

Záverečná karta projektu

Názov projektu

Evidenčné číslo projektu

APVV-15-0115

Dizajn štruktúry a funkčných vlastností magneticky mäkkých kompozitných materiálov na báze 3-d prechodných kovov

Zodpovedný riešiteľ **prof. RNDr. Peter Kollár, DrSc.**

Príjemca

Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach - Prírodovedecká fakulta

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Univerzita Pavla Jozefa Šafárika, Prírodovedecká fakulta - žiadateľská organizácia

Ústav materiálového výskumu SAV - spoluriešiteľská organizácia

Technická univerzita v Košiciach - spoluriešiteľská organizácia

Ústav experimentálnej fyziky SAV - spoluriešiteľská organizácia

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

1. ABB Corp Res Ctr, 940 Main Campus Dr, Raleigh, NC 27606 USA

2. Tech Univ Clausthal, Fac Nat & Mat Sci, Arnold Sommerfeld Str 6, D-38678 Clausthal Zellerfeld, Germany

3. Joint Institute for Nuclear Research, Frank Laboratory of Neutron Physics, Dubna, 141980, Russia.

4. Moscow Institute of Physics and Technology, Institutsky per. 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia.

5. Department of Condensed Matter Physics, ICMSE-CSIC, Sevilla University, Sevilla, Spain

6. DESY-HASYLAB, Notkestrasse 85, Hamburg, Germany

7. Ústav fyziky materiálov AV ČR, Brno, Česká republika

8. Ústav makromolekulární chemie AVČR, Praha, Česká republika

9. Institute of Materials Science Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

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

P1. Bureš R., Strečková, M., Fáberová, M., Kollár, P., Füzer, J.: Spôsob prípravy magnetických kompozitov s polymérnym elektroizolačným spojivom

Patent č. 288667. Bratislava : ÚPV SR 2019

P2. Bureš R., Fáberová, M.: Metóda žihania magneticky mäkkých práškov bez spekania

Patent č. 288686. Banská Bystrica : ÚPV 2019

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

1. P. Kollár, D. Olešáková, V. Vojtek, J. Füzer, M. Fáberová, R. Bureš, Steinmetz law for ac magnetized iron-phenolformaldehyde resin soft magnetic composites, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 424, (2017), 245-250, 15852, IF: 3,046 ,Q1

2. Dobák, S., Füzér, J., Kollár, P., Fáberová, M., Bureš R.: Interplay of domain walls and magnetization rotation on dynamic magnetization process in iron/polymer-matrix soft magnetic composites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 426, 2017, s.320-327, 15852, IF: 3,046 ,Q1
3. Périgo, E. A., Weidenfeller, B., Kollár, P., Füzér, J., Past, present, and future of soft magnetic composites (Review), *Applied Physics Reviews* 5, (2018), 031301, 15852, IF: 12,75 ,Q1
4. Füzér, J., Strečková, M., Dobak, S., Ďáková, L., Kollár, P., Faberova, M., Bureš, R., Osadchuk, Y., Kurek, P., Vojtko M., Innovative ferrite nanofibres reinforced soft magnetic composite with enhanced electrical resistivity, *JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS*, 753, (2018), 219-227, 15852, IF: 4,175 ,Q1
5. Kollár, P., Slovenský, P., Olekšáková, D., Jakubčín, M., Birčáková, Z., Füzér, J., Bureš, R., Fáberová, M., Preparation and magnetic properties of NiFeMo powdered compacts of powder elements with smoothed surfaces, *JMMM* 494, (2020) 165770, IF: 2,683 ,Q2
6. Zeleňáková, A., Hrubovčák, P., Kapusta, O., Kučerka, N., Kuklin, A., Ivanov, O., Zeleňák, V. Size and distribution of the iron oxide nanoparticles in SBA-15 nanoporous silica via SANS study, *Scientific Reports* 9 (2019) 15852, IF: 4,122 ,Q1,
7. Zeleňáková, A., Hrubovčák, P., Zeleňák, V., Kováč, J., Franco, V., Magnetocaloric effect and scaling analysis in superspinglass cobalt based nanoparticles, *Journal of Alloys and Compounds* 805 (2019) 767-773, IF: 4,175, Q1,
8. Zeleňák, V., Zeleňáková, A., Kapusta, O. , Hrubovčák, P., Girman, V., Bednarčík, J., Fe₂O₃ and Gd₂O₃ nanoparticles loaded in mesoporous silica: insights into influence of nps concentration and silica dimensionality, *RSC Advances*, 9 (2019) 3679–3687, IF: 3,049, Q1,
9. Strečková, M., Sopčák, T., Štulajterová, R., Giretová, M., Medvecký, L., Kovalčíková, A., Balázs, K., Needle-less electrospinning employed for calcium and magnesium phosphate coatings on titanium substrates, *Surface and Coatings Technology*, 340, 2018, s.177-189, IF:3.192, Q1
10. Strečková, M., Oriňáková, R., Hovancova, J., Hečková, M., Guboová, A., Girman, V., Múdra, E., Danková, Z., Bekeniyová, A., Dusza, J., Novel electrocatalysts for hydrogen evolution based on carbon fibers modified by cobalt phosphides, *Applied Surface Science* 507 (2020) 144927, IF:5.155, Q1
11. Tana, Y., Viola, G., Koval', V., Yu, C., Mahajan, A., Zhang, J., Zhang, H., Zhou, X., Tarakina, N. V., Yanc, H., On the origin of grain size effects in Ba(Ti_{0.96}Sn_{0.04})O₃ perovskite ceramics. *Journal of the European Ceramic Society* 39 (2019) 2064 – 2075, IF:4.029, Q1
12. Strečková, M., Szabó, J., Baťko, I., Baťková, M., Birčáková, Z., Füzér, J., Kollár, P., Kovalčíková, A., Bureš, R., Medvecký, L., Design of Permalloy–ferrite–polymer soft magnetic composites doped by ferrite nanoparticles and visualization of magnetic domains, *Bull. Mater. Sci.* (2020) 43:37, IF:1.264, Q2
13. Bureš, R.: Advances in powder metallurgy soft magnetic composite materials. In: ISNNM-2016. 14th international symposium on novel and nano materials. Budapest, 3.-8.7.2016. B.V. 2016, s.37, pozvaná prednáška

