

Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-15-0152****Výskum fyzikálnych vlastností a kinetiky formovania vrstiev čierneho kremíka**Zodpovedný riešiteľ **RNDr. Emil Pinčík, CSc.**Príjemca **Fyzikálny ústav SAV****Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený**Fyzikálny ústav SAV v Bratislave
Slovenská technická univerzita v Bratislave - Fakulta elektrotechniky a informatiky
Žilinská univerzita v Žiline - Elektrotechnická fakulta
Univerzita Komenského v Bratislave / LF a FMFI /**Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení**Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka Univerzity, Japan
Tokio University, Japonsko
Helmholtz Zentrum Berlin
VUT Brno, Česká republika
Delft University, Holandsko
Wroclaw University of Technology, Poland
University of Limerick, Limerick, Ireland
Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Serbia
Nanjing University, China
Výskumné centrum Nové technológie Západočeskej univerzity v Plzni, Česká republika**Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu**

1. Číslo patentovej prihlášky : 132-2017
Pôvodca, prihlasovateľ: RNDr. Pinčík Emil, CSc, RNDr. Brunner Róbert, CSc.
Názov: Spôsob prípravy antireflexnej vrstvy na kremíkovej doske vodivosti ntypu elektrochemickým opracovaním.
2. Udelený patent
Číslo patentu: 288652
Pôvodca, prihlasovateľ: RNDr. Brunner Róbert, CSc.
Názov: Zariadenie na meranie hĺbkového profilu fotoluminiscenčného signálu v tenkovrstvových polovodičových štruktúrach

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače1. Peter Cendula, Prangya P. Sahoo, Gabriel Cibira and Pavel Simon: Analytical Model for Photocurrent–Voltage and Impedance Response of Illuminated Semiconductor/Electrolyte Interface under Small Voltage Bias, The Journal of Physical Chemistry C 2020, 124, 2, 1269-1276, Publication Date: December 17, 2019, p. S1 - S13,
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b07244>

2. Jurečka, Stanislav , Grayli Korpi, Alireza, Ťálu, Štefan, Bramowicz, Mirosław, Arman, Ali, Kulesza, Sławomir, Pszczolkowski, Bartosz, Mardani, Mohsen, Luna, Carlos, Balashabadi, Parvin, Rezaee, Sahar, Gopikishan, Sabavath: Minkowski functional characterization and fractal analysis of surfaces of titanium nitride films, *Materials Research Express*, Vol.6, No.8, ISSN: 2053-1591, <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab26be>
3. S. Jurečka , B. Astinchap , R. Moradian , T. Namdari , Ş. Ťálu: Prepared σ -MnO₂ thin films by chemical bath deposition methods and study of its optical and microstructure properties, *Optical and Quantum Electronics*, volume 51, Article number: 170 (2019), ISSN: 0306-8919, <https://doi.org/10.1007/s11082-019-1891-z>
4. J. Müllerová, P. Šutta, P. Calta, M. Netřvalová, R. Medlín: Optical characterization of intrinsic PECVD deposited a-Si:H/a-SiN:H multilayers considered as solar cell absorbers. Submitted to *Materials Science and Engineering B*, 2019 ADC E. Pincik and T. Matsumoto: Progress in applied surface, interface and thin film science 2017 Publikované: *Applied Surface Science*, Volume 461, 15 December 2018, str. 1-2, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.07.214>
5. M. Kopani , M. Mikula , D. Kosnac , P. Vojtek , J. Gregus , E. Vavrinsky , M. Jergel and E. Pincik: Effect of etching time on structure of p-type porous silicon Publikované: *Applied Surface Science*, Volume 461, 15 December 2018, str. 44-47, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.04.228>
6. J. Müllerová , L'. Scholtz , J. Ďurišová , E. Pinčík , M. Solanská and D. Pudiš: Angle and polarization resolved antireflection properties of black silicon prepared by electrochemical etching supported by external electric field Publikované: *Applied Surface Science*, Volume 461, 15 December 2018, str. 182-189, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.05.179>
7. Mikolasek , K. Frohlich , K. Husekova , J. Racko , V. Rehacek , F. Chymo , M. Tapajna and L. Harmatha: Silicon based MIS photoanode for water oxidation: A comparison of RuO₂ and Ni Schottky contacts Publikované: *Applied Surface Science*, Volume 461, 15 December 2018, str. 48-53, ISSN 0169-4332. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.04.234>
8. M. Mikula , Z. Beková , M. Hvojník , M. Hatala , M. Mikolášek , J. Müllerová , M. Jergel and P. Gemeiner: Differently sintered TiO_x hole blocking layers for solution processed solar cells Publikované: *Applied Surface Science*, Volume 461, 15 December 2018, str. 54-60, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.05.180>
9. S. Jurečka , K. Imamura , T. Matsumoto and H. Kobayashi: Investigation of morphological and optical properties of nanostructured layers formed by the SSCT etching of silicon Publikované: *Applied Surface Science*, Volume 461, 15 December 2018, str. 72-77, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.08.099>
10. G. Cibira: PV cell electrical parameters dynamic modelling based on double diode five parameter reduced forms Publikované: *Applied Surface Science*, Volume 461, 15 December 2018, str. 98-101, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.05.195>
11. G. Cibira: Relations among photovoltaic cell electrical parameters Publikované: *Applied Surface Science*, Volume 461, 15 December 2018, str. 102-107, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.05.194>
12. M. Mikolasek , P. Ondrejka , F. Chymo , P. Novak , M. Pavuk , I. Novotny , V. Rehacek , J. Breza , A. Vincze and I. Hotovy: Potentiostatic electrodeposition under light irradiation for preparation of highly photoactive Cu₂O for water splitting applications Publikované: *Applied Surface Science*, Volume 461, 15 December 2018, str. 196-201, ISSN 0169-4332. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.05.225>
13. L'. Scholtz , P. Šutta , P. Calta , P. Novák , M. Solanská and J. Müllerová: Investigation of barium titanate thin films as simple antireflection coatings for solar cells Publikované: *Applied Surface Science*, Volume 461, 15 December 2018, str. 249-254, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.06.226>
14. Z. Dostál, L. Ladányi: Demands on energy storage for renewable power sources. *Journal of Energy Storage*, 18, 2018, 250 – 255, <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.05.003>
15. KADLEČÍKOVÁ, Magdaléna - BREZA, Juraj - VANČO, Ľubomír - MIKOLÁŠEK, Mirosław - HUBEŇÁK, Michal - RACKO, Juraj - GREGUŠ, Ján. Raman spectroscopy

