

Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-17-0169****Nanotechnológia prípravy MIS fotoelektród s oxidmi kovov pre systémy na výrobu solárnych palív**Zodpovedný riešiteľ **Ing. Miroslav Mikolášek, PhD.**Príjemca **Slovenská technická univerzita v Bratislave - Fakulta elektrotechniky a informatiky**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Zodpovedným riešiteľom projektu je: Slovenská technická univerzita v Bratislave - Fakulta elektrotechniky a informatiky

Spoluriešiteľské organizácie sú: Slovenská akadémia vied - Centrum pre využitie pokročilých materiálov a Centrum vedecko-technických informácií SR

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

Fridrich Alexander University, Erlangen, Nemecko, spolupráca pri návrhu patentu Atomic Layer Process Printer.

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

Európska patentová prihláška:

Názov: Atomic Layer Process Printer

Pôvodca: Ing. Ivan Kunderata, Ing. Karol Frohlich, DrSc.

Číslo patentovej prihlášky: 19178248,1-1103

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

Výsledky boli publikované v 12 karentovaných publikáciách:

1. SAHOO, Prangya - MIKOLÁŠEK, Miroslav - HUŠEKOVÁ, Kristína - DOBROČKA, Edmund - ŠOLTÝS, Ján - ONDREJKA, Peter - KEMÉNY, Martin - HARMATHA, Ladislav - MIČUŠÍK, Matej - FRÖHLICH, Karol. Si-based metal-insulator-semiconductor structures with RuO₂-(IrO₂) films for photoelectrochemical water oxidation. In ACS Applied Energy Materials. Vol. 4, Iss, 10 (2021), s. 11162-11172.

2. MIKOLÁŠEK, Miroslav - ONDREJKA, Peter - CHYMO, Filip - NOVÁK, Patrik - PAVÚK, Milan - NOVOTNÝ, Ivan - ŘEHÁČEK, Vlastimil - BREZA, Juraj - VINCZE, Andrej - HOTOVÝ, Ivan. Potentiostatic electrodeposition under light irradiation for preparation of highly photoactive Cu₂O for water splitting applications. In Applied Surface Science. Vol. 461, (2018), s. 196-201.

3. MIKOLÁŠEK, Miroslav - FRÖHLICH, Karol - HUŠEKOVÁ, Kristína - RACKO, Juraj - ŘEHÁČEK, Vlastimil - CHYMO, Filip - ŤAPAJNA, Milan - HARMATHA, Ladislav. Silicon based MIS photoanode for water oxidation: A comparison of RuO₂ and Ni Schottky contacts. In Applied Surface Science. Vol. 461, (2018), s. 48-53

