzyskując „bardzo dobrą zgodność pomiędzy danymi eksperymentalnymi i teoretycznymi” i jednocześnie stwierdzając, że szansa na ewentualne zastosowanie praktyczne tych modów jest mała z powodu niewielkich sygnałów przez nie generowanych.

Muszę przyznać, że ta opisana powyżej analiza właściwości dynamicznych zrobiła na mnie ogromne wrażenie. Szczególnie spektakularne są moim zdaniem obrazy STXM i ich zgodność z wyliczonymi strukturami pasmowymi. Uważam, że Autorowi udało się uzyskać bardzo wartościowy wynik, w sposób istotny wzbogacający wiedzę na temat magnetycznych właściwości nanostruktur kwaziperiodycznych.

Jednocześnie chciałbym zwrócić uwagę na intrygujące spostrzeżenie Autora sformułowane na str. 75 w trakcie dyskusji wyników obliczeń struktury pasmowej: „Ciekawe jest to, że w przypadku struktury Fibonacciego, ilość modów w podpasmach jest również równa jednej z liczb Fibonacciego: 21 – (3.6 – 4.25 GHz), 13 – (4.35 – 4.6 GHz), 21 – (4.75 – 5.0 GHz), 34 – (5.8 – 6.1 GHz).” Należy tu jeszcze dodać, że obliczenia wykonano „dla struktury rzędu S11 (...), złożonej z 55 szerokich i 34 wąskich pasków”, i że liczba 55 również należy do ciągu Fibonacciego. Autor nie rozwinął dalej swego spostrzeżenia, w związku z czym pozostaje zagadką, czy owa zbieżność liczby modów z liczbami ciągu

Fobonacci jest przypadkowa, czy też można ją jakoś racjonalnie wytłumaczyć, np. liczbą występowania specyficznych grup pasków w całej rozważanej strukturze?

Rozdział szósty prezentuje wyniki wzbudzania fal spinowych w falowodach i sieciach antykropek, znajdujących się w jednorodnym zewnętrznym polu magnetycznym. W przypadku falowodów, czyli pojedynczych pasków permalojowych, Autorowi udało się zaobserwować za pomocą STXM jednoczesne wzbudzenie kilku modów, przy czym najkrótsze fale piniowe miały długość poniżej 100 nm. Udało się także zaobserwować „*tworzenie się szybko zanikających wiązek fal spinowych*” w sieciach antykropek. W obu przypadkach udało się jednoznacznie stwierdzić, „*że krawędzie struktur powodują występowanie niejednorodności namagnesowania, które po sprzęgnięciu z zewnętrznym polem stają się źródłem fal spinowych*”.

W tym rozdziale na szczególną uwagę zasługują – moim zdaniem – obrazy wzbudzeń fal spinowych w falowodach, uzyskane techniką STXM. Obrazy te jasno potwierdzają, że niejednorodności namagnesowania wywołane ścianą domenową albo geometryczną krawędzią nanostruktury pracują – po pobudzeniu całej próbki jednorodnym polem zewnętrznym – jak emitery fal spinowych o nanometrowych rozmiarach. Tym samym Autor wskazał drogę do osiągnięcia drugiego celu rozprawy. Jednocześnie chciałbym wyrazić wątpliwość, dotyczącą celowości umieszczenia na rys. 6.7b „*trzech klatek z filmu wzbudzeń w rogu falowodu przy wzbudzaniu ciągłym*”. Otóż wydają się one być bardzo podobne do siebie, a Autor nie doprecyzował tutaj czym się one różnią, co zadecydowało o ich wyborze i co mają ilustrować. Z trochę podobną sytuacją można się spotkać na rys. 6.8, gdzie pokazane są „*wybrane klatki filmu wzbudzeń*” i gdzie Autor nie określił, według jakiego klucza wybrał akurat te klatki. Ale w tym przypadku widoczne są przynajmniej wyraźne różnice pomiędzy poszczególnymi klatkami i można się domyślić, że chodzi tutaj prawdopodobnie o pokazanie fal spinowych o różnych fazach.

Rozdział siódmy, ostatni, stanowi syntetyczne podsumowanie najważniejszych wyników przedstawionych w rozprawie.

Podsumowując powyższy przegląd rozprawy doktorskiej mgra inż. Filipa Lisieckiego, pragnę wyrazić jednoznacznie pozytywną ocenę jej merytorycznej zawartości. Tematyka badawcza podjęta przez Autora jest – moim zdaniem – bardzo ciekawa i aktualna, bowiem strukturyzowane magnetyczne układy niskowymiarowe stanowią obecnie jedno z wiodących zagadnień współczesnej fizyki magnetyzmu ze względu na swoje interesujące właściwości i na ogromny potencjał aplikacyjny. Autor osiągnął wartościowe wyniki.

