



Záverečná karta projektu

Názov projektu

Evidenčné číslo projektu

APVV-18-0358

Elektrónové korelácie v neusporiadaných supravodičoch

Zodpovedný riešiteľ **Mgr. Pavol Szabó, CSc.**

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

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Ústav experimentálnej fyziky SAV, v.v.i., Košice

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

Projekt bol riešený v spolupráci s viacerými zahraničnými pracoviskami z Japonska, Francúzska, Rakúska, Belgicka, Dánska, Poľska, Argentíny a USA, ktoré neboli medzi zahraničnými spoluriešiteľskými organizáciami projektu.

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

Podané dve patentové prihlášky v SR:

1. Spôsob výroby ostrých štruktúr alebo polí ostrých štruktúr z chalkogenidových skiel, číslo prihlášky PP50059-2022
2. Spôsob výroby štruktúry vo vrstve chalkogenidového skla a mikroreliefná štruktúra vyrobená týmto spôsobom, číslo prihlášky PUV50086-2022

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

Publikácie v zahraničných časopisoch

Zaslané:

- [1] M. Kuzmiak, M. Kopčík, F. Košuth, V. Vaňo, T. Samuely, V. Latyshev, V. Komanický, J. Kačmarčík, P. Szabó, and P. Samuely, Disorder- and magnetic field-tuned fermionic superconductor-insulator transition in MoN thin films. Transport and STM studies - v recenznom konaní v Physical Review B
- [2] G. Pristáš, G.C. Gruber, M. Orendáč, J. Bačkai, J. Kačmarčík, F.Košuth, S. Gabáni, P.Szabó, C.Mitterer, K. Flachbart, Multiple transition temperature enhancement in superconducting TiNbMoTaW high entropy alloy films through tailored N incorporation – v recenznom konaní Acta Materialia

Publikované:

- [2] G. Pristáš, J. Bačkai, M. Orendáč, S. Gabáni, F. Košuth, M. Kuzmiak, P. Szabó, E. Gažo, R. Franz, S. Hirn, C. Mitterer, S.Vorobiov, and K.Flachbart, Superconductivity in medium- and high-entropy alloy thin films: Impact of thickness and external pressure, Phys. Rev. B 107, 024505 (2023), IF 4.036.
- [4] T. Kawaguchi, V. Komanický, V. Latyshev, W. Cha, E.R. Maxey, R. Harder, T. Ichitsubo,

- and Hoydoo You, Electrochemically Induced Strain Evolution in Pt–Ni Alloy Nanoparticles Observed by Bragg Coherent Diffraction Imaging, *Nano Lett.*, 21, 14, (2021) 5945–5951, IF= 11.62. Nature index
- [5] O. Dobrozhan, M. Balaz, S. Vorobiov, P. Balaz, A. Opanasyuk, Morphological, structural, optical properties and chemical composition of flexible Cu₂ZnSnS₄ thin films by ink-jet printing of polyol-mediated nanocrystals, *JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS* 842, 155883 (2020), IF: 4.65
- [6] M. Žemlička, M. Kopčík, P. Szabó, T. Samuely, J. Kačmarčík, P. Neilinger, M. Grajcar, P. Samuely: Zeeman-driven superconductor-insulator transition in strongly disordered MoC films: Scanning tunneling microscopy and transport studies in a transverse magnetic field, *PHYSICAL REVIEW B* 102, 180508(R) (2020), IF: 4.036, Nature Index
- [7] S. Kern, P. Neilinger, D. Manca, J. Greguš, S. Volkov, and M. Grajcar, Numerical extrapolation method for complex conductivity of disordered metals, *Phys. Rev. B* 103, 134205 (2021), IF 4.036.
- [8] M. Kuzmiak, M. Kopčík, F. Košuth, V. Vaňo, P. Szabó, V. Latyshev, V. Komanický & P. Samuely, Suppressed Superconductivity in Ultrathin Mo₂N Films due to Pair-Breaking at the Interface, *J. Supercond. Nov. Magn.* 35, 1775–1780 (2022).
- [9] G. Zhang, T. Samuely, N. Iwahara, J. Kačmarčík, Ch. Wang, P.W. May, J.K. Jochum, O. Onufriienko, P. Szabó, Sh. Zhou, P. Samuely, V.V. Moshchalkov, L.F. Chibotaru, H.G. Rubahn: Yu-Shiba-Rusinov bands inferromagnetic superconducting diamond *SCIENCE ADVANCES* 6, no. 20, eaaz2536 (2020, IF: 12.5, Nature Index
- [10] B. C. Camargo, P. Gierłowski, M. Kuzmiak, R. Ferreira de Jesus, O. Onufriienko, P. Szabó, Y. Kopelevich: Macroscopic-ranged proximity effect in graphite, *J. Phys.: Cond. Matter* 33 (2021) 495602 (9pp), IF 2.33.
- [11] R. T. Leriche, A. Palacio-Morales, M. Campetella, C. Tresca, S. Sasaki, Ch. Brun, F. Debontridder, P. David, I. Arfaoui, O. Šofranko, T. Samuely, G. Kremer, C. Monney, T. Jaouen, L. Cario, M. Calandra, T. Cren: Misfit Layer Compounds: A Platform for Heavily Doped 2D Transition Metal Dichalcogenides, *Adv. Funct. Mater.* 2020, 2007706, DOI: 10.1002/adfm.202007706, IF: 16.83 Nature Index