Uplatnenie výsledkov projektu

Výsledky riešenia cieľov projektu publikované vo významných vedeckých časopisoch a prezentované na domácich a medzinárodných konferenciách poslúžia ako východisko pre ďalší základný a aplikovaný výskum vo výskumných a vývojových inštitúciách na celom svete. Publikované práce opisujú nové a inovatívne postupy pri príprave kompozitných materiálov, charakteristiku ich funkčných, najmä magnetických vlastností s cieľom umožniť vývoj materiálov podľa konkrétnych požiadaviek praxe s tým, že oblasť využitia skúmaných materiálov spadajúca do elektrotechnického priemyslu a biomedicínskych aplikácií sa môže stále rozširovať. Analýza magnetických a ďalších vlastností skúmaných materiálov bola vykonaná na základe najnovších poznatkov známych z literatúry a ďalších postupov, ktoré boli vypracované pri riešení projektu a sú použiteľné aj v širšom meradle pre analýzu magnetických vlastností magneticky mäkkých materiálov. Riešenie úloh projektu priamo napomáhala vzdelávaniu študentov-budúcich odborníkov v inštitúciách podieľajúcich sa na riešení cieľov projektu na všetkých stupňoch vzdelávania, najmä doktorandskom stupni. Výsledky projektu sa uplatnili v dvoch patentoch a v Zmluve o spolupráci spojenou s výchovou postdoktoranda s WÜRTH Elektronik GmbH.

