

mgr Mateusz Gołębiowski

Streszczenie rozprawy doktorskiej pt.: *Nowe metody kontroli fal spinowych z wykorzystaniem strukturyzacji i złożonej geometrii nanostruktur ferromagnetycznych.*

Magnetyzm, fundamentalne zjawisko natury, odgrywa kluczową rolę w wielu technologiach, od przechowywania danych po konwersję energii. Sercem nowoczesnego magnetyzmu jest kontrola dynamiki magnetyzacji, która jest regulowana przez wzajemne oddziaływania wymienne, anizotropie i pola rozmagnesowujące. W miarę jak urządzenia stają się coraz mniejsze i bardziej wydajne, zrozumienie dynamiki magnetyzacji staje się niezbędne – szczególnie w zastosowaniach w spintronice i magnonice. Druga z tych dziedzin koncentruje się na propagujących zaburzeniach magnetyzacji, zwanych falami spinowymi, które wykazują potencjał do przetwarzania informacji przy bardzo niskim zużyciu energii.

Badania nad domenami magnetycznymi ewoluowały od analiz objętościowych makromateriałów do zminiaturyzowanych systemów, umożliwiając eksplorację fal spinowych w ograniczonych geometriach. Struktury o niższych wymiarach, takie jak ultracienkie warstwy (2D) i nanodruty/nanopręty (1D), umożliwiły naukowcom manipulację falami spinowymi poprzez efekty brzegowe, chiralność i periodyczne teksturowanie, prowadząc do zastosowań takich jak filtrowanie częstotliwości i przetwarzanie sygnałów. Jednakże, niedawny rozwój badań nad nanostrukturami trójwymiarowymi (3D) sygnalizuje rozwijający się trend, który otwiera zupełnie nowe możliwości dla badań nad falami spinowymi. Periodyczności w złożonych geometriach, takich jak gyroidy czy kaskadowe matryce nanoprętów, pozwalają uzyskać niespotykaną dotąd kontrolę nad lokalizacją fal spinowych, ich dyspersją oraz strukturą pasmową, a także innymi kluczowymi właściwościami dynamicznymi. Postępy te stanowią naturalny krok w kierunku wykorzystania niezwykle małych i złożonych struktur do precyzyjnego strojenia dynamiki magnetyzacji we wszystkich kierunkach przestrzennych.

Szybki rozwój tej dziedziny jest napędzany nie tylko innowacjami w technikach nanofabrykacji, takimi jak osadzanie warstw atomowych i metody samo-organizacji, ale również rosnącymi możliwościami obliczeniowymi, które umożliwiają stosowanie coraz bardziej zaawansowanych metod numerycznych. Narzędzia teoretyczne, takie jak metody różnic i elementów skończonych, są niezbędne do rozwiązania złożonej dynamiki opisanej równaniem Landaua–Lifshitz–Gilberta. Wzrost dostępnych zasobów obliczeniowych przełożył się również na możliwość precyzyjnego modelowania zjawisk magnetycznych w trójwymiarowych układach o wysokiej rozdzielczości, które do niedawna były zbyt wymagające. Metody numeryczne pozwalają badaczom odkrywać, w jaki sposób nanostruktury 3D mogą kontrolować fale spinowe, otwierając nowe możliwości projektowania urządzeń magnonicznych i spintronicznych. Od układów objętościowych po nanostruktury i od cienkich warstw po skomplikowane nanoarchitektury 3D, dziedzina magnetyzmu stale rozszerza możliwości kontroli magnetyzacji, napędzając innowacje w zakresie zjawisk dynamicznych dla technologii nowej generacji.

Niniejsza rozprawa doktorska bada kontrolę fal spinowych w materiałach ferromagnetycznych poprzez wielowymiarową strukturyzację, koncentrując się na symulacjach mikromagnetycznych jako głównym narzędziu badawczym. Pracę otwierają niezbędne podstawy teoretyczne z magnetyzmu, w szczególności mikromagnetyzmu, w celu wyjaśnienia kluczowych aspektów dynamiki fal spinowych, takich jak oddziaływania wymienne, pola rozmagnesowujące i równanie Landaua–Lifshitz–Gilberta. Znaczna część pracy poświęcona jest następnie metodom numerycznym stosowanym w symulacjach. Przedstawiono szczegółowe analizy metod różnic i elementów skończonych zaimplementowanych w środowiskach obliczeniowych takich jak MuMax3, COMSOL Multiphysics i tetmag, oraz pokazano ich zastosowanie w projektowaniu, symulowaniu i analizowaniu złożonych układów magnetycznych.

Podstawą rozprawy jest zbiór opublikowanych artykułów naukowych, które przedstawiają nowe strategie kontroli fal spinowych poprzez stopniowe zwiększanie złożoności geometrycznej nośników ferromagnetycznych.

