



Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-17-0625**

Vývoj REBCO supravodičov pre biomedicínske aplikácie

Zodpovedný riešiteľ **Ing. Pavel Diko, DrSc.**

Prijemca **Ústav experimentálnej fyziky SAV, v. v. i.**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Ústav experimentálnej fyziky SAV, v.v.i.
Ústav materiálového výskumu SAV, v.v.i.

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

CAN Superconductors s.r.o., Česká Republika
SJTU Shanghai, Čína
University of Caen Normandy, Francúzsko

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

1. PP-137-2019, P. Hajdová, P. Diko, GdBCOAg homogénny masívny supravodič..
2. PP50041-2022, M. Radušovská, V. Kuchárová, P. Hajdová, P. Diko, Spôsob výroby masívneho monokryštalického GdBCOAg supravodiča.

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

Kapitoly v monografiách

1. P. Diko, K. Zmorayova, L. Vojtkova, V. Antal, V. Kucharova, R. Pagacova, V. Kavečanský, M. Radusovska, M. Rajnak, T. Hlasek, and J. Plechacek, Growth, Microstructure, and Superconducting Properties of Ce Alloyed YBCO Bulk Single-Grain Superconductors, v monografii High-Tc Superconducting Technology Towards Sustainable Development Goals, ISBN 9789814877657 November 25, 2021, 75 pages.
2. Pavel Diko, Kapitola G1.5 Optical Microscopy (pages 71-94) v monografii Handbook of Superconductivity Fundamentals and Materials: Characterization and Applications, Volume Three (2nd Edition), Edited By Cardwell, D.A., Larbaletier, D.C., & Braginski, A., (2022) Pages: 880, CRC Press, Boca Raton, <https://doi.org/10.1201/9781003139638>

Publikácie (Q1 a Q2)

1. Diko, P., Pagáčová, R., Zmorayová, K., Kuchárová, V., Vojtková, L., Antal, V., Kavečanský, V., Influence of addition of nanosize barium cerate on the microstructure and properties of top-seeded melt growth YBCO bulk superconductors, (2020) Journal of the American Ceramic Society, DOI:10.1111/jace.17496. Q1, IF 3.502, 1 citácia.
2. K Zmorayova1 , L Vojtkova, T Hlasek, J Plechacek and P Diko, Influence of CeO2 on microstructure, cracking and trapped field of TSIG YBCO single-grain superconductors, Supercond. Sci. Technol. 33 (2020) 034005 (10pp) <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ab6243>, Q1, IF 3.067, 6 citácií.
3. V Antal, K Zmorayová, M Rajňak , L Vojtkova , T Hlášek, J Plecháček and P Diko,