Wyjaśnił „wpływ kwaziperiodyczności na proces przemagnesowania sieci” pasków i wykazał, że kwaziperiodyczne sieci pasków zapewniają większe „możliwości manipulacji magnoniczną strukturą pasmową, aniżeli kryształy magnoniczne”. Zaobserwował też propagację „krótkich fal spinowych (o długości nawet poniżej 100 nm) w prostokątnych falowodach, a także wiązek fal spinowych w sieciach antykropek” i udowodnił, że źródłem tych fal są „niejednorodności namagnesowania występujące na krawędziach struktur”.

W mojej opinii Autor z powodzeniem przebrnął trudną i krętą ścieżkę procesu badawczego eksperymentalnej fizyki magnetyzmu: zaprojektował i przygotował odpowiednie nanostruktury, wykorzystując przy tym nowoczesne metody preparacyjne, wykonał złożone pomiary, posługując się przy tym wyrafinowanymi technikami badawczymi i korzystając ze współpracy z krajowymi i zagranicznymi ośrodkami naukowymi, i uzyskał cenne wyniki, które wyczerpująco przeanalizował i porównał z wynikami teoretycznymi. Autor tym samym udowodnił, że dysponuje ogólną wiedzą teoretyczną i osiągnął odpowiednią biegłość fizyka-eksperymentatora, i że potrafi samodzielnie prowadzić pracę naukową.

Moją pozytywną ocenę merytoryczną wzmacnia dodatkowo fakt, że w tej tematyce mgr inż. Filip Lisiecki opublikował trzy artykuły w prestiżowych czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym, takich jak *Physical Review B* (IF=3.736, 1 praca) oraz *Physical Review Applied* (IF=4.532, 2 prace), przy czym w przypadku dwóch publikacji w *Physical Review Applied* jego nazwisko znajduje się na pierwszym miejscu na liście autorów, i że jest współautorem dwóch kolejnych prac z tej tematyki przygotowywanych do opublikowania. Oprócz tego może pochwalić się jeszcze współautorstwem 6 innych publikacji, co niewątpliwie potwierdza jego pracowitość i zaangażowanie na polu nauki.

Wysoko oceniam też rozprawę doktorską mgra inż. Filipa Lisieckiego pod względem formalnym. Układ rozprawy jest logiczny i przejrzysty. Autor sprawnie porozdzielał prezentowane informacje pomiędzy poszczególne rozdziały i podrozdziały. Wrażenie porządku spotęgował dodatkowo poprzez umieszczenie krótkiego wstępu na początku każdego rozdziału, a także – na końcu najważniejszych rozdziałów 5 i 6 – podsumowania rozdziału. Pod względem językowym rozprawa napisana jest bardzo starannie, o czym może świadczyć niewielka liczba błędów gramatycznych i literowych, jakie udało mi się zauważyć. Aby nie być gołosłownym, podaję poniżej odpowiednie cytaty z pracy, wskazując błędy pogrubioną czcionką:

Str. 19: „w postaci z sieci nanodysków”.

Str. 39: „zarządzanym przez **Instytutu**”.

Str. 57: „ku wyższym **wartością**”.

Str. 62: „mają wyraźnie większe **wartości porównaniu** do danych” – (brakuje „w”).

Na zakończenie pragnę jeszcze sformułować kilka uwag krytycznych dotyczących prezentacji wyników:

Na str. 40 przy opisie techniki STXM Autor napisał, że w tej technice „konieczne jest umieszczenie badanych elementów na membranie - cienkiej (100 nm) warstwie Si_3N_4 ”, aby były one przezroczyste dla promieni rentgenowskich. Natomiast na stronach 48 i 50, opisując preparatykę badanych próbek, używał kilka razy terminu „membrana SiN”, wypisując niepoprawny wzór chemiczny azotku krzemu.

