

Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-14-0605****Prechod supravodič - izolant**Zodpovedný riešiteľ **Mgr. Pavol Szabó, CSc.**Príjemca **Ústav experimentálnej fyziky SAV**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Centrum fyziky nízkych teplôt, Ústav experimentálnej fyziky, Slovenská akadémia vied, Košice

Ústav fyzikálnych vied, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Pavla Jozefa Šafárika, Košice
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Univerzity Komenského v Bratislave

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

Centre National de la Recherche Scientifique, Grenoble, Francúzsko

Katholieke Universiteit Leuven, Belgicko

Moscow State University, Moskva, Rusko

Helmholtz-Zentrum Berlin, Nemecko

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

Počas riešenia projektu riešiteľskému kolektívu nebol udelený patent.

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

Najvýznamnejšie publikácie:

[1] P. Szabó, T. Samuely, V. Hašková, J. Kačmarčík, M. Žemlička, M. Grajcar, J. G. Rodrigo, and P. Samuely: Fermionic scenario for the destruction of superconductivity in ultrathin MoC films evidenced by STM measurements, Phys. Rev. B 93, 014505 (2016), IF 3,7

[2] V. Hašková, M. Kopčík, P. Szabó, T. Samuely, J. Kačmarčík, O. Onufrienko, M. Žemlička, P. Neilinger, M. Grajcar, P. Samuely: On the origin of in-gap states in homogeneously disordered ultrathin films. MoC case, Applied Surface Science 461, 143 (2018), IF 5,15

[3] M. Žemlička, P. Neilinger, M. Trgala, M. Rehák, D. Manca, M. Grajcar, P. Szabó, P. Samuely, Š. Gaži, U. Hübner, V. M. Vinokur, E. Il'ichev: Finite quasiparticle lifetime in disordered superconductors, Phys. Rev. B 92 (2015), 224506, IF 3,7

[4] F. Herman and R. Hlubina: Microscopic interpretation of the Dynes formula for the tunneling density of states, Phys. Rev. B 94, 144508 (2016), IF 3,7

[5] F. Herman, R. Hlubina: Electromagnetic properties of impure superconductors with pair-breaking processes, Phys. Rev. B, 96, 014509 (2017), IF 3,7

[6] F. Herman, R. Hlubina: Thermodynamic properties of Dynes superconductors, Phys. Rev. B 97, 014517 (2018), IF 3,7