- of porous silicon substrates. In *Optik*. Vol. 174, (2018), s. 347-353. ISSN 0030-4026, <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.08.084>
16. Michaela Solanska, Lubomir Scholtz, Libor Ladanyi, Jarmila Mullerova: Analyses of Resource Reservation Schemes for Optical Burst Switching Networks, *Proc. SPIE*, 10603, 1060311 (1 December 2017); <https://doi.org/10.1117/12.2292701>
17. Lubomir Scholtz, Michaela Solanska, Libor Ladanyi, Jarmila Mullerova: Power requirements reducing of FBG based all-optical switching, *Proc. SPIE*, 10603, 1060310 (1 December 2017); <https://doi.org/10.1117/12.2292536>
18. Jurečka Stanislav, Imamura Kentaro, Matsumoto Taketoshi, Kobayashi Hikaru: Reflectance analysis of porosity gradient in nanostructured silicon layers, *Proc. SPIE*, 10603, 106031B (1 December 2017); <https://doi.org/10.1117/12.2292723>
19. Emil Pinčík: Preface – Progress in Applied Surface, Interface and Thin Film Science 2015 Solar Renewable Energy News IV, November 23–26, 2015, Florence, Italy, in *Applied Surface Science* 395 (2017), pp. 1- 2, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.11.121>
20. Stanislav Jurečka, Taketoshi Matsumoto, Kentaro Imamura, Hikaru Kobayashi: Multifractal analysis and optical properties of nanostructured silicon layers, *Applied Surface Science*, 395(2017), pp. 150-156 doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.04.059
21. E. Pincik, R. Brunner, H. Kobayashi, M. Mikula, M. Kučera, P. Švec Jr., J. Greguš, P. Vojtek, Z. Zábudlá, K. Imamura, M. Zahoran: About the optical properties of oxidized black silicon structures, in *Applied Surface Science* 395 (2017), pp. 185-194, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.05.035>
22. Z. Dostál, M. Solanská: Calculation of accumulation unit for renewable energy source system, *Journal of Energy Storage* 14 (2017), pp. 410-415, <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2017.05.016>
23. E. Pincik, Progress in Applied Surface, Interface and Thin Film Science – Solar Renewable Energy News (SURFINT-SREN IV) – PREFACE, *Applied Surface Science*, 395 (2017) 1-2, <http://www.sciencedirect.com/science/journal/01694332/395>
24. E. Pincik, R. Brunner, H. Kobayashi, M. Mikula, M. Kučera, P. Švec Jr., J. Greguš, P. Vojtek, Z. Zábudlá, K. Imamura, M. Zahoran: About the optical properties of oxidized black silicon structures. *Applied Surface Science* 395 (2017) 185–194, <http://www.sciencedirect.com/science/journal/01694332/395>

