

## Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-16-0129****Fotonické nanoštruktúry pripravené 3D laserovou litografiou pre biosenzorické aplikácie**Zodpovedný riešiteľ **prof. Ing. Dušan Pudiš, PhD.**Príjemca **Žilinská univerzita v Žiline - Fakulta elektrotechniky a informačných technológií**

### Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

1. Fakulta elektrotechniky a informačných technológií, Žilinská univerzita v Žiline, Žilina
2. Elektrotechnický ústav, Slovenská akadémia vied, Bratislava
3. Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita, Bratislava

### Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

Institute of Physics, Lodz University of Technology, Łódź, Poland,  
Faculty of Microsystem Electronics and Photonics, Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, Poland,  
Fachgebiet Angewandte Nanophysik, TU Ilmenau, Germany,  
Research Centre for Microtechnology, Vorarlberg University of Applied Sciences, Dornbirn, Austria,  
Department of Physics, Technical University Ostrava, Ostrava, Czech Republic.

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

-

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

Projekt dosiahol 19 publikačných výstupov v karentovaných publikáciách vo veľkej väčšine úrovne Q1, 5 výstupov v domácich a zahraničných nekarentovaných časopisoch a 74 príspevkov v zborníkoch zo zahraničných a domácich konferencií. Za najvýznamnejšie publikácie považujeme články publikované v poslednom roku presahujúce IF >6 a okrem toho ďalšie uvedené CC články. Tieto CC články sumarizujú dosiahnuté senzory a nanoštruktúry s vysokou citlivosťou pre SERS a Lab on a chip aplikácie.

1. Novák, J., Eliáš, P., Hasenöhrl, S., Laurenčíková, A., Kováč jr., J., Urbancová, P., Pudiš, D.: Twinned nanoparticle structures for surface enhanced Raman scattering, Appl. Surf. Sci., Volume 528, 30 October 2020, pp. 146548.
2. Urbancová, P., Goraus, M., Pudiš, D., Hlubina, P., Kuzma, A., Jandura, D., Ďurišová, J., Miček, P.: 2D polymer/metal structures for surface plasmon resonance, Appl. Surf. Sci., Volume 530, 15 November 2020, pp. 147279.  
Volume 531, 30 November 2020, pp. 147300.
3. Urbancová, P., Chylek, J., Hlubina, P., Pudiš, D.: Guided-mode resonance-based relative

humidity sensing employing a planar waveguide structure, Sensors, Volume 20, 27 November 2020, pp. 6788.

4. Pudiš, D., Urbancová, P., Novák, J., Kuzma, A., Lettrichová, I., Gorauš, M., Eliáš, P., Laurenčíkova, A., Jandura, D., Šušlik, L., Hasenöhrl, S.: Near-field analysis of GaP nanocones, Appl. Surf. Sci., Volume 539, 15 February 2021, pp. 148213.

### **Uplatnenie výsledkov projektu**

Projekt okrem množstva kvalitných publikácií priniesol aj efektívne a jednoduché riešenia optických a fotonických prvkov s originálnymi sensorickými vlastnosťami. Využil na to najmodernejšie 3D technológie a dokázal účelne kombinovať 3D polymérne technológie s tenkými kovovými a polovodičovými vrstvami. Takto boli vytvorené unikátne 3D plazmonické štruktúry, ktoré preukázali vynikajúce citlivosti. Ich zabudovaním do čipu sme dokumentovali aj ich použitie pre aplikácie tzv. laboratória na čipe. Urobili sme celkovo dva rôznorodé čipy, kde bolo možné merať optický index lomu prúdiacich kvapalín s vysokou citlivosťou.

Práve štruktúry s povrchovou plazmonickou mriežkou sú jedným z množstva zaujímavých výstupov a ponúkajú sa na využitie vyvinutých prvkov ako kandidátov pre lacné optické senzory merania rôznych fyzikálnych veličín. V projekte sme predviedli ako ich pripraviť, aké technológie na ich prípravu použiť a aké vlastnosti sa dajú dosiahnuť. Podarilo sa nám ukázať aj návody ako vyrobiť na báze týchto technológií a myšlienok aj niektoré optické senzory na báze fotonických a plazmonických štruktúr.

Iný samozrejmy aspekt dopadov výstupov je tiež na vedeckú verejnosť, kde sme ponúkli niekoľko nápadov a výsledkov technológií pre vývoj nových prvkov ako senzorov a fotonických prvkov s originálnymi plazmonickými vlastnosťami. Podali sme vysvetlenia niektorých javov súvisiacich s efektom vzniku povrchového plazmónu v 3D nanoštruktúrach. Sme presvedčení, že v publikovaných článkoch bude dostatok zaujímavých informácií pre vývoj nových aktívnych a pasívnych prvkov v integrovanej optike, optoelektronike a biofotonike.