[7] Gufei Zhang, Tomas Samuely, Jozef Kačmarčík, Evgeny A. Ekimov, Jun Li, Johan

- Vanacken, Pavol Szabó, Junwei Huang, Paulo J. Pereira, Dorin Cerbu, and Victor V. Moshchalkov: Bosonic Anomalies in Boron-Doped Polycrystalline Diamond, *Phys. Rev. App.* 6, 064011 (2016), IF 4,7
- [8] Gufei Zhang, Tomas Samuely, Hongchu Du, Zheng Xu, Liwang Liu, Oleksandr Onufrienko, Paul W. May, Johan Vanacken, Pavol Szabó, Jozef Kačmarčík, Haifeng Yuan, Peter Samuely, Rafal E. Dunin-Borkowski, Johan Hofkens, and Victor V. Moshchalkov: Bosonic Confinement and Coherence in Disordered Nanodiamond Arrays, *ACS Nano*, 11, (2017) 11746, IF 13.9
- [9] Gufei Zhang, Tomas Samuely, Zheng Xu, Johanna K. Jochum, Alexander Volodin, Shengqiang Zhou, Johan Vanacken, Paul W. May, Oleksander Onufrienko, Jozef Kačmarčík, Julian A. Steele, Jun Li, Johan Vanacken, Jiri Vacík, Pavol Szabó, Haifeng Yuan, Maarten B. J. Roeffaers, Dorin Cerbu, Peter Samuely, Johan Hofkens, Victor V. Moshchalkov: Superconducting ferromagnetic nanodiamond, *ACS Nano* 11 (2017), 5358, IF 13.9
- [10] [1] G. Zhang, Y. Zhou, S. Korneychuk, T. Samuely, L. Liu, P.W. May, Z. Xu, O. Onufrienko, X. Zhang, J. Verbeeck, P. Samuely, V.V. Moshchalkov, Z. Yang, and H.-G. Rubahn: Superconductor-insulator transition driven by pressure-tuned intergrain coupling in nanodiamond films, *Phys. Rev. Mat.* 3, 034801 (2019).
- [11] P P. Neilinger, S. N. Shevchenko, J. Bogár, M. Reháč, G. Oelsner, D. S. Karpov, U. Hübner, O. Astafiev, M. Grajcar, and E. Il'ichev: Landau-Zener-Stuckelberg-Majorana lasing in circuit quantum electrodynamics, *Phys. Rev. B* 94, 094519 (2016), IF 3,7
- [12] Z. Pribulová, Z. Medvecká, J. Kačmarčík, V. Komanický, T. Klein, P. Rodiere, F. Levy-Bertrand, B. Michon, C. Marcenat, P. Husaníková, V. Cambel, J. Šoltýs, G. Karapetrov, S. Borisenko, D. Evtushinsky, H. Berger, and P. Samuely: Magnetic and thermodynamic properties of Cu_xTiSe_2 single crystals, *Phys. Rev. B*, 95, 174512 (2017), IF 3,7
- [13] Z. Medvecká, T. Klein, V. Cambel, J. Šoltýs, G. Karapetrov, F. Levy-Bertrand, B. Michon, C. Marcenat, Z. Pribulová, and P. Samuely: Observation of a transverse Meissner effect in Cu_xTiSe_2 single crystals, *Phys. Rev. B* 93, 100501(R) (2016), IF 3,7
- [14] M. Človečko, E. Gažo, M. Skyba, P. Skyba: NMR-like effect on the anisotropic magnetic moment of surface bound states in the topological superfluid He-3-B, *Phys. Rev. B* 99, 104518 (2019), IF 3,7
- [15] S. Gabáni, M. Orendáč, G. Pristaš, E. Gažo, P. Diko, S. Piovarči, V. Glushkov, N. Sluchanko, A. Levchenko, N. Shitsevalova and K. Flachbart: Transport properties of variously doped SmB_6 , *Philosophical Magazine* 96, 3274-3283 (2016).
- [16] Mat. Orendáč, S. Gabáni, G. Pristaš, E. Gažo, P. Diko, P. Farkašovský, A. Levchenko, N. Shitsevalova, K. Flachbart: Isosbestic points in doped SmB_6 as features of universality and property tuning, *Physical Review B* 96, 115101 (2017), IF 3,7
- [17] M. Batkova, I. Batko, S. Gabáni, E. Gažo, E. Konovalova, and V. Filippov: Low temperature resistivity studies of SmB_6 : Observation of two-dimensional variable-range hopping conductivity, *Physica B* 536, 200-202 (2018).
- [18] P. Hlawenka, K. Siemensmeyer, E. Weschke, A. Varykhalov, J. Sánchez-Barriga, N.Y. Shitsevalova, A.V. Dukhnenko, V.B. Filipov, S. Gabáni, K. Flachbart, O. Rader, E.D.L. Rienks: Samarium hexaboride is a trivial surface conductor, *Nature Communications* 9, 517-523 (2018), IF 12,3
- [19] N. E. Sluchanko, A. N. Azarevich, M. A. Anisimov, A. V. Bogach, S. Yu. Gavrilkin, M. I. Gilmanov, V. V. Glushkov, S. V. Demishev, A. L. Khoroshilov, A. V. Dukhnenko, K. V. Mitsen, N. Yu. Shitsevalova, V. B. Filippov, V. V. Voronov, and K. Flachbart: Suppression of superconductivity in $LuxZr_{1-x}B_{12}$: Evidence of static magnetic moments induced by nonmagnetic impurities, *Physical Review B* 93, 085130 (2016), IF 3,7
- [20] N. Sluchanko, V. Glushkov, S. Demishev, A. Azarevich, M. Anisimov, A. Bogach, V. Voronov, S. Gavrilkin, K. Mitsen, A. Kuznetsov, I. Sannikov, N. Shitsevalova, V. Filipov, M. Kondrin, S. Gabáni and K. Flachbart: Lattice instability and enhancement of superconductivity in YB_6 , *Physical Review B* 96, 144501 (2017), IF 3,7
- [21] A.H.A. Hassan, R.J.H. Morris, O.A. Mironov, S. Gabáni, A. Dobbie, and D.R. Leadley: An origin behind Rashba spin splitting within inverted doped sGe heterostructures, *Applied Physics Letters* 110, 042405 (2017), IF 3,5
- [22] J. Kačmarčík, Z. Pribulová, T. Samuely, P. Szabó, V. Cambel, J. Šoltýs, E. Herrera, H. Suderow, A. Correa-Orellana, D. Prabhakaran, and P. Samuely: Single-gap superconductivity in β - Bi_2Pd , *Phys. Rev. B* 93, 144502 (2016), IF 3,7

