

Abstract

The advances in spintronics enabled technologies such as low-energy non-volatile magnetic memory, sensitive magnetic field detectors, and microwave nano-oscillators. Progress in those areas relied not only on experimental breakthroughs but also on a variety of modelling frameworks that guide material optimisation or clarify mechanisms underlying physical behaviour.

The thesis builds on that tradition by contributing modelling tools tailored to contemporary challenges in the field such as multivariable optimisation of device performance. The first contribution is technical and involves the development of the open source macrospin simulation package called *cmtj* that is used to fit experimental data or prototype new architectures. The package is grounded in modelling frameworks provided by the stochastic Landau–Lifshitz–Gilbert–Slonczewski equation and Smit–Beljers formalism.

As the second contribution, the *cmtj* software is employed in three experimental contexts: (i) numerical modelling of harmonic Hall voltage detection in the Ta/CoFeB sample, (ii) explanation of the multilevel switching phenomenon in a trilayer spin-orbit torque Co/Pt/Co system with strong interlayer exchange coupling and Dzyaloshinskii–Moriya interaction, and (iii) the study of desynchronisation fields in electrically coupled in-series CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions. For each, extensive simulations highlight the flexibility of the macrospin model and provide detailed insight into the experimental observations.

Finally, *cmtj* is applied to extrapolate to novel device architectures. Using reinforcement learning, it is demonstrated how a controller can steer an oscillator to synchronise with a desired frequency in a few tuning steps or learn a current impulse shape that leads to magnetisation switching in a simple memory cell model.

Streszczenie

W ostatnich latach postępy w spintronice doprowadziły do powstania niskoenergetycznych pamięci nieulotnych MRAM, czułych detektorów pola magnetycznego oraz nanooscylatorów działających w zakresie mikrofalowym. Rozwój tych urządzeń opierał się w dużej mierze na różnorodnych technikach modelowania, które wyjaśniły mechanizmy leżące u podstaw ich działania lub umożliwiły optymalizację materiałów.

Niniejsza rozprawa wpisuje się w tę tradycję, prezentując narzędzia modelowania dostosowane do współczesnych wyzwań tej dziedziny takich jak optymalizacja układów w przestrzeni wielu parametrów. Pierwszym wkładem rozprawy jest otwarty pakiet symulacyjny *cmtj*, który może być użyty do dopasowywania wyników eksperymentalnych lub prototypowania nowych urządzeń spintronicznych. W ramach pakietu zostały zaimplementowane różne metody numeryczne oparte m.in. na równaniu Landaua–Lifshitz–Gilberta–Slonczewskiego oraz modelach Smita–Beljersa.

Druga część pracy opisuje użycie programu symulacyjnego *cmtj* do zamodelowania trzech zjawisk eksperymentalnych: (i) numerycznego opisu harmonicznego detekcji napięcia Halla w próbce Ta/CoFeB, (ii) wyjaśnienia wielostopniowego przełączania w strukturze Co/Pt/Co z torkiem spin-orbita, silnym sprzężeniem międzywarstwowym oraz interakcją Dzyaloshinskii–Moriya, (iii) opisu mechanizmu pól desynchronizacji w sprzężonych elektrycznie i szeregowo połączonych magnetycznych złączach tunelowych na stacku CoFeB/MgO/CoFeB. W każdym z powyższych przypadków obszerne symulacje makromagnetyczne dostarczają wielu cennych wskazówek ułatwiających interpretację pomiarów eksperymentalnych.

Ostatnia część pracy przedstawia integrację oprogramowania *cmtj* z modelami uczenia ze wzmocnieniem. Zademonstrowano kontroler, który w niewielkiej liczbie kroków automatycznie dostraja oscylator spintroniczny do zadanej częstotliwości oraz kontroler kształtowania impulsu prądu w celu uzyskania przełączenia w układzie ferromagnetyk–metal ciężki lub w złączu tunelowym.