



Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-17-0059**

Štúdium procesov vyvolaných elektrónovým zväzkom a elektromagnetickým žiarením v chalkogenidových sklách

Zodpovedný riešiteľ **Dr. Vladimír Komanický, PhD.**

Príjemca **Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach - Prírodovedecká fakulta**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

Uzhhorod National University, Ukraine

V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, Ukraine

Argonne National University, USA

Tohoku University, Japan

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

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

1. Shylenko O., Bilanych V., Feher A., Rizak V., Komanický V. Evaluation of sensitivity of Ge₉As₉Se₈₂ and Ge₁₆As₂₄Se₆₀ thin films to irradiation with electron beam, Journal of Non-crystalline Solids, (2019), 505, 37-42. IF = 3.15
2. Latyshev, V., Shylenko, O., Bilanych, V., Stamenkovic, V., Rizak, V., Feher, A., Kovalcikova, A., Komanický, V. Turning Catalysts on by Light-Induced Stress: When Red Means Go., ChemElectroChem. (2019), 13, 3264. IF = 4.154
3. Latyshev, V., Vorobiov, S., Shylenko, O., Komanický, V., Screening of electrocatalysts for hydrogen evolution reaction using bipolar electrodes fabricated by composition gradient magnetron sputtering. Journal of Electroanalytical Chemistry, (2019), 854, № 113562. IF = 3.82
4. Kawaguchi, T., Cha, W., Latyshev, V., Vorobiov, S., Komanický, V., You, H., Study of the Internal Compositions of Binary Alloy Pd-Rh Nanoparticles by Using Bragg Coherent Diffraction Imaging. Journal of the Korean Physical Society (2019), 75 (7), pp. 528-533. IF = 0.649
5. Kozejova, M., Latyshev, V., Kavecansky, V., You, H., Vorobiov, S., Kovalcikova, A., Komanický, V., Evaluation of hydrogen evolution reaction activity of molybdenum nitride thin

