

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**Plazmonikus aranyfelületek és nanoszerkezetek
felületerősített Raman-szóráshoz**

Írta:

Rigó István

Témavezető:

Veres Miklós



Szegedi Tudományegyetem
Természettudományi és
Informatikai Kar Fizika Doktori
Iskola



Wigner Fizikai Kutatóközpont
Szilárdtestfizikai és Optikai
Intézet

Szeged, 2020

1. BEVEZETÉS ÉS A KUTATÁS ELŐZMÉNYÉNEK RÖVID ÖSSZEFOGLALÁSA

A spektroszkópai anyagvizsgálat egyik klasszikus ága a rezgési spektroszkópia; ennek széleskörűen alkalmazott módszerei közé a Raman-spektroszkópia és az infravörös abszorpciós spektroszkópia tartozik. A Raman-szórás (más néven kombinációs fényszórás) az anyagot alkotó molekulák, kristályrács és egyéb szerkezeti egységek rezgéseivel kölcsönható fény rugalmatlan szóródása. A Raman-spektroszkópia segítségével számos szerves és szervetlen, szilárd, folyékony és gáz halmazállapotú, rendezett és rendezetlen anyag, allotróp módosulat vizsgálható.

A felületerősített Raman-szórás (SERS) egy a Raman-szórási hatáskeresztmetszetet jelentősen, a normál Raman-szóráshoz képest akár 4-10 nagyságrenddel is megnövelni képes technika. A SERS alapja a gerjesztő és/vagy a szórt fény elektromágneses terének fém nanoszerkezetek felületi plazmonjaival való kölcsönhatás általi erősítése. Az erősítés mértékét számos tényező befolyásolja, legfőképp a fém nanoszerkezetek (SERS-felületek vagy SERS-hordozók) anyaga, mérete és topológiája.

A Web of Science keresőmotorja alapján már 2010-ben is több mint 1000 közlemény jelent meg, melyek szorosan kapcsolódnak a felületerősített Raman-spektroszkópiához. Ez a szám 2016-ra a duplájára nőtt, és elérte a 2000 közleményt éves szinten. A növekedési tendencia tovább emelkedett az utóbbi években. Ez nem meglepő, mivel a módszer megfelelően megválasztott mérési körülmények

között akár egyetlen molekula detektálását is lehetővé teszi. A SERS egyre nagyobb felhasználásra talál a biológia, az orvosdiagnosztika, a kémia és természetesen a fizika területén. Több cikk foglalkozik az emberi DNS felületerősített Raman-spektroszkópiával történő vizsgálatával, de a technika olyan komplex folyadékok elemzésére is alkalmas, mint az emberi vér. Több kutatás irányul beteg és egészséges emberek testnedveiben található biomarkerek összehasonlító vizsgálatára. Nem túlzás kijelenteni, hogy csak idő kérdése, hogy a SERS-technológiát alkalmazó készülékek és berendezések bekerüljenek a diagnosztika mindennapi eszköztárába. Ehhez viszont többek között hatékony, jól reprodukálható SERS-hordozókra van szükség.

2. CÉLKITŰZÉS

A felületerősített Raman-szórás napjaink intenzíven kutatott területe. A jelenség magyarázatának hosszantartó kidolgozása után a hatékony SERS-felületek előállítás, szelektív tétele és más módszerekkel való együttes alkalmazása állnak a kutatások fókuszában. Doktori munkám célja gyakorlati alkalmazással kecsegtető, hatékony SERS-hordozók kutatása: elsősorban mikroméretű objektumok, például aeroszolok, sejtek vagy baktériumok felületén található funkciós csoportok Raman-jelének vizsgálatára alkalmas felületek tervezése, előállítás, valamint kísérleti és elméleti módszerekkel való jellemzése volt. Az ilyen vizsgálatokhoz általában rögzíteni kell a vizsgálni kívánt mikroobjektumot – lehetőleg azonnal a SERS-aktív felületen.

Munkám során a következő konkrét feladatokkal foglalkoztam:

- Különböző morfológiájú és méretű üregek periodikus mátrixa alkotta SERS-hordozók összehasonlító jellemzése kísérleti és elméleti módszerekkel.
- A kapott eredmények felhasználása mikroobjektumok csapdázására alkalmas perforált, a folyadék átfolyását biztosító SERS-hordozók előállítására, és ezen hordozók jellemzése.
- Vörösvérsejtek rögzítésére és SERS-vizsgálatára alkalmas hordozók előállítása és jellemzése.
- Inverz piramisba helyezett arany nanogömbök alkotta SERS-erősítő struktúrák jellemzése.