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

V priebehu riešenia cieľov projektu boli pripravené série modelových vzoriek magnetických kompozitných materiálov na báze 3 d prechodných prvkov a dielektrického spojiva chemickými metódami a metódami práškovej metalurgie. Mnohé z týchto metód boli novo vyvinuté alebo inovované podľa potrieb experimentov. Na týchto vzorkách boli vykonané experimenty, ktorých výsledky po spracovaní prispeli k objasneniu vplyvu fázových rozhraní na ich elektrické, magnetické a mechanické vlastnosti. Medzi najdôležitejšie výsledky patria príspevky k objasneniu magnetického stavu a magnetizačné procesy pripravených kompozitov za rôznych fyzikálnych podmienok. Ich vlastnosti boli optimalizované úpravou návrhu mikroštruktúry a technológie spracovania, aby sa zvýšil potenciál pre aplikáciu materiálu v elektrotechnike a biomedicínskych aplikáciách. Skúsenosti získané pri výskume vlastností kompozitov boli zovšeobecnené vzhľadom na možnosti cieleného ovplyvnenia ich funkčných vlastností. V rámci projektu boli použité nové metódy prípravy vzoriek vrátane metód úpravy povrchov častíc mechanickými a chemickými metódami. Kolektív riešiteľov bol ako jeden z prvých, ktorí úspešne pripravili kompozitný materiál s magneticky aktívnym dielektrikom a jeho pozitívny vplyv experimentálne preukázali. Príprave tohto materiálu predchádzala inovatívna príprava a detailný výskum správania sa tenkých vlákien a malých častíc, ktoré sa stanú spojivom v kompozitnom materiáli. Medzi pozoruhodné výsledky možno zaradiť príspevok k objasneniu magnetizačných procesov v striedavom magnetickom poli vzhľadom na magnetizačné straty, ktorý vznikol rozšírením poznatkov pri premagnetovaní v kvazistatických poliach opísaných empirickým Steinmetzovým zákonom. Sformulovaný vzťah ireverzibilnej permeability na premagnetizačné straty dáva možnosti chápania vzájomnej súvislosti veličiny, akou je permeabilita a pre prax často používanej veličiny akou sú straty. Ďalším výsledkom je objasnenie úlohy vnútorných demagnetizačných polí na magnetické vlastnosti pri premagnetovaní v kvázistatickom i dynamickom režime. Dôležitým výsledkom je aj príspevok k vysvetleniu správania superspinového skla nanočastíc na báze kobaltu. Správanie nanočastíc je priamo zviazané s existenciou magnetokalorického javu a potvrdzuje, že nanosystémy s nerovnovážnou spinovou dynamikou sú z aplikačného hľadiska vhodné pre kryomagnetické aplikácie. V nanokompozitoch na báze Fe a Gd nanočastíc vnútri matrice sme ako prví preštudovali vnútornú štruktúru pomocou metódy SANS a navrhli sme nový teoretický model, ktorý umožňuje odlišiť nanočastice vnútri pórov od pórovitej matrice. Analýza korelácií štruktúry a vlastností perovskitovej keramiky ukázala, že v prípade jemnej mikroštruktúry je vysoká hodnota dielektrickej permitivity dôsledkom obrovskej hustoty doménových stien a polárnych nanooblastí. Veľký piezelektrický d33 koeficient hrubozrnnej keramiky je výsledkom vysokého stupňa usporiadania domén po polarizácii.

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

During implementation of the project goals, a series of model samples of magnetic composite materials based on 3 d transition elements and dielectric binder, were prepared by chemical and powder metallurgy methods. Many of these methods were newly developed or innovated according to the requirement of experiments. The experiments were carried out on these samples, which results after processing, helped to explanation of the of phase interfaces effects on their electrical, magnetic and mechanical properties. The most important results include contributions to the explanation of magnetic state and magnetization processes of prepared composites under various physical conditions. Their properties have been optimized by modifying of the design of microstructure and processing technology to increase the potential for application the material in electrical engineering and biomedical applications. The experience gained in the investigation of the properties of composites has been generalized with regard to the possibility of targeted influence of their functional properties. In the frame of the project new methods of sample preparation were used including methods for treatment of particle surfaces by mechanical and chemical methods. The team of researchers was one of the first to successfully prepare a composite material with a magnetically active dielectric and experimentally demonstrated its positive effect. The preparation of this material was preceded by an innovative preparation method and detailed research into the behavior of thin fibres and small particles as a binder in the

composite material. Among the remarkable results is the contribution to the explanation of magnetization processes in alternating magnetic field on core losses, which arose from the extension of knowledge concerning dc magnetization processes, described empirically by Steinmetz law. The formulated relation of irreversible permeability with core losses gives the possibility to understand the relationship between permeability and and core losses often used quantity for a practice. Another result is to clarify the role of internal demagnetizing fields on magnetic properties in dc and ac magnetic field. An important result is also the contribution to the explanation of the superspin glass behavior of the cobalt-based nanoparticles, which is directly linked to the existence of a magnetocaloric phenomenon and confirms that nanosystems with non-equilibrium spin dynamics are suitable for cryomagnetic applications. In nanocomposites based on Fe and Gd nanoparticles inside the matrix, we first studied the internal structure using the SANS method and proposed a new theoretical model that allows to distinguish nanoparticles inside the pores from the porous matrix. Analysis of correlations of structure and properties of perovskite ceramics showed that in the case of fine microstructure, the high value of dielectric permittivity is due to the enormous density of domain walls and polar nano-regions. The large piezoelectric d_{33} coefficient of coarse-grained ceramics is the result of a high degree of alignment of domains after polarization.