- films on their nitrogen content. *Electrochimica Acta*, (2019) 315, pp. 9-16. IF = 6.215
6. Vorobiov, S., Tomasova, D., Girman, V., You, H., Čižmár, E., Orendáč, M., Komanický, V., Optimization of the magnetocaloric effect in arrays of Ni₃Pt nanomagnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, (2019), 474, pp. 63-69.2. IF = 2.993
7. Shylenko, O., Bilanych, B., Bilanych, V., Latyshev, V., Saksl, K., Molcanova, Z., ... & Komanický, V. Investigation of structural changes in As_xSe_{100-x} amorphous thin films after electron beam irradiation with XAFS, XANES and Kelvin force microscopy. *Applied Surface Science*, (2020), 530, 147266. IF = 6.182
8. Revutska, L., Shylenko, O., Stronski, A., Komanický, V., & Bilanych, V. Electron-beam recording of surface structures on As-S-Se chalcogenide thin films. *Physics and Chemistry of Solid State*, (2020), 21(1), 146-150. IF = 0.59
9. Bilanych, B. V., Shylenko, O., Latyshev, V. M., Feher, A., Bilanych, V. S., Rizak, V. M., & Komanický, V. Interaction of Chalcogenide As₄Se₉₆ Films with Electron Beam When Used as Electronic Resists. *Ukrainian Journal of Physics*, (2020), 65(3), 247-247. IF = 0.59
10. Latyshev, V., You, H., Kovalcikova, A., & Komanický, V. Enhancing catalytic activity of rhodium towards methanol electro-oxidation in both acidic and alkaline media by alloying with iron. *Electrochimica Acta*, (2020). 330, 135178. IF = 6.125
11. Hashim, H., Kozhaev, M., Kapralov, P., Panina, L., Belotelov, V., Víšová, I., ... & Komanický, V. Controlling the Transverse Magneto-Optical Kerr Effect in Cr/NiFe Bilayer Thin Films by Changing the Thicknesses of the Cr Layer. *Nanomaterials*, (2020), 10(2), 256. IF = 4.324
12. Latyshev, V., Vorobiov, S., Shylenko, O., & Komanický, V. Fabrication of combinatorial material libraries by flow cell electrodeposition technique. *Materials Letters*, (2020), 281, 128594. IF = 3.204
13. Vorobiov, S., Stropkai, B., Kožejová, M., Tkach, O., Latyshev, V., Čižmár, E., ... & Komanický, V. Magnetothermal Properties of Mesoscopic System Based on Ni₃Pt Nanoparticle. *Acta Physica Polonica, A*, (2020), 137(5). IF = 0.651
14. Dobrozhan, O., Vorobiov, S., Kurbatov, D., Baláž, M., Kolesnyk, M., Diachenko, O., ... & Opanasyuk, A. (2020). Structural properties and chemical composition of ZnO films deposited onto flexible substrates by spraying polyol mediated nanoinks. *Superlattices and Microstructures*, 140, 106455. IF = 2.36
15. Shpetnyi, I. O., Vorobiov, S. I., Kondrakhova, D. M., Shevchenko, M. S., Duplik, L. V., Panina, L. V., ... & Luciński, T. Correlation between the structural state and magnetoresistive properties of granular Co_xAg_{100-x} alloy thin films. *Vacuum*, (2020), 109329. IF = 2.906
16. Vorobiov, S., Stropkai, B., Kožejová, M., Tkach, O., Latyshev, V., Čižmár, E., ... & Komanický, V. Magnetothermal Properties of Mesoscopic System Based on Ni₃Pt Nanoparticle. *Acta Physica Polonica, A*, (2020), 137(5). IF = 0.651
17. Dobrozhan, O., Pshenychnyi, R., Vorobiov, S., Kurbatov, D., Komanický, V., & Opanasyuk, A. Influence of the thermal annealing on the morphological and structural properties of ZnO films deposited onto polyimide substrates by ink-jet printing. *SN Applied Sciences*, (2020), 2(3), 365. IF = 2.679
18. Kawaguchi T., Komanický V., Latyshev V. et .al Electrochemically Induced Strain Evolution in Pt–Ni Alloy Nanoparticles Observed by Bragg Coherent Diffraction Imaging *Nano Lett.* (2021), 21, 14, 5945 -5951. IF = 11.62
19. Latyshev V., Vorobiov S., Bodnarova R., Shylenko O., Lisnichuk M., Kovalcikova A., Gregor M., Komanický V., IrRe-IrOx electrocatalysts derived from electrochemically oxidized IrRe thin films for efficient acidic oxygen evolution reaction *Electrochimica Acta* (2021), 398,139248. IF = 6.901
20. Vorobiov S., O. Pylypenko, Berezhnyak Yu., Pazukha I., Čižmár E., Orendáč M., Komanický V. Magnetic properties, magnetoresistive, and magnetocaloric effects of AlCrFeCoNiCu thin- film high- entropy alloys prepared by the co- evaporation technique *Applied Physics A* (2021) 127:179 IF = 2.58
21. Lofaj F., Kabátová M., Bureš R. Transfer layer evolution during friction in HIPIMS W–C coatings *Wear* (2021), 486-487, 204123. IF = 3.892
22. F. Lofaj, H.Tanaka, R.Bureš , Y. Sawae, M. Kabátova, K. Fukuda The effect of humidity on friction behavior of hydrogenated HIPIMS W-C: H coatings *Surface & Coatings Technology* (2021), 428, 127899. IF=4.16
23. Bilanych, V. S., Shylenko, O., Lytvyn, P. M., Bilanych, V. V., Rizak, V., Feher, A.,