3. ALKALMAZOTT ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

3.1. Hordozók előállításához használt technikák

Az általam vizsgált SERS-felületek előállítása mikromechanikai technológiák alkalmazásával történt. A széleskörűen használt módszerrel precízen kontrollálható a mikroszkopikus felületi struktúrák mérete, alakja és elrendezése, akár 3D szerkezetek kialakítása is megoldható. A fotolitográfia célja a tervezett felületi struktúráknak megfelelő mintázatú laterális felületi védőréteg létrehozása, ami a felület bizonyos részeit elszigeteli, míg másokat elérhetővé teszi a következő technológiai (jellemzően marási) eljárások számára. A maszk és mintakészítés az MTA EK Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetének MEMS laborjában történt. A litográfias maszk készítése Heidelberg DWL66 maszkgenerátor segítségével

történt. Maszkoló rétegeként 100-500 nm vastag SiO_2 réteg került leválasztásra APCVD (atmospheric pressure CVD, atmoszférikus kémiai gőzfázisú leválasztás) technológiával a Si hordozó felületére. A maszkoló oxidréteg szelektív eltávolításához megfelelően strukturált fotorezisztréteget alakítottunk ki fotolitográfiával, Karl Süss MA 6 maszkillesztő-berendezés segítségével. A szilícium-oxidot HF tartalmú marószerrel távolítottuk el a kívánt területekről.

A SERS-felületek 3D morfológiájának alakításában fontos szerepet játszik a szilícium marása. Az elérhető eljárások közül a SERS-hordozók létrehozására jelen esetben speciális nedves kémiai marási eljárásokat alkalmaztunk, kihasználva az izotróp és az anizotróp marás különbségeit. A szilícium egykristály, aminél nagyon effektív anizotróp marást érhető el alkáli marási rendszerek alkalmazásával, ami mögött a különböző kristállysíkok közötti Si-Si kötések energiájának különbözősége áll. A SERS-hordozók kialakításakor a SiO_2 marása pufferezt HF oldatban történt, míg a Si izotróp marására a HF/ HNO_3 rendszert használtuk. A technológia lehetőséget ad a fent bemutatott eljárások ötvözésére, ami lekerekített élű üregek előállítását is lehetővé teszi.

A perforált SERS-szerkezetek előállítása szintén anizotróp marással történt, de a kiindulási anyag szigetelőre növesztett 1 μm vastagságú epitaxiális szilíciumréteg (SOI - Silicon on insulator) volt. A 3D mikromechanikai technológiákkal előállított hordozókra 5 nm-es titán adhéziós réteg után 100-150 nm vastag aranyréteg került elektronsugaras vákuumgőzöléssel, AJA Orion

vákuumporlasztó/gőzölő (AJA International Inc.) készülékben egy vákuumciklusban.

3.2. Morfológiai jellemzésre használt módszerek

A SERS-hordozók morfológiája pásztázó elektronmikroszkóppal és fehérfényű interferometriával lett vizsgálva. A SEM-mérések egy Zeiss LEO 1540 XB Crossbeam és Jeol JSM-25 berendezés használatával készültek, amelyek akár 2 nanométeres felbontásra is képesek. Mivel a vizsgált SERS-felületeken aranyréteg volt, elektrosztatikus feltöltődéstől nem kellett tartani. A SEM vizsgálatok az MTA EK Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetében készültek.

A SERS-hordozók felületének jellemzésére használt fehérfényű interferometriás felületelemző készülék olyan többfunkciós, a felület mikrostruktúráját és topográfiáját függőleges szkennelő mérésekkel meghatározni és azokat háromdimenzióban ábrázolni képes berendezés, mellyel a vizsgált felület különböző szempontok szerinti elemzésére is lehetőség van.

3.3. Az időtartománybeli véges differenciák módszere

Az időtartománybeli véges differenciák módszerét (FDTD) széles körben használják a Maxwell-egyenletek összetett geometriákon való megoldására az elektromágnesség és a fotonika területén. A módszer a térkomponensek diszkrét térbeli és időbeli rácscellákon (az ún. Yee-cellákon) való megoldásán alapszik, ahol az elektromos komponens a cella élein, a mágneses pedig a cella oldalain van elhelyezve. Ezen felül