Pozvané prednášky na medzinárodných konferenciách:

1. P. Szabó: SIT transition in strongly disordered superconductors. Opportunities for collaborations in the fields of superconductivity and 2D materials (7.6. – 10.6.2023), Bratislava
2. P. Szabó: Interface-induced pair-breaking effects in ultra-thin films. Quantum materials and devices at the nanoscale (7.3. – 9.3.2022), Madrid.
3. P. Szabó: High Spin Polarization in Co₂FeSn Heusler Nanowires studied by Point-Contact Andreev Reflection Spectroscopy, Online Memory seminar of Professor A.N. Omelyanchuk, FTINT Kharkiv, 21.3.2022
4. P. Szabó: Zeeman-driven superconductor-insulator transition in strongly disordered MoC films, SS BP, 11.-18.6.2022, Dubrovnik
5. P. Szabó: The Košice low temperature STM system, Letná škola Fyziky kondenzovaných látok, 5.9. – 9.9.2022, Liptovský Ján
6. M. Grajcar: Superconducting qubits and quantum measurements, Letná škola Fyziky kondenzovaných látok, 5.9. – 9.9.2022, Liptovský Ján
7. P. Samuely, Ising superconductivity in misfit layer compounds, 20. - 24. 6. 2022, Polish Conference on Crystal Growth, Gdansk, Poland
8. M. Grajcar, Observation of Quantum Corrections to Conductivity of Disordered MoC and NbN Films up to Optical Frequencies, online, Quantum Eastern Europe 2022, 5.5.2022, <https://quantumeasterneurope.com/>
9. P. Szabó, Zeeman effects in homogeneous, strongly disordered superconducting MoC thin films, 28. 6. - 2. 7. 2021, workshop Superconducting Hybrids @ Extreme, Štrbské Pleso, Slovakia
10. O. Šofranko, Extremely doped bulk NbSe₂ system in the misfit layered compound (LaSe)_{1.14}(NbSe₂), 28. 6. - 2. 7. 2021, workshop Superconducting Hybrids @ Extreme, Štrbské Pleso, Slovakia
11. Pavol Neilinger: Observation of quantum corrections to conductivity of disordered MoC and NbN films up to optical frequencies, 28. 6. - 2. 7. 2021, workshop Superconducting

Hybrids @ Extreme, Štrbské Pleso, Slovakia

12. Tomáš Samuely: Yu-Shiba-Rusinov bands in hydrogenated boron-doped diamond, 28. 6. - 2. 7. 2021, workshop Superconducting Hybrids @ Extreme, Štrbské Pleso, Slovakia

13. P. Samuely, Zeeman-driven superconductor-insulator transition in strongly disordered MoC films. STM studies in transverse magnetic fields, 23. - 26. 8. 2021, International conference on Research in superconductivity and beyond (Gerasim Eliashberg memorial conference), Chernogolovka, Russia

14. P. Samuely, Quantum corrections to density of states of ultrathin strongly disordered superconducting MoC films, 21. - 27. 10. 2021, 7th International Conference on Superconductivity and Magnetism, Milas-Bodrum, Turkey

15. P. Samuely, „Ising superconductivity in LaSeNbSe₂“, SUPERSTRIPES, Ischia, Taliansko, máj 2019

16. P. Szabó: „Field dependent density of states observed above the upper critical magnetic field in strongly disordered MoC thin films“, 6.-10.10.2019, ELECTRON CORRELATION IN SUPERCONDUCTORS AND NANOSTRUCTURES (ECSN-2019), Odessa, Ukrajina