- Komanicky, V. Electron-induced effects in Ge-Se films studied by kelvin probe force microscopy. *Journal of Non-Crystalline Solids*, (2023), 601, 121964. IF = 3.53
24. Pop, M., Bilanych, V., Komanicky, V., Nebola, I., Solomon, A., Kopčanský, P., Studeniyak, I. P. Materials for optical sensors of x-ray irradiation based on $(\text{GaIn}_{1-x})_2\text{Se}_3$ films. *Ukrainian Journal of Physics*, (2022), 67(9), 684. IF = 0.84
25. Kakherskyi, S. I., Dobrozhan, O. A., Pshenychnyi, R. M., Vorobiov, S. I., Havryliuk, Y. O., Komanicky, V., Plotnikov, S.V. Opanasyuk, A. S. Influence of low-temperature annealing on the structure and chemical composition of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ films deposited on flexible polyimide substrates. *Materials Science*, (2022), 57(4) 572. IF = 4.22
26. Lofaj F., Bures R., Kabatova M., Tanaka H., Sawae Y. Modelling of tribo-chemical reactions in HiPIMS W-C:H coatings during friction in different environments. *Surface & Coatings Technology*, (2022), 434, 128238. IF = 4.82
27. Lofaj F., Bures R., Kabatova M., Tanaka H., Sawae Y. Tribochemistry of transfer layer evolution during friction in HiPIMS W-C and W-C:H coatings in humid oxidizing and dry inert atmospheres. *Coatings*, (2022), 12, 493. IF = 3.12

Uplatnenie výsledkov projektu

Zistili sme, že veľmi citlivé sklá je možné využiť ako rezisty pre pozitívnu a negatívnu litografiu elektrónovým zväzkom. Boli pripravené nové štruktúry ktoré je možné využiť pri príprave ochranných známok. Ak príklad boli pripravené logá pre Uzhhorod National University. Tieto výsledky boli uverejnené v prácach (Revutska, L., et al. Electron-beam recording of surface structures on As-S-Se chalcogenide thin films. *Physics and Chemistry of Solid State*, (2020), 21(1), 146-150. IF = 0.59; Bilanych B. V. et al. Interaction of Chalcogenide As_4Se_6 Films with Electron Beam When Used as Electronic Resists. *Ukrainian Journal of Physics*, (2020), 65(3), 247-247. IF = 0.59)

Objavili sme nové systémy ktoré je možné využiť na prípravu štruktúr s tzv. vysokým aspect ratio pre aplikácia v nanoemiteroch a výrobe sônd pre rastrovacie sondové mikroskopie. Tento objav vyústil do patentovej prihlášky (Komanicky V., Shylenko O., Latyshev V., Feher A., Bilanych V., Rizak V., Stronski A., Revutska L. Spôsob výroby ostrých štruktúr alebo polí ostrých štruktúr z chalkogenidových skiel, číslo prihlášky PP50059-2022).

Ďalej sme objavili, že ak sa na povrch chalkogenidovej tenkej vrstvy nanesie klasický rezist a takáto dvojvrstva sa ožiari elektrónmi, je možné v jednom kroku modifikovať nielen klasický rezist ale aj vrstvu chalkogenidu pod ním. Túto vlastnosť je možné využiť v technológiách pre prípravu komponentov pre infračervenú mikrooptiku a nanooptiku. Predmetný objav vyústil do podania prihlášky úžitkového vzoru (Komanicky V., Shylenko O., Latyshev V., Vorobiov S. Spôsob výroby štruktúry vo vrstve chalkogenidového skla a mikoreliéfna štruktúra vyrobená týmto spôsobom, číslo prihlášky PUV50086-2022)