Pozvané prednášky na medzinárodných konferenciách:

Konferencia Probing superconductivity at nanoscale, Saas Fee, Švajčiarsko, P. Samuely

Konferencia Probing superconductivity at nanoscale, Saas Fee, Švajčiarsko, P. Szabó

Konferencia Superstripes 2016, Ischia, Taliansko, P. Samuely

Konferencia Superstripes 2016, Ischia, Taliansko, Szabó

Konferencia Nanoconfined superconductors, Garmisch-Partenkirchen, Nemecko, P. Samuely

Konferencia maďarskej fyzikálnej spoločnosti, Szeged, Szabó

16th Czech and Slovak Conference on Magnetism, Košice, T. Samuely

Workshop of The Slovak Academy of Sciences with The National University of Singapore, the Nanyang Technological University and The Agency for Science, Technology and Research Singapore. 13.-17.3.2017, Smolenice, P. Samuely

Konferencia Coherent superconducting hybrids and related materials, Les Arcs 1800 (France) March 26-29th, 2018, P. Szabó

Uplatnenie výsledkov projektu

- Výsledky boli publikované v renomovaných vedeckých časopisoch s vysokým impakt faktorom (2 x ACS nano (IF 13,9), 1 x Nature Comm. (IF 12,3), 1 x Appl. Surf. Sci. (IF 5,15), 1 x Phys. Rev. Appl. (IF 4,7), 12 x Phys. Rev. B (IF 3,7), atď.). Za obdobie riešenia projektu boli tieto publikácie citované viac ako 150 krát (viac ako 130 citácií bez samocitácií).

- Odborná vedecká komunita bola priamo oslovená na vedeckých konferenciách formou prednášok a posterových prezentácií. S riešením projektu priamo súvisí 9 vyžiadaných prednášok.

- Výskumná práca riešiteľov projektu bola prezentovaná širokej verejnosti množstvom popularizačných aktivít (5 vedeckých kaviarní, 6 vedeckých festivalov (Noc výskumníkov, Víkend so SAV), Dni otvorených dverí, 12 prednášok pre školy, vystúpenia v rozhlase a televízii, popularizačné články v časopisoch Týždeň, Československý časopis pre fyziku a pod.).

- STM výsledky, dosiahnuté pri štúdiu vplyvu neusporiadanosti na supravodivé vlastnosti v tenkých filmoch MoC boli zabudované do výukového materiálu predmetu Spektroskopické metódy II. pre študentov odboru Fyzikálne inžinierstvo materiálov na FEI TUKE v Košiciach.

- Do riešenia vedeckých problémov projektu bolo zapojených 17 diplomantov a 14 PhD študentov.