Uplatnenie výsledkov projektu

Výsledky dosiahnuté v rámci riešenia tohto projektu budú hrať dôležitú úlohu pri vývoji jedno-fotónového detektora, ktorý bude vyvinutý na báze vysoko neusporiadaných supravodivých tenkých filmov MoC, MoN a NbN na Univerzite Komenského (skupina prof. M. Grajcára) a na UPJŠ (skupina Dr. V. Komanického) v rámci riešenia projektu SKQCI. Cieľom tohto projektu je vybudovanie Slovenskej národnej kvantovej komunikačnej infraštruktúry.

V rámci riešenia projektu sme vychovali 5 doktorandov.

Z fyzikálnych tém projektu sme realizovali 3 výukové prednášky pre doktorandov na Letných školách fyziky tuhých látok v Liptovskom Jáne v rokoch 2022 a 2023.

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

Hlavné výsledky projektu podľa stanovených cieľov môžeme zhrnúť do nasledujúcich bodov:

Cieľ 1. Štúdium elektrónových korelácií v neusporiadaných supravodičoch blízko izolačného stavu:

- zistili sme že PSI vo vysoko neusporiadaných tenkých filmoch MoC a MoN sa realizuje fermiónovou cestou tak v prípade rastúcej neusporiadanosti, ako aj v prípade rastúceho magnetického poľa

- identifikovali sme pred nami ešte nikdy nepozorovaný unikátny prejav magneticky závislého Altshulerovho-Aronovovho efektu na vysoko neusporiadaných tenkých filmoch

- ukázali sme, že na tenkých filmoch MoC a NbN kvantové korekcie vo frekvenčnej závislosti vodivosti hrajú dôležitú úlohu aj pri vysokých frekvenciách

- zistili sme, že feromagnetické klastre vodíka na povrchu silne neusporiadaného supravodivého bórom dopovaného diamantu spôsobujú vznik Yu-Shiba-Rusinovových stavov vo vnútri supravodivej energetickej medzery a tie vytvárajú charakteristické nano-ostrovčeky na vodivostných mapách povrchov.

- rozhranie medzi substrátom a ultra-tenkým filmom môže byť zdrojom lokálneho pair-breakingu

Cieľ 2, Vplyv neusporiadania na supravodivosť v tenkých filmoch kovových hydridov:

- zistili sme, že tenké filmy vysoko-entropických zliatín (VEZ) Nb-Ta-Hf-Ti-Zr vykazujú odlišné supravodivé vlastnosti ako keď sú vo forme objemových materiálov

- pri štúdiu vplyvu dusíka na supravodivosť v (TiNbMoTeW)_{Nx} sme pozorovali osem násobné zvýšenie T_c pri optimálnej koncentrácii dusíka X = 0.74. Merania tepelnej kapacity a mikrokontaktovej spektroskopie ukázali, že vzorky sú objemové supravodiče BCS typu.

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

The main results of the project according to the objectives can be summarised in the following points:

Aim 1. Study of electron correlations in disordered superconductors near the insulating

state:

- Superconductor-insulator transition in highly disordered MoC and MoN thin films is realized by the fermionic way both in the case of increasing disorder and in the case of increasing magnetic field
- we have identified a unique manifestation of the magnetically dependent Altshuler-Aronov effect in highly disordered thin films that have never been observed before
- we have shown that on MoC and NbN thin films quantum corrections in the frequency dependence of the conductivity play an important role even at high frequencies
- we have demonstrated that ferromagnetic hydrogen clusters on the surface of strongly disordered superconducting boron-doped diamond give rise to Yu-Shiba-Rusin states inside the superconducting energy gap, and these form characteristic nano-islands on the conductivity maps of the surfaces.
- the interface between the substrate and the ultrathin film can be a source of local pair-breaking centers

Objective 2, Effect of disorder on superconductivity in metal hydride thin films:

- we find that thin films of high-entropy alloys (VEZ) of Nb-Ta-Hf-Ti-Zr exhibit different superconducting properties than in the form of bulk materials
- When studying the effect of nitrogen on the superconductivity in (TiNbMoTeW)_{Nx}, we observed an eightfold increase in T_c at an optimum nitrogen concentration of X = 0.74. Thermal capacitance and microcontact spectroscopy measurements showed that the samples are bulk BCS-type superconductors.