- Relationship between local microstructure and superconducting properties of commercial YBa₂Cu₃O_{7-δ} bulk, *Supercond. Sci. Technol.* 33 (2020) 044004 (7pp) <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ab714f>, Q1, IF 3.067. 11 citácií.
4. Petra Hajdova, Katarina Zmorayova, Michal Rajnak¹ and Pavel Diko, Inhomogeneity of SmBCO bulk superconductors grown in air, *Supercond. Sci. Technol.* 33 (2020) 034003 (7pp) <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ab627e>, Q1, IF 3.067, 1 citácia.
5. Qian, J., Wan, Y., Huang, S., Yao, X., Zhou, L., Diko, P, Enhancing the homogeneity of YBa₂(Cu_{1-x}Fe_x)₃O_{7-d} single crystal by using an Fe-added Y₂O₃ crucible via top- seeded solution growth, *Journal of Applied Crystallography*, Volume 52, Issue 4, August 2019, Pages 706-711. IF 2.867, Q1
6. Simin Huang, Yanhan Zhu, Jun Qian, Yan Wan, Yiqian Yin, Ligang Zhou, Pavel Diko Veronika Kucharova, Katarina Zmorayova, Young-June Kim, Xin Yao, Wetting and spreading of CaY-Ba-Cu-O solution on Y₂O₃ and CaSZ crucible in growing Y_{1-x}CaxBa₂Cu₃O_{7-δ} single crystal, *J Am Ceram Soc.* 2020;00:1–8. DOI:10.1111/jace.17212, Q1, IF 3.502
7. Yanhan Zhu,^a Yiqian Yin,^a Simin Huang,^a Difan Zhou,^b Veronika Kucharova, Katarina Zmorayova, Pavel Diko and Xin Yao, Enhancing the superconducting performance of YBa₂Cu₃O_{7-δ} bulks with nano-sized and well distributed Y₂BaCuO₅ particles, *CrystEngComm*, 2020, 22, 4116, DOI:0.1039/d0ce00369g, Q1, IF 3.117. 2 citácie.
8. Wan, Y., Wang, G., Li, G., Huang, S., Yin, Y., Zhu, Y., Qian, J., Diko, P., Kucharova, V., Zmorayova, K., Zhou, L., Ma, J., Yao, X. Enhanced stability of floating-zone by modifying its liquid wetting ability and fluidity for YBa₂Cu₃O_{7-δ} crystal growth (2020) *Ceramics International*, DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.10.132 Q1, IF 3.830
9. Shepa, I., Mudra, E., Pavlinak, D., Antal, V., Bednarcik, J., Mikovic, O., Kovalcikova, A., Dusza, J. Surface plasma treatment of the electrospun TiO₂/PVP composite fibers in different atmospheres (2020) *Applied Surface Science*, 523, art. no. 146381, DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.146381, Q1, IF 6.182, 14 citácií, 8 v 22
10. P. Hajdova, I. Shepa, E. Mudra, M. Rajnak, J. Dusza and P. Diko, Effect of TiO₂ Fibers on Properties of Single-Grain Bulk GdBCO Superconductors, Vol. 137 (2020) *ACTA PHYSICA POLONICA A* No. 5. pp 800-8002, DOI: 10.12693/APhysPol. A.137.800, Q3, IF 0.579. 2 citácie.
11. HAJDOVÁ, Petra – DIKO, Pavel – RAJŇÁK, Michal – BEDNARČÍK, Jozef - ANTAL, Vitaliy – KUCHAROVÁ, Veronika – ZMORAYOVÁ, Katarína – RADUŠOVSKÁ, Monika: The influence of CeO₂ addition on microstructure and superconducting properties of GdBCO-Ag single grain bulk superconductors. In: *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 889, 2021, 161697 (8pp). DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161697. Q 1, IF 5.316.
12. Wan, Y., Wang, G., Li, G., Huang, S., Yin, Y., Zhu, Y., Qian, J., Diko, P., Kucharova, V., Zmorayova, K., Zhou, L., Ma, J., Yao, X. Enhanced stability of floating-zone by modifying its liquid wetting ability and fluidity for YBa₂Cu₃O_{7-δ} crystal growth *Ceramics International*, 2021, 47(4), pp. 5495–5501, Q1, IF 4.527.
13. MÚDRA, Erika - SHEPA, Ivan - HRUBOVČÁKOVÁ, Monika - KORIBANICH, Ihor – MEDVEĎ, Dávid - KOVALČÍKOVÁ, Alexandra - VOJTKO, Marek - DUSZA, Ján. Highly wear-resistant alumina/graphene layered and fiber-reinforced composites. In *Wear : an international journal on the science and technology of friction, lubrication and wear*, 2021, vol. 484-485, p. 204026. (2020: 3.892 - IF, Q1, 5 citácií. 2 v 22
14. SHEPA, Ivan - MÚDRA, Erika - DUSZA, Ján. Electrospinning through the prism of time. In *Materials Today Chemistry*, 2021, vol. 21, art. no. 100543. (2020: 8.301 - IF, Q1, 15 citácií. 14 v 22
15. Hajdová, P., Diko, P., Rajňák, M., Bednarcik, J., Antal, V., Kucharová, V., Zmorayová, K. and Radušovská, M. 2022. The influence of CeO₂ addition on microstructure and superconducting Formulár ZS1, strana 10/10 properties of GdBCO-Ag single grain bulk superconductors. *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 8895 January 2022 Article number 161697, DOI 10.1016/j.jallcom.2021.161697. Q 1, IF 6.371.
16. Veronika Kucharova, Pavel Diko, Daniela Volochova, Vitaliy Antal, Michal Lojka Tomas Hlasek, Vladimír Plechacek. Microstructure and superconducting properties of bulk EuBCO-Ag with and without holes, *Journal of the European Ceramic Society*, Volume 42, Issue 14, November 2022, Pages 6533-6541. Q1, IF 6,007,

