



Záverečná karta projektu

Názov projektu

Evidenčné číslo projektu

APVV-19-0311

Robustné spinové vlny pre budúce magnonické aplikácie

Zodpovedný riešiteľ **Mgr. Michal Mruczkiewicz, PhD.**

Príjemca **Elektrotechnický ústav SAV, v. v. i.**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Elektrotechnický ústav Slovenskej akadémie vied, EIU SAV, v.v.i.
Univerzita Komenského, UK

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

žiadny

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

Počas realizácie projektu sme vyrobili prototypy vortexových MFM hrotov.

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

Počas realizácie projektu sme publikovali 15 medzinárodných publikácií, najdôležitejšie sú:

1. Feilhauer, J., Saha, S., Tobik, J., Zelent, M., Heyderman, L.J. and Mruczkiewicz, M., 2020. Controlled motion of skyrmions in a magnetic antidot lattice. *Physical Review B*, 102(18), p.184425.
2. Mruczkiewicz, Michal, and Pawel Gruszecki. "The 2021 roadmap for noncollinear magnonics." *Solid State Physics*. Vol. 72. Academic Press, 2021. 1-27.
3. Bublikov, K., et al. "Vortex gyrotropic mode in curved nanodots." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (2021): 168105.
4. Vetrova, Iu V., et al. "Investigation of self-nucleated skyrmion states in the ferromagnetic/nonmagnetic multilayer dot." *Applied Physics Letters* 118.21 (2021): 212409.
5. Krylov, S., Vetrova, I., Feilhauer, J., Fedor, J. Dérier, J., Šoltýs, J., and Cambel, V.: Improved durable vortex core MFM tip, *J. Magnet. Magn. Mater.* 555 (2022) 169357.
6. Feilhauer, J., Zelent 14.28, M., Zhang, Z., Christensen, J., and Mruczkiewicz, M.: Unidirectional spin-wave edge modes in magnonic crystal, *APL Mater.* 11 (2023) 021104.
7. Tóbiš, J.: Dynamical symmetry breaking in magnetic systems, *Phys. Status Solidi RRL* 17 (2023) 2200459.
8. Ščepka, T., Feilhauer, J., Tóbiš J., Krylov S., Kalmykova T., Cambel, V., and Mruczkiewicz M.:

Control of closure domain state circulation in coupled triangular permalloy elements using MFM tip, J. Appl. Phys. 134, 213902 (2023).

9. Szulc, K., Graczyk, P., Mruczkiewicz, M., Gubbiotti, G. and Krawczyk, M., 2020. Spin-wave diode and circulator based on unidirectional coupling Phys. Rev. Applied 14, 034063

10. Zelent, Mateusz, et al. "Skyrmion Formation in Nanodisks Using Magnetic Force Microscopy Tip." Nanomaterials 11.10 (2021): 2627.

11. Szulc, Krzysztof, et al. "Nonreciprocal spin-wave dynamics in Pt/Co/W/Co/Pt multilayers." Physical Review B 103.13 (2021): 134404.

12. Feilhauer, J., Tóbiš, J., Šoltys, J., and Cambel, V.: Numerical characterization of magnetic vortex probe imaging for magnetic force microscopy, IEEE Trans. Magnet. 59 (2023) 6500210.

13. Vetrova, I., Feilhauer, J., Cambel, V., and Šoltys, J.: MFM tip with a ferromagnetic disk-shaped apex for large domain scanning, IEEE Trans. on Nanotechnol. 22 (2023) 634-640.

14. Makartsou, U., Moalic, M., Zelent, M., Mruczkiewicz, M., and Krawczyk*, M.: Control of vortex chirality in a symmetric ferromagnetic ring using a ferromagnetic nanoelement, Nanoscale 15 (2023) 13094-1310127.

15. Zelent, M., Moalic, M., Mruczkiewicz, M., Li, X., and Krawczyk, M.: Stabilization and racetrack application of asymmetric Néel skyrmions in hybrid nanostructures, Sci Rep. 13 (2023) 13572.

Uplatnenie výsledkov projektu

Výsledky nie sú v súčasnosti priamo aplikované v priemysle. Projekt bol základným výskumným typom projektu, takže využitie výsledkov bude aplikovanie poznatkov získaných týmto projektom pre ďalší výskum. Jedným z dôležitých výstupov projektu je totiž unikátna vzorka s magnonickým kryštálom tvoreným s tesne spriahnutými magnetickými elementami. Takýto kryštál poslúži na ďalšie skúmanie v magnonike alebo iných oblastiach fyziky.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