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

Objavili sme, že elektrická vodivosť skla má veľmi významnú úlohu v citlivosti na ožiarenie elektrónovým zväzkom. (O. Shylenko, et al. Evaluation of sensitivity of $\text{Ge}_9\text{As}_9\text{Se}_{82}$ and $\text{Ge}_{16}\text{As}_{24}\text{Se}_{60}$ thin films to irradiation with electron beam, *Journal of Non-crystalline Solids*, 2019, 505, 37-42. IF = 3.15) Analýza dát získaných na synchrotróne metódami XAFS a XANES poukazuje na to, že dochádza ku kumulácii a perzistencii náboja vo vzorkách po ožiarení elektrónmi a v systémoch bohatých na selén je deponovaný náboj kumulovaný na arzéne. Bol navrhnutý mikroskopický model. (Shylenko et al. *Applied Surface Science*, 2020, 530, 147266. IF = 6.182) Zistili sme tiež, že presun materiálu počas interakcie s elektrónovým zväzkom možno korelovať s intenzitou a gradientom elektrického poľa, ktoré vzniká pri kumulácii náboja v tenkých vrstvách ChG skiel. Mapovali sme elektrický povrchový potenciál pomocou KFM mikroskopie a boli vypracované mikroskopické modely zobrazujúce presun hmoty v závislosti od potenciálu. (Bilanych, V. S Electron-induced effects in Ge-Se films studied by kelvin probe force microscopy. *Journal of Non-Crystalline Solids*, (2023), 601, 121964. IF = 3.53.) Boli realizované experimenty, pri ktorých sme ožiarovali sklá červeným a zeleným laserom, ktoré boli pokryté tenkými vrstvami kovov s katalytickými vlastnosťami. Zistili sme že je možné insitu generovať pnutie vo vrchnej kovovej vrstve ožiarení vrstvy chalkogenidu pod ňou. Zistili sme, že takto je možné zvýšiť rýchlosť niektorých katalytických reakcií. (Latyshev et al. Turning Catalysts on by Light-Induced Stress: When Red Means Go. *ChemElectroChem*. 2019, 13, 3264. IF = 4.154)V

nádvážnosti na objavený efekt sme študovali aj veľkosť pnutia v nanočasticiach kovov pomocou pokročilých mikroskopických metodík na synchrotróne. (T. Kawaguchi et al. Electrochemically Induced Strain Evolution in Pt–Ni Alloy Nanoparticles Observed by Bragg Coherent Diffraction Imaging Nano Lett. (2021), 21, 14, 5945 -5951. IF = 11.62). Zistili sme, že veľmi citlivé sklá je možné využiť ako rezisty pre pozitívnu a negatívnu litografiu elektrónovým zväzkom. Boli pripravené nové štruktúry ktoré je možné využiť pri príprave ochranných známok. Objavili sme nové systémy ktoré je možné využiť na prípravu štruktúr s tzv. vysokým aspect ratio pre aplikácia v nanoemiteroch a výrobe sond pre rastrovacie sondové mikroskopie. (Komanicky V., Shylenko O., Latyshev V., Feher A., Bilanych V., Rizak V., Stronski A., Revutska L. Spôsob výroby ostrých štruktúr alebo polí ostrých štruktúr z chalkogenidových skiel, číslo prihlášky PP50059-2022). Ďalej sme objavili, že ak sa na povrch chalkogenidovej tenkej vrstvy naniesie klasický rezist a takáto dvojvrstva sa ožiarí elektrónmi, je možné v jednom kroku modifikovať nielen klasický rezist ale aj vrstvu chalkogenidu pod ním. Túto vlastnosť je možné využiť v technológiách pre prípravu komponentov pre infračervenú mikrooptiku a nanooptiku. Predmetný objav vyústil do podania prihlášky úžitkového vzoru (Komanicky V., Shylenko O., Latyshev V., Vorobiov S. Spôsob výroby štruktúry vo vrstve chalkogenidového skla a mikroreliefa štruktúra vyrobená týmto spôsobom, číslo prihlášky PUV50086-2022).

V rámci projektu bolo publikovaných 54 pôvodných prác z ktorých 27 vyšlo v zahraničných časopisoch indexovaných v current contents databázach a 27 prác v recenzovaných a nerecezoovaných časopisoch a zborníkoch doma a zahraničí. Na tieto práce bolo do dnes zaznamenaných 78 ohlasov. Boli podané dve prihlášky na Slovenský patentový úrad. Pre porovnanie sme v projekte pôvodne plánovali 8 prác v zahraničných časopisoch indexovaných v current contents databázach, 8 prác v recenzovaných a nerecezoovaných časopisoch a zborníkoch doma a zahraničí a 0 citácií.