az FDTD időtartománybeli technika is, tehát az $\vec{E}(t)$ időfüggő elektromos és $\vec{H}(t)$ mágneses tér értékét is megadja. Az FDTD-számítások során a kapott eredmények automatikusan interpolálódnak az egyes rácspontokra. Az elektromos térerősségnek egy síkhullámmal való kölcsönhatás eredményeként kapott eloszlását különböző SERS-felületek – beleértve a perforált és a csapdázott arany nanogömböket tartalmazó szerkezeteket is – a Lumerical FDTD Solutions v.8.15.736 szoftverrel modelleztem. Mivel az általam vizsgált SERS-felületeket üregek mátrixa alkotja, ennek modellezésére a felülettel párhuzamos irányokban periodikus határfeltételeket használtam. Merőleges irányban, a különböző anyagok alkotta rétegek közötti határokon az impedanciák illesztéséhez tökéletesen illeszkedő réteg (PML) határfeltételeket alkalmaztam. A modell felépítésekor a fotolitográfiával előállított SERS-felület morfológiai jellemzéseiből származó méretadatokat használtam. Ezek alapján alkottam meg az inverz geometriát, a hordozó anyagaként a szilíciumot beállítva, majd az így kapott felületre újabb, immár aranyból készült réteget illesztettem, melynek vastagságát 150 nm-esre állítottam be. Mivel a SEM-képekből az üregek egymástól való távolsága is meghatározható volt, ezeknek megfelelően határoztam meg a szimulációs cella méreteit és a periodikus határfeltételeket. A térerősség eloszlásának ábrázolásához a mintában három monitorsíkot helyeztem el: kettőt a cella szimmetriatengelyei mentén, valamint egyet a felülettel párhuzamosan. További 2 monitor pedig a geometriának megfelelően a

visszavert és az átjutó térerősség rögzítésére szolgált. A modellnél alkalmazott paramétereket több szempontból is validáltam.

3.4. Raman-vizsgálatok

A Raman- és SERS-mérésekhez két Raman-spektrométert használtam: egy Leica DM/LM mikroszkóppal egybeépített Renishaw 1000 Raman-rendszert, valamint egy Leica DM2700 mikroszkóppal egybeépített Renishaw inVia Raman-berendezést. Bár a készülékekhez több gerjesztő fényforrás is elérhető, Raman-méréseimet általában a 785 nm-es gerjesztéssel végeztem. A spektrumok megjelenítését a készülékekhez kötött számítógépeken futó Renishaw WIRE szoftver megfelelő verziói végzik, ahol lehetőség van az expozíciós idő, a lézerteljesítmény, az integrálás, mérési tartomány beállítására.

3.5. A felületerősítés meghatározásának módja

Az erősítési tényező meghatározásához benzofenon 1 mM-os etanolos oldatát használtam. A Raman-mérésekhez az oldatot a SERS-felületre cseppentettem, majd a megszáradás után kezdtem el a spektrumok rögzítését. Referenciaként mindig a sík aranyrétegre cseppentett oldaton mért spektrumot használtam. A gyakorlatban ez azt jelentette, hogy a SERS-hordozó strukturált része mellett az aranyozott sík szilíciumfelületre is cseppentettem oldatot, és ennek a spektrumát használtam referenciaként a SERS-erősítés meghatározásához. A cseppentést eppendorf-pipetta segítségével végeztem, hogy a felületre juttatott mennyiség mindig azonos legyen. A gerjesztő folt átmérője a

mintán a mikroszkóphoz tartozó 100X nagyítású objektív (NA-értéke 0,9) használatakor, 785 nm-es gerjesztés mellett ~1 μm volt. A Raman-berendezés segítségével lehetőség volt a struktúrákról kapott optikai mikroszkópos felvétel és a lézerfolt elhelyezkedésének együttes megjelenítésére, így a gerjesztő nyalábot mindig az inverz struktúra közepére tudtam beállítani. A lézer teljesítményét a beépített szűrkeszűrők segítségével csökkentettem, hogy a SERS-spektrumok esetében ne telítődjön a detektor. A mintára érkező teljesítmény a normál Raman esetében is ugyanez volt, ahogy az integrálási idő is az egyes méréseknél. Saját kísérleteim során azt tapasztaltam, hogy a benzofenon etanolos oldata az aranyfelületen konstans nedvesítési szög mechanizmus szerint párolog, azaz az oldott anyag egy kisebb területen szárad be végül. Bár SERS-erősítés ennek csak az aranyfelület közelében található nagyon vékony rétegen történik, normál Raman-szórás révén az üregben található többi benzofenon is hozzájárul a mért SERS- (pontosabban SERS+Raman-) intenzitáshoz. Emiatt a használt *SE* SERS-erősítési tényező:

$$SEF = \frac{I_{SERS} + I_{RSC}}{I_{RSS}} \quad (1)$$

ahol I_{SERS} a SERS-intenzitás, I_{RSC} az üregben, I_{RSS} pedig a sík felületen mért normál Raman-intenzitás. Az I_{RSC} csökkenti a számított SERS-erősítés értékét. Mivel az értéke nem ismert és nehezen meghatározható, a továbbiakban a fenti *SE*-értéket, mint relatív SERS-erősítési tényezőt használtam a minták összehasonlító jellemzésére.