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

Pri štúdiu prechodu supravodič-izolátor (PSI) v tenkých filmoch MoC sme ukázali, že bozónový model PSI nie je univerzálny. Naše transportné a nízkoteplotné STM merania jednoznačne ukázali, že PSI sa v tenkých filmoch MoC realizuje fermiónovou cestou [1]. Okrem toho sme pozorovali, že s rastúcou neusporiadanosťou/stenčovaním hrúbky filmov, spektrálne rozmazanie tunelových spektier výrazne rastie [1,2]. Na vysvetlenie tohto efektu naša teoretická skupina vypracovala teóriu Dynesových supravodičov [4-6]. Táto teória môže vysvetliť nárast spektrálneho rozmazania pri stenčovaní filmov ako dôsledok lokálneho magnetizmu, ktoré môže vznikáť na rozhraní medzi substrátom a tenkým filmom. V práci [2] sme ukázali, že MoC vzorky, naprašované simultánne na rôzne substráty vykazujú rôzny prejav magnetického depárovania, čo bolo priamym dôkazom toho, že rozhranie medzi supravodičom a substrátom je lokálnym zdrojom rozbíjania supravodivých Cooperových párov. V práci [3] sme študovali komplexnú vodivosť v neusporiadaných supravodičoch MoC hrúbky 10 nm s konečnou dobou života kvázičastíc a porovnali ju s nameranými hodnotami. Ukázali sme, že experiment môžeme popísať dvojkanálovým modelom supravodivých a normálnych elektrónov v zhode s teóriou Dynesových supravodičov.

V bórom dopovaných diamantových polykryštáloch sme študovali mechanizmus bozónového PSI. Zistili sme, že v izolovaných diamantových nanokryštáloch menších ako mikrometer supravodivá hustota elektrónových stavov nevykazuje koherentné maximá pri energetickej medzere, čo svedčí o prítomnosti uväznených/lokalizovaných bozónových stavov vo vysoko neusporiadanom supravodiči [7,8]. Aplikovaním magnetizačných, transportných a STM experimentov sme ukázali, že vzorky, v ktorých sú polykryštalické zrná bórom dopovaného diamantu pokryté vodíkom vykazujú unikátnu koexistenciu magnetizmu

a supravodivosti [9]. Tiež sme zistili, že rastúci tlak potlačí supravodivosť, a systém postupne prechádza do izolačného stavu [10].

Pri štúdiu vákuových vlastností rezonátorov na báze Sn-whiskerov sme ukázali, že tento typ rezonátorov sa chová ako nelineárny Duffingov oscilátor nezávisle na tom, či je v normálnom alebo supravodivom stave. Vypracovali sme fenomenologický model tohto javu, vrátane matematického modelu, ktorý zjednocuje interpretáciu nameraných dát z Sn-whiskerov pomocou spektroskopickú a impulznú techniku merania. Predbežné výsledky tejto práce sú uverejnené na stránke <https://arxiv.org/pdf/1606.02103.pdf>.

Pri štúdiu interakcie mechanických rezonátorov s povrchom viazanými excitáciami v supratekutom $^3\text{He-B}$ pri ultra nízkyh teplotách sme pozorovali nový jav. Ide o anomálne, na magnetickom poli závislé tlmenie pohybu tohto rezonátora, ktoré sme interpretovali ako jav jadrovej magnetickej rezonancie (JMR) na anizotrópnom magnetickom momente povrchových Andrejovských stavov v topologickom supratekutom $^3\text{He-B}$ [14].