17. Yanhan Zhu, Katarína Zmorayová, Jinyu He, Yuxuan Zhang, Pavel Diko, Difan Zhou, Xin Yao, An in situ self-assembly strategy for exact-(110)-plane-controlled crystallization of high-performance YBa₂Cu₃O_{7-δ} single grains, *Ceramics International*, Volume 48, Issue 15, 1 August 2022, Pages 22237-22246. Q1, IF 5.532,
18. Monika Radušovská, Pavel Diko, Petra Hajdová, Daniela Volochová, Vitaliy Antal, Tomáš Hlásek, Vladimír Plecháček and Filip Antončík, Bulk GdBCO-Ag superconductors with holes. *Journal of the American Ceramic Society*, 2022. Q1, IF 3.832
19. Qiang Gao, Yanhan Zhu, Xiafan Gu, Jiayi Zhou, Monika Radušovská, Jinyu He, Difan Zhou, Pavel Diko, Xin Yao, Enhanced magnetic properties of YBCO bulk superconductors with tailored structure by a novel seeding assembly, *Ceramics International* 2022, 48(21), pp. 32056–32063. Q1, IF 5.532.
20. Diko, P., Vojtkova, L., Vojtko, M., Rajnak, M., Microstructural Aspects of Infiltration Growth YBCO Bulks with Chemical Pinning, 2019, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(3),6800805. IF 1.692. Q2. 4 Citácie.
21. Hajdova, P., Volochova, D., Rajnak, M., Antal, V., Diko, P., Growth, Microstructure, and Properties of GdBCO-Ag Superconductor, 2019, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(3),8528510. IF 1.692. Q2. 1 citácia.
22. Antal, V., Kavečanský, V., Volochová, D., Diko, P., Thermal reactivity of YBa₂ Cu₃ O_{7-δ} with Al₂ O₃ addition in air atmosphere, *Ceramics International*, 45(2), pp. 2866-2875. IF 3.450, Q1.1citácia.
23. Shepa, I., Mudra, E., Vojtko, M., Milkovic, O., Dankova, Z., Antal. V., Annusova, A., Majkova, E., Dusza, J., Influence of the polymer precursor blend composition on the morphology of the electrospun oxide ceramic fibers, *Results in Physics*, 13 (2019) 102243. IF 3.042, Q2. 6 citácií, 1 v 22
24. Ihor Koribanich, Erika Mudra, Ivan Shepa, Monika Hrubovcakova, Alexandra Kovalcikova, Vladimir Girman, David Pavlinak, Matej Balaz, Jan Dusza: Graphene-coated alumina nano/microfibers as filler for composites, In: *Ceramics International xxx (xxxx) Materials Science Forum*, Article in Press.
25. Erika Mudra, Ihor Koribanich, Monika Hrubovcakova, Ivan Shepa, Alexandra Kovalcikova, Jan Dusza: Preparation and Fracture Analysis of Advanced Layered Composite with Graphene-Coated Alumina Nanofibers, *Materials Science Forum*, vol. xxx, Accepted

Uplatnenie výsledkov projektu

Vyvinuli sme novú technológiu výroby GdBCOAg masívnych monokryštalických supravodičov (MMS) s prídavkom nanokryštalického BaCeO₃, ktorá je chránená patentovou prihláškou. Masívne kryštály pripravené touto technológiou rastú na vzduchu bez nutnosti použiť kontrolovanú atmosféru a prerastú celý výlisok, čím sa ušetrí na drahých vstupných surovinách. Novou technológiou vyrobené GdBCOAg MMS boli poskytnuté firme Cryosoft, s.r.o. Košice, realizátorovi výsledkov projektu, ktorá ich využije pri vývoji biomedicínskych aplikácií v spolupráci s Ústavom lekárskej a klinickej biofyziky, LF UPJŠ Košice.