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

Dosiahnuté výsledky boli s ohľadom na dva základné stanovené ciele: i) vývoj rôznych polymérnych fotonických štruktúr pre aplikácie laboratória na čipe (LOC) ii) vývoj štruktúr pre povrchovo zosilnenú Ramanovskú spektroskopiu (SERS) na povrchoch nanokuželov. V prvom prípade sme navrhli a vytvorili nanoštruktúry v dvoj a trojrozmernom usporiadaní, kde sme namerali povrchovú plazmónovú rezonanciu (SPR) spektrálnymi meraniami. V reflektančných spektrách boli spektrálne prepady, ktoré vykazovali silnú závislosť na rôzne koncentrácie roztokov voda : izopropylalkohol s daným indexom lomu. Sumarizáciou takýchto meraní sme dosiahli lineárnu závislosť spektrálneho posunu SPR od zmeny indexu lomu. Z toho bola určená citlivosť  $S$  na index lomu ako zmena rezonančnej vlnovej dĺžky  $\Delta\lambda$  vzhľadom na zmenu indexu lomu  $\Delta n$  ( $S = \Delta\lambda / \Delta n$ ). Zo závislosti sme ukázali veľmi dobrú citlivosť  $S = 548 \text{ nm/RIU}$  (RIU jednotka je z angl. refractive index unit, čo znamená 548 nm na jednotkovú zmenu indexu lomu). Tento dosiahnutý parameter je v oblasti mriežkových senzorov pozoruhodný a tieto výsledky dokazujú, že takéto SPR štruktúry sú veľmi citlivé na zmenu indexu lomu. Zároveň sú vhodné pre snímacie zariadenia na veľmi citlivé určovanie koncentrácií roztokov na princípe zmeny indexu lomu a v danom usporiadaní na čipe LOC umožňujú aj jeho in-situ monitorovanie. Toto všetko bolo publikované v niekoľkých vysokoimpaktovaných časopisoch.

V druhom prípade SERS štruktúr sme sa zamerali na podrobné štúdium nanokuželov a ich pokrytia rôznou hustotou striebornými nanočasticami. Toto bolo optimalizované počas celej doby riešenia projektu. Pomocou diagnostických metód ako elektrónový mikroskop (SEM) analýza, kde sa určovala separácia strieborných nanočastíc a Ramanovskej spektroskopie sasa meral efekt rôznej distribúcie Ag nanočastíc na zosilnenie Ramanovského signálu. Ukázalo sa, že distribúcia a rozmery nanočastíc úzko súvisia s hrúbkou deponovanej striebornej tenkej vrstvy. Experimentami sme dosiahli závislosť zosilnenia Ramanovského signálu od separácie nanočastíc rozmiestnených na povrchu nanokuželov. Dosiahli sme zosilnenie viac ako jeden milión pre separáciu 5 nm. Tieto výsledky sme overili meraniami v blízkom poli (NSOM), kde sa potvrdilo plazmonické zosilnenie na povrchu nanokužela s distribuovanými nanočasticami. Z toho vznikla aj samostatná publikácia, lebo samotná optická analýza takýchto nanokuželov na sub sto nanometrovej úrovni je unikátna. Ešte

unikátnejší je výsledok dosiahnutého Ramanovského zosilnenia milión krát na nanokuzeloch so striebornými nanočasticami.

Nielenže sa podarili naplniť ciele vo všetkých bodoch, kde sme vytvorili špeciálne fotonické štruktúry so senzorickými vlastnosťami ako aj nanokuzele s povrchovo distribuovanými nanočasticami a dokázali ich publikovať v kvalitných časopisoch, ale sme vytvorili nové štruktúry pre bázu vysokocitlivých senzorov a tiež sme dokázali ich integráciu do LOC.

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

The results were achieved with respect to two basic goals: i) development of various polymeric photonic structures for laboratory on-chip (LOC) applications ii) development of structures for surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) on nanocone surfaces. In the first case, we designed and created nanostructures in a two- and three-dimensional arrangement, where we measured surface plasmon resonance (SPR) by spectral measurements. There were spectral dips in the reflectance spectra, which showed a strong dependence on different concentrations of water: isopropyl alcohol solutions with a given refractive index. By summarizing such measurements, we achieved a linear dependence of the spectral SPR shift on the refractive index change. From this dependence, the sensitivity  $S$  to the refractive index was determined as the change in the resonant wavelength  $\Delta\lambda$  with respect to the change in the refractive index  $\Delta n$  ( $S = \Delta\lambda / \Delta n$ ). From the dependence, we showed a very good sensitivity of  $S = 548 \text{ nm} / \text{RIU}$  (RIU unit is from the English refractive index unit, which means 548 nm per unit change of refractive index). This achieved parameter is remarkable in the field of grating sensors and these results prove that such SPR structures are very sensitive to changes in refractive index. At the same time, they are suitable for sensing devices for very sensitive determination of solution concentrations on the principle of changing the refractive index, and in a given arrangement on the LOC chip they also enable in-situ monitoring. All this results has been published in several high-impacted journals.

In the second case of SERS structures, we focused on a detailed study of nanocones and their coverage with different densities of silver nanoparticles. This has been optimized throughout the project. Using diagnostic methods such as electron microscopy (SEM), which determined the separation of silver nanoparticles and Raman spectroscopy, used for measurement of the effect of different distributions of Ag nanoparticles on Raman signal amplification. The distribution and dimensions of the nanoparticles have been shown to be closely related to the thickness of the deposited silver thin film. By experiments, we achieved the dependence of the Raman signal amplification on the separation of nanoparticles distributed on the surface of nanocones. We achieved an amplification of more than one million for a separation of 5 nm. We verified these results by measurements in the near field (NSOM), where the plasmonic amplification on the surface of the nanocones with distributed nanoparticles was confirmed. This resulted in a separate publication, because the actual optical analysis of such nanocones at the sub hundred nanometer level is unique. Even more unique is the result of the achieved Raman amplification a million times on nanocones with silver nanoparticles.

Not only did we succeed in meeting the goals at all points, where we created special photonic structures with sensory properties as well as nanocones with surface-distributed nanoparticles and were able to publish them in quality journals, but we created new structures for high-sensitivity sensors and also integrated them into LOC.