4. HOTOVÝ, Ivan - SPIESS, Lothar - MIKOLÁŠEK, Miroslav - KOSTIČ, Ivan - ROMANUS,

- Henry. Structural and morphological evaluation of layered WS₂ thin films. In Vacuum. Vol. 179, (2020), Art. no. 109570
5. HOTOVÝ, Ivan - SPIESS, Lothar - MIKOLÁŠEK, Miroslav - KOSTIČ, Ivan - SOJKOVÁ, Michaela - ROMANUS, Henry - HULMAN, Martin - BÚC, Dalibor - ŘEHÁČEK, Vlastimil. Layered WS₂ thin films prepared by sulfurization of sputtered W films. In Applied Surface Science. Vol. 544, (2021), Art. no. 148719
6. RACKO, Juraj - LALINSKÝ, Tibor - MIKOLÁŠEK, Miroslav - BENKO, Peter - THIELE, Sebastian - SCHWIERZ, Frank - BREZA, Juraj. Vertical current transport processes in MOS-HEMT heterostructures. In Applied Surface Science. Vol. 527, (2020), Art. no. 146605
7. ŘEHÁČEK, Vlastimil - HOTOVÝ, Ivan - MARTON, Marián - MIKOLÁŠEK, Miroslav - MICHNIAK, Pavol - VINCZE, Andrej - KROMKA, Alexander - VOJS, Marian. Voltammetric characterization of boron-doped diamond electrodes for electroanalytical applications. In Journal of Electroanalytical Chemistry. Vol. 862, (2020), Art. no. 114020
8. BRUNCKO, Jaroslav - MICHALKA, Miroslav - KOVÁČ, Jaroslav jr. - VINCZE, Andrej. A low-temperature limit for growth of ZnO nanowires by using of laser ablation processes. In Applied Physics A. Vol. 126, Iss. 4 (2020), Art. no. 305
9. DAWIDOWSKI, Wojciech - SCIANA, Beata - BIELAK, Katarzyna - MIKOLÁŠEK, Miroslav - DROBNÝ, Jakub - SERAFIŃCZUK, Jarosław - LOMBARDERO, Iván - RADZIEWICZ, Damian - KIJASZEK, Wojciech - KÓSA, Árpád - FLOROVIČ, Martin - KOVÁČ, Jaroslav jr. - ALGORA, Carlos - STUHLÍKOVÁ, Ľubica. Analysis of current transport mechanism in AP-MOVPE grown GaAsN p-i-n solar cell. In Energies. Vol. 14, Iss. 15 (2021), Art. no. 4651
10. KADLEČÍKOVÁ, Magdaléna - BREZA, Juraj - VANČO, Ľubomír - MIKOLÁŠEK, Miroslav - HUBEŇÁK, Michal - RACKO, Juraj - GREGUŠ, Ján. Raman spectroscopy of porous silicon substrates. In Optik. Vol. 174, (2018), s. 347-353.
11. MOŠKOVÁ, Antónia - MOŠKO, Martin - PRECNER, Marián - MIKOLÁŠEK, Miroslav - ROŠOVÁ, Alica - MIČUŠÍK, Matej - ŠTRBÍK, Vladimír - ŠOLTÝS, Ján - GUCMANN, Filip - DOBROČKA, Edmund - FRÖHLICH, Karol. Doping efficiency and electron transport in Al-doped ZnO films grown by atomic layer deposition. In Journal of Applied Physics. Vol. 130, iss. 3 (2021), Art. no. 035106
12. PERNÝ, Milan - ŠÁLY, Vladimír - ĎURMAN, Vladimír - PACKA, Juraj - KURCZ, János - MIKOLÁŠEK, Miroslav - HURAN, Jozef. Electrical response of silicon heterojunction solar cells with transparent conductive oxide antireflective coating. In Acta Physica Polonica A. Vol. 139, No. 1 (2021), s. 39-45.

Uplatnenie výsledkov projektu

V rámci projektu boli optimalizované technológie rastu tenkých dielektrických vrstiev TiO₂, SiO₂ a katalytických vrstiev RuO₂, RuO₂-IrO₂, NiO a vrstiev MoS₂, WS₂ ktoré nájdu priame uplatnenie pri vývoji MIS štruktúr a vývoji vodíkových a kyslíkových elektrolyzéro. Vyvinuli sme tiež technológiu prípravy tenkých vrstiev ZnO dopovaných Al nanášaím po atomárnych vrstvách. Tieto vrstvy môžu byť použité pri MIS štruktúrach pre fotokatódy na rozklad vody. V projekte bol vyvinutý nový model popisujúci transport nosičov náboja cez dielektrické vrstvy MIS štruktúru, ktorý umožní lepšiu optimalizáciu a vývoj takýchto štruktúr a zároveň je tiež uplatniteľný aj vo vývoji ďalších typov štruktúr, napríklad MOS tranzistorov. Pripravené fotocitlivé MIS štruktúry s katalytickými vrstvami spájajú výhody slnečných článkov a elektrolyzéro v jednej štruktúre. Tieto štruktúry majú perspektívu využitia pri návrhu a konštrukcii generátorov vodíka/kyslíka pracujúcich na princípe rozkladu vody, ktoré využívajú premenu slnečného žiarenia na energiu viazanú vo vodíku. Takto pripravený vodík môžeme považovať za zelený vodík. V projekte sme ukázali využiteľnosť vyvinutých foto-citlivých MIS štruktúr v spojení s dodatočnými slnečnými článkami s perspektívou dosiahnutia 15% účinnosti premeny energie slnečného žiarenia na vodík.

