

Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-16-0068**

Skyrmióny vo feromagnetických nanoobjektoch

Zodpovedný riešiteľ **RNDr. Vladimír Cambel, DrSc.**

Príjemca **Elektrotechnický ústav SAV**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

EIÚ SAV v Bratislave

FMFI UK v Bratislave

UPJŠ v Košiciach

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

Laboratory for Mesoscopic Systems, Department of Materials, ETH Zurich, 8093 Zurich, Switzerland

Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, Switzerland

Faculty of Physics, Adam Mickiewicz University in Poznan, Umultowska 85, Poznan PL-61-614, Poland

Istituto Officina dei Materiali del CNR (CNR-IOM), Sede Secondaria di Perugia, c/o

Dipartimento di Fisica e Geologia, Università di Perugia, I-06123 Perugia, Italy

School of Natural Sciences, Far Eastern Federal University, Vladivostok 690950, Russia

Institute of Molecular Physics, Polish Academy of Sciences, M. Smoluchowskiego 17, Poznań 60-179, Poland

Departamento de Fisica de Materiales, Universidad del Pais Vasco, UPV/EHU, 20018 San Sebastian, Spain

Laboratory "Metamaterials", Saratov State University, Saratov 410012, Russia

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

Podaná pat. prihláška:

Názov vynálezu: Spôsob výroby hrotu pre magnetickú silovú mikroskopiu, hrot vyrobený týmto spôsobom a spôsob skenovania magnetického poľa použitím tohto hrotu Číslo prihlášky: 50030-2019 Dátum priority: 3.7.2019 Majiteľ / spolumajiteľ: Elektrotechnický ústav SAV Pôvodcovia vynálezu: Cambel Vladimír, Šoltýs Ján, Tóbič Jaroslav, Fedor Ján, Precner Marián, Feilhauer Juraj, Ščepka Tomáš, Dérer Ján, Bublikov Konstantin, Vetrova Luliia

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

1. Šoltýs, J., Feilhauer, J., Vetrova, J., Tóbič, J., Bublikov, K., Ščepka, T., Fedor, J., Dérer, J., and Cambel, V.: Magnetic-field imaging using vortex-core MFM tip, Applied Phys. Lett. 116 (2020) 242406.

2. Feilhauer, J., Saha, S., Tóbič, J., Zelent, M., Heyderman, L.J., and Mruczkiewicz, M.: Controlled motion of skyrmions in a magnetic antidot lattice, Phys. Rev. B 102 (2020)

184425.

3. Szulc, K., Graczyk, P., Mruczkiewicz, M., Gubbiotti, G., and Krawczyk, M.: Spin-wave diode and circulator based on unidirectional coupling, *Phys. Rev. Applied* 14 (2020) 034063.
4. Mruczkiewicz, M., Gruszecki, P., Krawczyk, M., and Guslienko, K.Y.: Azimuthal spin-wave excitations in magnetic nanodots over the soliton background: Vortex, Bloch, and Néel-like skyrmions, *Phys. Rev. B* 97 (2018) 064418.
5. Neilinger, P., Ščepka, T., Mruczkiewicz, M., Dérer, J., Manca, D., Dobročka, E., Samardak, A.S., Grajcar, M., and Cambel, V.: Ferromagnetic resonance study of sputtered Pt/Co/Pt multilayers, *Applied Surface Sci* 461 (2018) 202-205.
6. Neilinger, K., Šoltýs, J., Mruczkiewicz, M., Dérer, J., and Cambel, V.: Dual-cantilever magnetometer for study of magnetic interactions between patterned permalloy microstructures, *J. Magnetism Magnetic Mater.* 444 (2017) 354-360.

Uplatnenie výsledkov projektu

1. V prípade patentu ide o nový princíp snímania magnetického poľa, po ďalších testoch skúškach by sa dal priemyselne využiť
2. Množstvo nových vedeckých poznatkov vymedzuje smer ďalšieho výskumu v oblasti skyrmiónov.

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

V projekte sme dosiahli množstvo vedeckých výsledkov, ktoré posúvajú poznatky v oblasti skyrmiónov v uzavretých objektoch. Takéto poznatky posúvajú názor vedeckej obce na možnosť využitia skyrmiónov v oblasti pamätí s vysokým rozlíšením. V prácach sme ukázali, že indukcia skyrmiónu napr. pomocou hrotu MFM, nie je jednoduchá, musia byť splnené špeciálne podmienky. Ukázali sme, že zaujímavou možnosťou je využiť tzv. anti-dot mriežku, v ktorej je možné kontrolovať posúvať skyrmióny impulzmi prúdu. Táto práca bola na EIÚ vybraná Vedeckou radou za prácu roka 2020 v oblasti základného výskumu. Vyvinuli sme novú metodiku mapovania magnetického poľa pomocou tzv. vortex-core hrotu. Tento hrot sme si vyrobili, ukázali jeho funkčnosť, spravili teoretickú analýzu jeho vlastností a aj sme tento nápad prihlásili na patentovanie. Skúmali sme aj dynamické vlastnosti vortexov a skyrmiónov v nanomagnetických štruktúrach, vyvinuli sme nové výpočtové metodiky – aplikovali sme napr. metadynamiku na výpočet bariér v magnetických systémoch.

Ukázali sme na základe simulácií funkčnosť cirkulátora a spinovo-vlnovej diódy s možnosťou manipulácie spinových vín v širokom frekvenčnom rozsahu v GHz režime. Tento príspevok podporuje oblasť energeticky výhodných logických súčiastok na báze magnónov, čím sa otvárajú možnosti aplikácií digitálnych a analogových obvodov v gigahertzovej oblasti. Ako vidno zo súboru VPP, projekt NanoSky priniesol množstvo výsledkov. Celkovo sme publikovali 8 prác, zúčastnili sa na 10 konferenciách, mali sme 3 pozvané prednášky. Na základe projektu sme získali niekoľko zahraničných a domácich projektov, vychovali sme 3 doktorandov, začali sme niekoľko perspektívnych vedeckých spoluprác. Celkovo hodnotíme z nášho hľadiska riešenie projektu Nanosky ako veľmi úspešné. Škoda, že sa kvôli pandémie v poslednom roku nepodarilo dotiahnuť všetky experimenty do konca.

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

We have achieved several scientific results within the project, which shift the knowledge in the field of skyrmions located in closed objects. Such knowledge is important e.g. for exploitation of skyrmions in high-resolution memories. We have shown that the induction of skyrmion by MFM tip is not trivial, it can be realised under special conditions only. Interesting way is to use for it antidot mesh, in which one can control the shift of individual skyrmions by current pulses. This work was selected as the best work of 2020 in basic research by the Scientific Board of the Institute. We have developed also new methodology for the magnetic field imaging using so called vortex-core (VC) tip. We have fabricated the tip, showed its functionality, analysed its properties and applied for patent. We have explored also dynamic characteristics of vortices and skyrmions in nanomagnetic structures, we have developed novel calculation methods -we applied methadynamics for the calculation of barriers in magnetic systems. Based on our simulations, we have shown the

functionality of circulator and spin-wave diode with the possibility to manipulate spin waves in wide frequency range in GHz regime. This part supports the field of energetically convenient logic devices based on magnons, which opens their application in digital and analog circuits in GHz regime.

As shown by the VPP file, project NanoSky produced a lot of scientific results. We have published 8 papers, participated on 10 conferences, we had 3 invited talks. Based on the project, we succeeded in several international and national projects, we have educated 3 PhD students, and we started several scientific collaborations.

From our point of view the project NanoSky was very successful. Unfortunately, due to pandemic not all experiments were finished in time last year.