Znając postępy w technikach ich wytwarzania oraz wykorzystując metody numeryczne demonstruję, w jaki sposób geometria i wymiarowość wpływają na propagację, dyspersję i lokalizację fal spinowych. Badam jednowymiarowe siatki dyfrakcyjne, dwuwymiarowe sieci dziur kołowych, a także w pełni trójwymiarowe nanostruktury magnetyczne aby pokazać, w jaki sposób układy o wyższej wymiarowości i złożonej strukturyzacji mogą prowadzić do nowych funkcjonalności magnonicznych, definiując przyszłe kierunki rozwoju tej dziedziny. Głównym celem było połączenie teoretycznej optyki fal spinowych z praktycznymi zastosowaniami magnonicznymi, oraz pokazanie, że strukturyzowanie geometryczne może być równie istotne jak właściwości materiałowe w kontrolowaniu interferencji, dyfrakcji, asymetrycznej propagacji i lokalizacji fal spinowych. Poprzez modelowanie teoretyczne, wielkoskalowe symulacje mikromagnetyczne oraz ścisłą współpracę z grupami eksperymentalnymi, moja praca zapewnia zarówno dokładność obliczeniową, jak i możliwość realizacji laboratoryjnej, dążąc do rozwoju nowej generacji układów magnonicznych, architektur logicznych i hybrydowych technologii spintronicznych.

Ważnym rezultatem mojej pracy doktorskiej jest pierwsza mikromagnetyczna demonstracja efektu Talbota dla fal spinowych, ujawniająca samo-obrazowanie zaburzenia magnetyzacji po przejściu przez periodyczną jednowymiarową przeszkodę. Wykorzystując symulacje w MuMax3 oraz narzędzia obliczeniowe oparte na mnożeniu splotowym (konwolucji), pokazuję również, w jaki sposób „dywany” Talbota umożliwiają przeprowadzanie operacji logicznych, proponując rekonfigurowalny i skalowalny model do przeprowadzania obliczeń magnonicznych. Symulacje dwuwymiarowych periodycznych sieci nanodziur z odgórnie zaprojektowanym defektem w MuMax3 i COMSOL wykazały, że takie układy modyfikują strukturę pasmową fal spinowych i umożliwiają generację wyższych harmonicznych, korzystnych w technologiach przetwarzania informacji o wysokiej częstotliwości. Badania nad falowodami o przekroju poprzecznym w kształcie półksiężyca ujawniają natomiast zależną od chiralności profilu lokalizację fal spinowych, podkreślając rolę anizotropii kształtu we wzbudzaniu jednokierunkowej propagacji.

Najbardziej zaawansowany aspekt moich badań obejmuje trójwymiarowe nanostruktury, w których modulacja przestrzenna we wszystkich trzech wymiarach umożliwia niespotykaną dotąd kontrolę nad dynamiką magnetyzacji. Korzystając z COMSOL Multiphysics oraz tetmag, badam sieci gyroidalne aby pokazać, że złożona geometria i orientacja krystalografii prowadzą do silnie zależnych od pola odpowiedzi ferromagnetycznych i lokalizacji modów fal spinowych. Demonstruję w szczególności, że zlokalizowane przy powierzchni mody rezonansu ferromagnetycznego, zaobserwowane w strukturach gyroidalnych oraz kaskadowych matrycach nanoprętów (przypominających rusztowanie), wykazują stan silnej magnetyzacji przełączalny zewnętrznym polem, co otwiera nowe perspektywy dla rekonfigurowalnych falowodów i funkcjonalnych urządzeń magnonicznych.

W skrócie, moje główne osiągnięcia obejmują:

- pierwszą mikromagnetyczną demonstrację efektu Talbota dla fal spinowych oraz wprowadzenie samo-obrazowania fal spinowych jako nowego paradygmatu obliczeniowego;
- identyfikację modów krawędziowych w falowodach o przekroju półksiężycowym, łączącą chiralność strukturalną z lokalizacją fal spinowych;
- dostosowanie i optymalizację metod elementów skończonych oraz technik numerycznych w celu umożliwienia wydajnych, wielkoskalowych symulacji mikromagnetycznych w trzech wymiarach;
- koordynację i aktywny udział we współpracy międzynarodowej dotyczącej badań nad strukturami gyroidalnymi jako platformami dla niekonwencjonalnej dynamiki magnetyzacji;
- odkrycie powierzchniowo zlokalizowanych modów rezonansu ferromagnetycznego w trójwymiarowych nanostrukturach, oferujących możliwość projektowania kontrolowalnych urządzeń magnonicznych.

Niniejsza praca wnosi wkład w rozwijającą się dziedzinę magnoniki badając, w jaki sposób wymiarowość i geometria nośników magnetycznych mogą być wykorzystane do uzyskania nowych funkcjonalności fal spinowych. Łącząc modelowanie teoretyczne, zaawansowane symulacje numeryczne oraz międzynarodową współpracę z grupami eksperymentalnymi, podkreślono obiecujące strategie kontroli fal spinowych. W miarę dalszego rozwoju trójwymiarowej magnoniki, zaprezentowane tutaj wyniki mogą stanowić wsparcie dla przyszłych działań ukierunkowanych na projektowanie urządzeń do energooszczędnego przetwarzania, przechowywania i przesyłania informacji.