

**Streszczenie rozprawy doktorskiej mgr Moalic Mathieu**  
*pt: Numerical Investigations of Collective Spin-Wave Dynamics in Complex Magnetic Textures and Patterned Ferromagnetic Films.*

Elektroniczne układy obliczeniowe wciąż są miniaturyzowane, jednak dalsze skalowanie wydaje się coraz bardziej ograniczane przez wysokie gęstości mocy i stosowane napięcia. Natomiast, fale spinowe (magnony) przenoszą informację przy bardzo niewielkim zużyciu energii, a przy częstotliwościach mikrofalowych ich długości fal mogą wynosić od kilkuset do kilkudziesięciu nanometrów, co umożliwia tworzenie elementów w nanoskali zużywających znacznie mniej energii niż konwencjonalna elektronika. Dlatego magnony, w szczególności w ferromagnetykach, wyłaniają się jako obiecująca droga do niskoenergetycznego przetwarzania informacji.

Materiały magnetyczne są znane od tysiącleci i stanowią podstawę wielu technologii codziennego użytku – od silników i czujników po komputery, a nawet zwykłe magnesy na lodówce. W ciągu ostatnich dwóch dekad badacze koncentrowali się również na budowie podstawowych elementów układów magnonicznych: sprzęgaczy kierunkowych, diod, tranzystorów i bramek logicznych. Aby w pełni wykorzystać właściwości fal spinowych w takich systemach, kluczowa jest precyzyjna kontrola oddziaływań między poszczególnymi elementami, szczególnie w skali submikrometrowej.

W niniejszej pracy badam cienkie warstwy ferromagnetyczne o złożonych teksturach magnetyzacji i złożonej strukturalizacji w nanoskali, które mogą znaleźć zastosowanie w systemach magnonicznych. Głównym celem pracy doktorskiej jest wyznaczenie podstawowych zasad projektowych i opracowanie narzędzi numerycznych do deterministycznej kontroli widm fal spinowych, profili modów i ich wzajemnych oddziaływań w strukturalizowanych w skali submikrometrów warstwach ferromagnetycznych.

Pracę doktorską rozpoczynam od przedstawienia podstaw magnetyzmu, a następnie omawiam mikromagnetyzm; oddziaływania rządzące układami magnetycznymi; tekstury namagnesowania oraz fale spinowe. Wprowadzenie kończę opisem obecnie intensywnie badanych tematów: kryształów magnonicznych i obliczeń z użyciem fal spinowych. Następnie przedstawiam oprogramowanie rozwinięte w trakcie badań. Opracowałem narzędzie do symulacji mikromagnetycznych „Amumax” oraz pakiet postprocessingu danych „Pyzfn” do oszczędnej przestrzennie i czasowo analizy dużych zbiorów danych, umożliwiające symulacje wcześniej praktycznie nieosiągalnych systemów.

W pierwszej części badań analizuję cienkie warstwy ferromagnetyczne z prostopadłą anizotropią magnetyczną (PMA), strukturyzowane siecią anty-kropek, których obrzeża mają zredukowane PMA, tworząc pierścienie namagnesowane w płaszczyźnie. Pierwsza praca pokazuje, że kontrolowane mięknięcie namagnesowania w obszarach brzegowych sieci anty-kropek kształtuje widmo fal spinowych, tworząc mody zlokalizowane na obrzeżach, hybrydy modów brzegowych i objętościowych, magnoniczne przerwy pasmowe oraz zależną od historii namagnesowania niewzajemność – wskazując inżynierię anizotropii jako wydajny sposób umożliwiający sterowanie falami spinowymi. To połączenie objętościowej części strukturyzowanej warstwy ferromagnetycznej z PMA z obszarami brzegowymi namagnesowanymi w płaszczyźnie wykorzystuję, aby zademonstrować silne, z wykorzystaniem oddziaływań wymiennych, sprzężenie magnon–magnon między modami związanymi i biegnącymi. Otwiera to drogę do programowalnych oddziaływań istotnych dla rozwoju koherentnej magnoniki i hybrydowych technologii kwantowych. Następnie, wykorzystuję nieliniowość dynamiki magnetyzacji występującą w litograficznie prostej strukturze, złożonej z nano-obszaru namagnesowanego w płaszczyźnie i osadzonego w ferromagnetycznym pasku namagnesowanym prostopadłe do płaszczyzny paska, który przekształca sygnał jednorodnego pola mikrofalowego w spójne, biegnące płaskie fale spinowe o częstotliwości dwa razy większej i długości fali poniżej 300 nm. Częstotliwość emisji i sprawność generacji drugiej harmonicznej skalują się z polem oraz szerokością nanoelementu, a koncepcję można łatwo rozszerzyć na układy dwu-wy-mia-ro-we, dostarczając tym samym zwarte,

przestrajalne źródło fal spinowych, zdominowanych przez oddziaływania wymienne, odpowiednie do realizacji magnonicznych sztucznych sieci neuronowych.

Równolegle, badałem deterministyczne, hierarchiczne związanie fal spinowych w nanoskali z użyciem struktury trójkąta Sierpińskiego, jako uogólnienie koncepcji sieci antykropek na wzory wieloskalowe. Zagnieżdżone długości kwantyzacji fali spinowej w strukturze fraktalnej generują przestrajalne minipasma i magnoniczne przerwy pasmowe – kontrolowane geometrią lub poprzez obrót zewnętrznego pola magnetycznego – oferując szerokopasmową elastyczność spektralną fal spinowych do multipleksowania i sterowania sygnałów, bez konieczności zmiany materiału. Wreszcie, we współpracy z grupą eksperymentalną z Wiednia, badamy jednowymiarowy, oparty na łańcuchu anty-kropek nanokryształ magnoniczny wytworzony na bazie wąskiego, sub-mikro-metro-wego, paska z granatu itrowo-żelazowego (YIG). Wykazujemy możliwość otrzymania przerw pasmowych dla fal spinowych, plato modów wolnych oraz wnęk rezonansowych na defektach, potwierdzając koncepcje małowstratnego trasowania i filtrowania fal spinowych w skali podmikrometrowej, opartej o platformę na bazie ferromagnetycznego dielektryka.

Praca doktorska wytycza realną ścieżkę do praktycznych, niskoenergetycznych procesorów magnonicznych, dostarczając sposobu na kontrolowalne widma fal spinowych i oddziaływania oraz konwersję częstotliwości na chipie wytwarzalnych na platformach cienkowarstwowych. Wyniki opublikowano w czterech artykułach naukowych oraz jednym preprintcie będącym obecnie w recenzji, a opracowane oprogramowanie jest upublicznione z otwartym kodem źródłowym. Łącznie, zaprezentowane badania przedstawiają ramy programowalnej magnoniki oparte na trzech komplementarnych elementach sterujących – anizotropii, geometrii i nieliniowości – wdrożonych w przyjaznych litograficznie platformach cienkowarstwowych. Dostarczają one metody na przełączalną hybrydyzację fal spinowych brzeg-objętość, silnego sprzężenia modów fal spinowych przestrajalnych polem magnetycznym i historią namagnesowania, formowania magnonicznych przerw pasmowych, zwartego źródła krótkich fal spinowych podwajającego częstotliwość wzbudzających je mikrofal oraz hierarchicznej kontroli spektralnej.