Na rysunkach 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 i 5.9, przedstawiających albo pętle histerezy, albo liczbę przemagnesowanych pasków, albo wreszcie widma VNA-FMR, oś poziomą Autor opisał jako „H” i wyskalował ją w militeslach (mT). Ponieważ symbol H powszechnie stosowany jest do oznaczenia wielkości o nazwie „natężenie pola magnetycznego”, którą w układzie SI wyraża się w A/m, to widać tutaj pewną niefrasobliwość Autora w operowaniu jednostkami fizycznymi, którą można zaklasyfikować jako wykroczenie przeciwko ścisłości naukowej. Najprostszym sposobem naprawy byłoby w tym przypadku opisanie osi poziomej jako „ $\mu_0 H$ ” i wtedy jednostki typu militesle byłyby jak najbardziej na miejscu. Pragnę dodać, że nie mam podobnego zastrzeżenia do rysunków 5.22 i 6.9, ukazujących widma VNA-FMR, gdzie oś pozioma jest opisana bardziej wieloznacznie jako „Pole” (w domyśle „pole magnetyczne”, a więc i może „indukcja pola magnetycznego”) i gdzie jednostką jest także mT.

Na str. 56 znajduje się odwołanie do nieistniejącego rys. 5.1a. Z kontekstu wynika, że chodzi tu o rys. 5.2a.

Na rys. 5.10, przedstawiającym widma BLS, widoczne są poziome lub ukośne linie ciągłe, których znaczenia Autor nie wyjaśnił. Można byłoby pomyśleć, że jest to może BLS-owa emanacja ciągu Fibonacciego (☺). Ale ponieważ linii tych nie ma w elektronicznej wersji pracy, to najrozsądniej chyba będzie przyjąć, że pojawiły się one jako wynik błędu drukarskiego.

Na rysunkach 5.13, 5.18 i 5.20, przedstawiających wyniki uzyskane za pomocą STXM, brakuje skali przestrzennej prezentowanych obrazków. O ile rysunki 5.18 i 5.20 dotyczą wyników uzyskanych na paskach o szerokości 700 nm i 1400 nm (co jest wyraźnie określone w podpisie pod tymi rysunkami), a na obrazkach białe przerywane linie oznaczają szczeliny pomiędzy paskami, w związku z czym skalę przestrzenną można sobie

jakoś wydedukować, to o tyle rys. 5.13 pozostaje zagadką, bowiem ani w tekście pracy ani w podpisie pod obrazkiem nie można doszukać się informacji na temat szerokości pasków, jakie zostały na nim pokazane. Pewną wskazówką jest tu informacja o wartości pola, w jakim były rejestrowane te obrazki, równa 5 mT. Zdaje się ona wskazywać na szerszy zestaw pasków, biorąc pod uwagę podane na str. 65 wartości pól wybrane dla obu zestawów szerokości (5 mT dla szerszych pasków i 12.5 mT dla węższych). Wyrysowanie skali przestrzennej rozwiłaby w tym przypadku wszelkie wątpliwości.

Podobnie zauważalny jest brak skali przestrzennej na rys. 6.1, prezentującym STXM-owe „wzbudzenie fali spinowej w pasku będącym częścią sieci Fibonacciego”. Na szczęście na podobnego typu rys. 6.2 skala przestrzenna jest już wyraźnie zaznaczona, a co do rys.6.3, gdzie znowu nie ma skali, słusznym wydaje się być domysł, że skala przestrzenna jest identyczna jak na rys. 6.2. Na kolejnym rysunku z STXM o numerze 6.5 znowu brakuje skali przestrzennej, ale za to na wszystkich następnym rysunkach tego typu, czyli na rys. 6.6, 6.7 i 6.8, skala przestrzenna już jest!

Na rys. 6.2b widoczna jest dodatkowa skala barw z podanymi wartościami liczbowymi (1000, 2000, 3000), odpowiadającymi poszczególnym barwom, ale niestety brakuje opisu tej skali i nie wiadomo co ona oznacza.

Na str. 91 znajduje się takie zdanie: „... wraz ze *zmniejszaniem* wartości pola od -20 mT ku wartościom dodatnim ...” , które w sposób oczywisty powinno mieć brzmienie następujące: „... wraz ze **zwiększaniem** wartości pola od -20 mT ku wartościom dodatnim ...” .

Na rys. 6.6b, prezentującym przestrzenny rozkład namagnesowania w falowodzie uzyskany z symulacji mikromagnetycznych, brakuje skali barw i opisu znaczenia kolorów na obrazku. Można się tylko domyślać, że za pomocą koloru zakodowana została któraś ze składowych magnetyzacji.

Pragnę nadmienić, że wymienione powyżej niedociągnięcia w prezentacji wyników mają nieduży wpływ na moją całościową ocenę rozprawy.

Reasumując stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa mgr inż. Filipa Lisieckiego spełnia w mojej opinii warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Filipa Lisieckiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Marek Kisielewski