Uplatnenie výsledkov projektu

Všetky výsledky sú použiteľné vo fotovoltaike pri vývoji veľkých (až do 7 inch²) slnečných článkov p-n Si s účinnosťou presahujúcou 20%. Použitá technológia aj výsledky sú aplikovateľné aj na veľkoplošných slnečných článkoch pripravených na polykryštalických Si doskách.

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

Jedným z najdôležitejších výsledkov projektu je kvalitatívne a kvantitatívne sledovanie kontaminácie poréznych Si štruktúr formovaných katalytickým chemickým leptaním pomocou DLTS a CV. Väčšina vzoriek bola pripravovaná v kooperácii s laboratóriami ISIR Osaka University v Japonsku. Medzi hlavné kontaminanty patria: Pt, Au, Zn, Fe a Ti. Boli určené elektrické parametre odpovedajúcich hlbokých hladín, ktoré boli identifikované v odpovedajúcich MOS štruktúrach. Napriek tomu sa porézne Si úspešne využívajú pri formovaní vysoko-účinných pn Si slnečných článkov s konverznou účinnosťou nad 20%. Poznatky umožňujú ďalej optimalizovať prípravu poréznych vrstiev pre viaceré aplikácie v priemysle okrem ďalšieho navyšovania konverznej účinnosti slnečných článkov. Projekt skúmal najmä optické vlastnosti poréznych Si štruktúr pripravovaných na objemovom c-Si ako aj amorfných jedno- a viac-vrstvových štruktúr deponovaných na sklo. Prebiehal výskum pasivácie defektných stavov pomocou kyanidizačných HCN a KCN roztokov. Pokročilo sa pri spracovaní a analýze fotoluminiscenčných vlastností poréznych Si štruktúr. Väčšina z nich obsahuje okrem dominantného fotoluminiscenčného signálu aj interferenčný superponovaný signál, ktorý často máva veľmi nízku intenzitu. Teoretickou analýzou interferenčného signálu sa dajú získať podstatné informácie o fyzikálnych vlastnostiach vrstiev na ktorých interferenčný jav vzniká a na ktorých súčasne sledujeme aj

fotoluminiscenciu. Bolo skúmané aj mikroštruktúrne vlastnosti poréznych nanokryštalických Si vrstiev a to najmä pomocou elektrónovej mikroskopie, SPM a Ramanovského rozptylu. Experimentálne výsledky boli analyzované pomocou štatistických, Abbott-Firestone, Fourier a multifraktálnych metód. Boli hľadané korelácie medzi drsnosťou povrchov a fraktalitou skúmaných štruktúr. Považujeme hlavné ciele projektu za splnené.

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

One of the most important results of the project is qualitative and quantitative research of contamination of porous Si structures prepared by catalytic chemical etching by DLTS and CV. The most of samples were prepared in cooperation with ISIR Osaka University in Japan. Pt, Au, Zn, Fe and Ti belong among dominant metal contaminants. There were determined electrical parameters of the corresponding deep levels identified on the corresponding structures. Nevertheless the porous Si is successfully used at the formation of high efficiency p-n Si solar cells with conversion efficiency above 20%. Obtained results enabled additional optimization of the porous Si preparation process for more industrial applications including the increase of actual solar cell efficiency. There were investigated mainly optical properties of the porous structures prepared on the bulk c-Si as well as properties of the amorphous one- and more-layers structures deposited on the glass. Passivation of defect states by HCN and KCN solutions was investigated also. We have developed treatment and analysis of photoluminescence signals recorded on porous Si. The most of recorded signals contain both dominant and interference ones, respectively. Interference signals have usually very low intensity. By their theoretical analysis you can obtain information about physical properties of luminescent porous Si layers. We have investigated also microstructural properties of porous nano-crystalline Si by electron microscopy, SPM and by Raman scattering. Experimental data were analyzed by statistical, Abbott-Firestone, Fourier and multifractal methods. There was investigated correlation between roughness and fractality of the porous structures. Our stating is: Main aims of the project were fulfilled.