Dosiahli sme niekoľko dôležitých výsledkov, ktoré súviseli s cieľmi projektu. Hlavným cieľom bolo študovať robustné spinové vlny pre budúce magnonické aplikácie. Pod robustnou spinovou vlnou rozumieme vlnu imúnnu voči defektom, ktorá sa šíri v jednosmerných nanokanáloch. Projekt bol rozdelený do 4 pracovných balíkov so zameraním na rôzne aspekty. WP1 bol zameraný na výskum jednosmernej spinovej vlny v topologických magnonických kryštáloch. WP2 bol zameraný na jednosmerné SW v dvojvrstvových alebo dvojkanálových systémoch. WP3 bol zameraný na teoretické a experimentálne metódy potrebné na realizáciu preprogramovateľného umelého „spin ice“ a WP4 bol zameraný na aplikáciu poznatkov v konkrétnom funkčnom magnetickom prvku, ako je dióda alebo cirkulátor. Počas realizácie projektu sme urobili najvýraznejší pokrok v práci na WP1, WP3 a WP4. Výsledky získané počas práce na WP2 neboli uspokojivé z hľadiska reprodukovateľnosti a experimentálnej kontroly, preto sa najväčší dôraz kládol na ostatné WP. Pri riešení WP1 sme väčšinu cieľov zrealizovali. Konkrétne sme v teórii a experimente demonštrovali niekoľko metód na riadenie chiralít jednej základnej bunky magnonického kryštálu a teoreticky sme demonštrovali topologické vlastnosti jednosmerných spinových vln v takýchto kryštáloch. Vyvinuli sme spôsob výroby magnonického kryštálu s vysokou dipolárnou väzbou medzi jednotlivými bunkami v základnom stave. Tieto výsledky nám umožňujú pokračovať v experimentálnom výskume dynamiky spinových vln v tomto type magnonických kryštálov. Počas práce na WP2 sme demonštrovali a skúmali zaujímavé vlastnosti šírenia spinových vln v dvojvrstvových systémoch. Osobitná pozornosť bola venovaná neregulárnym väzbám. Ďalej sme skúmali možnosti experimentálnej realizácie tohto typu štruktúr. Zistili sme, že simultánne riadenie výmenných parametrov (DMI) a

anizotropie je ťažké a odchýlky od vzorky ku vzorke sú veľké. Počas práce na tomto celi sme zlepšili citlivosť nastavenia merania FMR a integrovali rotačný stolík, čo sa tiež využilo na magnonické kryštály študované vo WP1. Vo vzťahu k WP3 sme vyvinuli dôležité teoretické modely, ktoré popisujú riadenie stavu magnetizácie s prihliadnutím na dynamiku magnetizácie. Toto a tiež skúsenosti z WP1 nám v budúcnosti umožnia výrobu ASI s ovládateľnou magnetizáciou. Ďalej sme vylepšili charakterizačné techniky, ako je napríklad vortex-core MFM hrot. Vo vzťahu k WP4 sme významne prispeli k popisu neregipročného šírenia spinových vln a použili sme ho ako stavebný prvok magnoniku: diódy alebo cirkulátora. Ukázali sme tiež, že hybridné systémy môžu byť použité na prekonanie skyrmiónového Hallovho efektu nežiaduceho v kontexte racetrack aplikácie a sú vhodné na prepravu skyrmiónu po priamej dráhe pomocou impulzov elektrického prúdu. Ďalej sme zverejnili plán, ktorý sa zameriava na vlastnosti nekolineárnych magnetických stavov pre magnonické aplikácie. Prispeli sme k aplikácii projektu COST CHIROMAG. Celkovo už bolo v medzinárodných časopisoch publikovaných spolu 15 publikácií súvisiacich s projektom. Zistenia projektov otvárajú cesty pre viaceré výskumné témy s vysokým potenciálom vplyvu.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

We have obtained several important results that were related to the objectives of the project. The main aim of this project was to study robust spin waves for future magnonic applications. By a robust spin wave we mean a wave immune to disorder, propagating in unidirectional nanochannels. The project was divided into 4 working packages with focus on different aspects, WP1 was focused on the investigation of unidirectional spin wave in topological magnonic crystals. WP2 was focused on unidirectional SWs in bi-layer or bi-channel systems. WP3 was focused on theoretical and experimental methods needed for realization of reprogramable artificial spin ice and WP4 was focused on application of findings in concrete functional magnonic element, such as diode or circulator. During the realization of the project, we made the most significant advancements in WP1, WP3, and WP4. The results obtained during the work on WP2 were not satisfactory from the point of view of reproducibility and experimental control, therefore strongest focus was put on other WPs. In the work on WP1 we have realized most of the objectives. Namely, we have demonstrated in theory and experiment several methods to control the chirality of the single unit cell of magnonic crystal, we have demonstrated theoretically the topological properties of unidirectional spin waves in such crystals. We have developed a fabrication method of the magnonic crystal with high dipolar coupling between the unit cells in the ground state. Those results allow us to continue the experimental investigation on spin wave dynamics in this type of magnonic crystal. During the work on WP2, we have demonstrated and investigated the interesting spin wave propagation properties in the bi-layer systems. In particular attention was paid to nonreciprocal coupling. We have investigated further, the possibilities for the experimental realization of this type of structures. We have found that simultaneous control of exchange parameters (DMI) and anisotropy is difficult and variation from sample to sample is large. During work on this objective, we have improved the sensitivity of FMR measurement setup and integrated a rotational stage that was applied to magnonic crystals studied in WP1. In relation to the WP3 we have developed important theoretical models that describe the control of magnetization state by taking into account the magnetization dynamics. That, along with the experience from the WP1, will allow us to fabricate the ASI with controllable magnetization in the future. Further, we have improved the characterization techniques, such as vortex-tip MFM. In relation to the WP4, we have made significant contributions in describing the nonreciprocal spin wave propagation and using it as a building block of magnonics: diode or circulator. We have also demonstrated that hybrid systems can be used to overcome the skyrmion Hall effect, which is undesirable in the racetrack application context, and is suitable to transport a skyrmion along the straight track by electric current pulses. Further, we have published a roadmap that focuses on properties of noncolinear magnetic states for magnonic applications. We have contributed for application of the COST project CHIROMAG. Overall, a total of 15 publications related to the project were already published in international journals. The findings of the projects opens paths for several research topics with high impact potential.