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

V rámci riešenia projektu sa podarilo úspešne optimalizovať ALD rast tenkých dielektrických vrstiev oxidov kovov TiO₂ a HfO₂ hrúbok jednotiek nanometrov. Zároveň sa úspešne preskúmali pasivačné možnosti SiO₂ vrstiev použitých na rozhraní kremíka a dielektrickej vrstvy pripravených viacerými technológiami, pričom pre MIS technológiu sa ako najperspektívnejšia ukázala SiO₂ vrstva pripravená procesom ozónovania v ALD reaktore. Transport nosičov náboja cez MIS štruktúru tvorenú pasivačnými a dielektrickými vrstvami

bol popísaný novým modelom založeným na pascami asistovanom tunelovaní. V rámci projektu sa podarilo úspešne narásť katalytické oxidové vrstvy RuO₂ a RuO₂-IrO₂ pomocou MOCVD a vrstvy NiO pomocou magnetronového naprašovania a optimalizovať ich parametre z hľadiska dosiahnutia vhodných optických vlastností a vodivosti. Prostredníctvom simulácie boli tieto vrstvy analyzované z hľadiska antireflexného prispôsobenia ku kremíkovému substrátu. Skúsenosti pri optimalizácii jednotlivých vrstiev boli využité pri príprave MIS štruktúr s RuO₂, RuO₂-IrO₂ a NiO katalytickými vrstvami. Počas riešenia projektu sa podarilo vytvoriť MIS štruktúry s parametrami foto-napätia ~0,5V a foto-prúdu ~30 mA/cm², ktoré využívajú vrstvy RuO₂. Tieto štruktúry bolo možné pripraviť s vysokou reprodukovateľnosťou, čo hovorí o dobre zvládnutej technológii. Vrstvy vykazovali stabilitu pre foto-elektrochemický rozklad vody pri aplikovaní redoxného potenciálu oxidácie vody v 1M H₂SO₄. Štruktúry boli využité pre analýzu vhodnej konštrukcie generátora vodíka/kyslíka využívajúceho slnečné svetlo pre rozklad vody. Simulačná analýza generátora tvoreného slnečnými článkami, MIS štruktúrou a NiO elektrolyzér, ukázala perspektívu dosiahnutia účinnosti 15 % pre takýto systém.

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

As part of the project solution, the ALD growth of thin dielectric layers of metal oxides TiO₂ and HfO₂ of nanometer units was successfully optimized. At the same time, the passivation possibilities of SiO₂ layers used at the interface of silicon and dielectric layer prepared by several technologies were successfully investigated, while the SiO₂ layer prepared by the ozonation process in the ALD reactor proved to be the most promising for MIS technology. The transport of charge carriers through the MIS structure formed by passivation and dielectric layers has been described by a new model based on trap-assisted tunneling. The project succeeded in growing the catalytic oxide layers RuO₂ and RuO₂-IrO₂ using MOCVD and the NiO layer using magnetron sputtering and optimizing their parameters in terms of achieving suitable optical properties and conductivity. Through simulation, these layers were analyzed for anti-reflection adaptation to the silicon substrate. Experience in optimizing individual layers was used in the preparation of MIS structures with RuO₂, RuO₂-IrO₂ and NiO catalytic layers. During the project, it was possible to create MIS structures with parameters of photo-voltage ~ 0.5V and photo-current ~ 30 mA / cm², which use RuO₂ layers. These structures could be prepared with high reproducibility, which indicates a well-mastered technology. The layers showed stability for photo-electrochemical decomposition of water when applying the redox potential of water oxidation in 1M H₂SO₄. The structures were used to analyze a suitable hydrogen / oxygen generator design using sunlight to decompose the water. Simulation analysis of a generator consisting of solar cells, MIS structure and NiO electrolyser showed the prospect of achieving an efficiency of 15% for such a system.