V projekte sme študovali aj silno korelovaný Kondo izolátor SmB_6 . Pomocou ARPES sme študovali elektrónovú pásovú štruktúru systému na synchrotróne BESSY Berlín v unikátnom ^3He refrigerátore až do teploty 1 K, pri ktorej sa podľa teoretických predpovedí očakáva existencia topologických povrchových stavov. Avšak v nameraných energetických spektrách (disperzných reláciách) sme pozorovali len triviálne povrchové stavy nevykazujúce žiadne Diracove kužele [18]. Naše výsledky ukazujú, že systém SmB_6 sa javí ako triviálny povrchový vodič a nie ako topologický izolant. Bol realizované aj STM a STS experimenty na SmB_6 vzorkách pri milikelvinových teplotách. Pozorovali sme topografie povrchov v súlade s predchádzajúcimi ARPES meraniami. Navyše spektrá STS ukázali nízkoenergetickú elektrónovú štruktúru na povrchu SmB_6 , ktorá podporuje triviálny pôvod povrchových stavov a povrchovej vodivosti v tomto systéme (práca bola zaslaná).

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

During our research of superconductor-insulator transition (SIT) in thin films of MoC we have shown that the bosonic model of SIT is not universal. Our transport and low-temperature STM measurements proved unambiguously that SIT in MoC thin films is realized in a fermionic way [1]. Apart from that, we have observed that spectral smearing of tunneling spectra increases significantly with increasing disorder/diminishing of the film thickness [1,2]. Our theoretical group elaborated theory of Dynes superconductors that describes this effect [4-6]. The theory explains increase of the spectral smearing with decreasing film thickness by local magnetism that occurs on the interface between the substrate and the film. In publication [2] we have shown that MoC films sputtered simultaneously on various substrates exhibit different magnetic depairing, as a direct proof that the interface between superconductor and substrate is the local source of pair breaking. In [3] we studied complex conductivity of disordered superconducting MoC thin films (10 nm thick) with finite quasiparticles lifetime and compared it to the measured values. We showed that the experimental data can be described by a two-channel model of superconducting and normal electrons in agreement with the theory of Dynes superconductors.

We studied in details also bosonic mechanism of SIT in polycrystalline samples of boron doped diamonds. We have found that in isolated diamond nanocrystals with the dimensions smaller than 1 micron, the superconducting density of states does not exhibit the coherence peaks at the energies of the energy gap. This indicated existence of confined/localized bosonic state in highly disordered superconductor [7,8]. Via magnetometry, transport and STM experiments we have shown that the samples that contain polycrystalline grains of boron doped diamond covered by hydrogen exhibit a unique coexistence of magnetism and superconductivity [9]. We have also found that increasing pressure suppresses superconductivity and the system gradually turns insulating [10].

During our research of vacuum properties of Sn-based resonators we have shown that this type of resonators behaves like nonlinear Duffing oscillator, both in superconducting and in normal state. We have elaborated a phenomenological model of this effect including a mathematical treatment, that unifies the interpretation of results of spectroscopic and impulse experimental methods applied on Sn whiskers. Preliminary results are published at <https://arxiv.org/pdf/1606.02103.pdf>.

We have studied also the interaction of mechanical resonators with surface-bound excitations in superfluid $^3\text{He-B}$ at ultra-low temperatures and found a new phenomenon. It is

anomalous field independent damping of the resonator movement. We interpreted his phenomenon as nuclear adiabatic magnetic resonance on anisotropic magnetic moment of surface Andreev states in topological superfluid $^3\text{He-B}$ [14].

Within the project we have also studied strongly correlated Kondo insulator SmB_6 . ARPES measurements addressed electronic band structure of the system at synchrotron facility BESSY Berlin in a special ^3He refrigerator down to 1K, the temperature at which existence of the topologic surface state were expected. Our measurements of energy spectra, however, revealed only trivial surface state without any Dirac cones [18]. Our results thus prove that SmB_6 is a trivial surface conductor and not a topological insulator. We realized also STM and STS experiments on SmB_6 samples at milikelvin temperatures. We observed surface topographies in accord with previous ARPES measurements. Moreover, STS spectra revealed low-energy electron structure on SmB_6 surface that confirms trivial origin of the surface states and surface conductivity in this system (the paper is submitted for publication).