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

Získali sme nové vedecké poznatky o REBCO systémoch na báze yttria, gadolína, samária a európie z pohľadu výroby masívnych monokryštalických supravodičov (MMS) vhodných pre praktické aplikácie. Ako prví sme ukázali, že pridaný CeO₂ potláča substitúciu bária gadolíniom v kryštálovej mriežke Gd(Ba_{1-y}Gd_y)₂Cu₃O_x zlúčeniny a tým zvyšuje kritickú teplotu prechodu do supravodivého stavu a reguluje koncentráciu nanorozmerových centier uchytávania magnetických tokočiar. Prídavok céru tak môže zvýšiť homogenitu teploty prechodu do supravodivého stavu v rámci masívneho monokryštalického supravodiča a optimalizovať kritickú prúdovú hustotu pri vyšších magnetických poliach. Nájdený efekt otvára nové možnosti optimalizácie supravodivých vlastností LREBCO MMS (LRE - ľahké vzácne zeminy). Nájdený účinok prídavku CeO₂ na supravodivé vlastnosti GdBCOAg masívneho monokryštalického supravodiča je predmetom patentovej prihlášky. Vyvinuli sme novú technológiu výroby GdBCOAg masívnych monokryštalických supravodičov (MMS) s prídavkom nanokryštalického BaCeO₃, ktorá je chránená patentovou prihláškou. Masívne kryštály pripravené touto technológiou rastú na vzduchu bez nutnosti použiť kontrolovanú atmosféru a prerastú celý výlisok, čím sa ušetrí na drahých vstupných

surovinách. Novou technológiou vyrobené GdBCOAg MMS boli poskytnuté firme Cryosoft, s.r.o. Košice, realizátorovi výsledkov projektu, ktorá ich využije pri vývoji biomedicínskych aplikácií v spolupráci s Ústavom lekárskej a klinickej biofyziky, LF UPJŠ Košice. V spolupráci s CAN Superconductors s.r.o. sme ukázali, že GdBCOAg a EuBCOAg MMS zo systémom otvorov pre zväčšenie styčného povrchu vzorky s chladiacim médiom má pozitívny vplyv na zvýšenie zachyteného magnetického poľa a levitačnej sily najmä znížením pórovitosti skúmaných MMS.

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

We gained new scientific knowledge about REBCO systems based on yttrium, gadolinium, samarium and europium from the point of view of the production of bulk monocryalline superconductors suitable for practical applications. We were the first to show that the added CeO₂ suppresses the substitution of barium by gadolinium in the crystal lattice of the Gd(Ba_{1-y}Gd_y)₂Cu₃O_x compound and thus increases the critical transition temperature to the superconducting state and regulates the concentration of nanoscale centers of pinning of magnetic flux lines. The addition of cerium can thus increase the homogeneity of the transition temperature to the superconducting state within a bulk monocryalline superconductor and optimize the critical current density at higher magnetic fields. The found effect opens up new possibilities for optimizing the superconducting properties of LREBCO (LRE - light rare earth) bulk monocryalline superconductors (BMS). The found effect of CeO₂ addition on the superconducting properties of GdBCOAg bulk monocryalline superconductor is the subject of a patent application.

We have developed a new technology for the production of GdBCOAg bulk monocryalline superconductors with the addition of nanocrystalline BaCeO₃, which is protected by a patent application. The bulk crystals prepared by this technology grow in the air without the need to use a controlled atmosphere and will outgrow the entire sample, thus saving on expensive raw materials. GdBCOAg bulk monocryalline superconductors produced with the new technology were provided to Cryosoft, s.r.o. Košice, to the implementer of the project results, which will use them in the development of biomedical applications in cooperation with the Institute of Medical and Clinical Biophysics, LF UPJŠ Košice.

In cooperation with CAN Superconductors s.r.o. we showed that GdBCOAg and EuBCOAg BMS with a system of holes to increase the contact surface of the sample with the cooling medium has a positive effect on increasing the trapped magnetic field and levitation force mainly by reducing the porosity of the examined bulk superconductors.