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

We have found that the electrical conductivity of a glass plays a very important role in the sensitivity to electron beam irradiation. (O. Shylenko, et al. Evaluation of sensitivity of Ge₉As₉Se₈₂ and Ge₁₆As₂₄Se₆₀ thin films to irradiation with electron beam, Journal of Non-crystalline Solids, 2019, 505, 37-42. IF = 3.15) Analysis of data obtained at the synchrotron using XAFS and XANES indicates that there is charge accumulation and persistence in the samples after electron irradiation, and the deposited charge is accumulated on arsenic in selenium-rich systems. A microscopic model has been developed. (Shylenko et al. Applied Surface Science, 2020, 530, 147266. IF = 6.182). We have also found that the movement of the material during the interaction with the electron beam can be correlated with the intensity and gradient of the electric field which arises during the accumulation of charge in thin layers of ChG glasses. We have mapped the electrical surface potential using KFM microscopy and microscopic models showing mass transfer as a function of surface potential have been developed. (Bilanych, V. S Electron-induced effects in Ge-Se films studied by kelvin probe force microscopy. Journal of Non-Crystalline Solids, (2023), 601, 121964. IF = 3.53.). We performed experiments in which glasses, covered with thin layers of metals with catalytic properties, were irradiated with red and green lasers. We have found that it is possible to generate strain in the top metal layer in-situ by irradiating the chalcogenide layer below it. In such a way the possibility to increase the rate of some catalytic reactions has been demonstrated. (Latyshev et al. Turning Catalysts on by Light-Induced Stress: When Red Means Go. ChemElectroChem. 2019, 13, 3264. IF = 4.154). Following the discovered effect, we have also studied the amount of strain generated in metal nanoparticles using advanced microscopic methods of the synchrotron. (T. Kawaguchi et al. Electrochemically Induced Strain Evolution in Pt–Ni Alloy Nanoparticles Observed by Bragg Coherent Diffraction Imaging Nano Lett. (2021), 21, 14, 5945 -5951. IF = 11.62). We have found that very sensitive glasses can be used as resists for positive and negative electron beam lithography. New structures have been prepared that can be potentially used in the preparation of watermarks. We have discovered new systems that can be used to prepare structures with so-called high aspect ratio for applications in nanoemitters and production of probes for scanning probe microscopy (Komanicky V., Shylenko O., Latyshev V., Feher A., Bilanych V., Rizak V., Stronski A., Revutska L. Spôsob výroby ostrých štruktúr alebo polí ostrých štruktúr z chalkogenidových

skiel, číslo prihlášky PP50059-2022). Furthermore, we have found that if a classic resist is placed onto the surface of a chalcogenide thin layer and such double layer is irradiated with electrons, it is possible to modify not only the classic resist but also the chalcogenide layer below it in one step. This feature can be used in technologies for the preparation of components for infrared micro-optics and nano-optics. The discovery resulted in the filing of a utility model application (Komanický V., Shylenko O., Latyshev V., Vorobiov S. Spôsob výroby štruktúry vo vrstve chalkogenidového skla a mikroreliefná štruktúra vyrobená týmto spôsobom, číslo prihlášky PUV50086-2022).

54 original works were published within the project, 27 of which were published in foreign journals indexed in current contents database and 27 works in peer-reviewed and non-peer-reviewed journals and anthologies at home and abroad. To date, 78 citations have been recorded for these works. Two applications were submitted to the Slovak Patent Office. For comparison, we originally planned within the project to publish 8 papers in foreign journals indexed in current contents database, 8 papers in peer-reviewed and non-peer-reviewed journals and anthologies at home and abroad, and 0 citations.