4. ELÉRT EREDMÉNYEK

Tudományos eredményeimet az alábbi tézispontokban foglalom össze:

1.1. *Szilícium hordozón fotolitográfiával kialakított, különböző méretű négyoldalú gúla, lekerekített élű négyoldalú gúla és félgömb alakú üregek periodikus mintázata alkotta, aranyréteggel bevont hordozók összehasonlító Raman-spektroszkópiai vizsgálatával kimutattam, hogy a $2 \times 2 \mu\text{m}$ alapélű négyoldalú gúla alakú minta rendelkezik a legnagyobb felületerősítési tényezővel. [I,II]*

1.2. *Időtartománybeli véges differenciák módszerével végzett modellszámításokkal meghatároztam az elektromos térerősség lokális eloszlását, és azt találtam, hogy annak maximuma a négyoldalú gúlánál az üreg alsó részére koncentrálódik. Az éleket tartalmazó szerkezettől (négyoldalú gúla) az állandó görbületű felület (félgömb) felé haladva az elektromos térerősség forrópontjainak intenzitása csökken a $2 \times 2 \mu\text{m}$ alapélel rendelkező mintáknál. [I,II]*

2.1. *Optikai mikroszkópiás és pásztázó elektronmikroszkópiás vizsgálatokkal, valamint Raman-spektroszkópiai mérésekkel igazoltam, hogy a szilícium hordozón fotolitográfiával kialakított, $2 \times 2 \mu\text{m}$ alapélel rendelkező csonka inverz négyoldalú gúla alakú üregek periodikus mátrixa alkotta, aranyréteggel bevont átfolyásos hordozó alkalmas a $2 \mu\text{m}$ -nél és nagyobb részecskék csapdázására és az azok*

felületén található funkciós csoportok felületerősített Raman-szórással való vizsgálatára. [III,IV]

2.2. Időtartománybeli véges differenciák módszerével végzett modellszámításokkal kimutattam, hogy a $2 \times 2 \mu\text{m}$ alapéllal rendelkező, aranyréteggel bevont csonka inverz négyoldalú gúla alakú üregben csapdázott $2 \mu\text{m}$ -es polimer mikrogömbnél a térerősség a polimergömb környezetébe koncentrálódik. [III,IV]

3. A felületerősített Raman-szórás és fluoreszcencia együttes intenzitásának több nagyságrenddel való megnövekedését figyeltem meg $2 \times 2 \mu\text{m}$ alappal rendelkező négyoldalú gúla alakú aranybevonatos üregbe helyezett 50-250 nm átmérőjű arany nanogömb alkotta komplex struktúráknál. Azt találtam, hogy a felületerősített Raman- és a fluoreszcenciajel intenzitása növekszik az arany nanogömb méretével. A fenti struktúrákon időtartománybeli véges differenciák módszerével végzett modellezéssel kimutattam, hogy a 200 nm-nél és nagyobb arany nanogömbök esetében a térerősség maximuma az arany nanogömb környezetére lokalizálódik, és a legnagyobb felületerősítés a gömb ívelt és az inverz gúla sík felülete közötti szűk térrészekben alakul ki. [V,VI]

4. TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

- I. István Rigó, Miklós Veres, László Himics, Tamás Váczi, Péter Fürjes; Preparation and Characterization of SERS**

Substrates of Different Morphology; In Petkov P., Tsiulyanu D., Popov C., Kulisch W. (eds) *Advanced Nanotechnologies for Detection and Defence against CBRN Agents*, NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics, Springer, Dordrecht, pp. 63-68 (2019).

- II. **István Rigó**, Miklós Veres, László Himics, Sára Tóth, Aladár Czitrovszky, Attila Nagy, Péter Fürjes; Comparative Analysis of SERS Substrates of Different Morphology; *PROCEDIA ENGINEERING* 168, 371-374 (2016).
- III. **István Rigó**, István Rigó, Miklós Veres, Péter Fürjes; SERS Active Periodic 3D Structure for Trapping and High Sensitive Molecular Analysis of Particles or Cells; *PROCEEDINGS* 1(4), 560 (2017).
- IV. **István Rigó**, Miklós Veres, Tamás Váczi, Eszter Holczer, Orsolya Hakkel, András Deák, Péter Fürjes; Preparation and Characterization of Perforated SERS Active Array for Particle Trapping and Sensitive Molecular Analysis; *Biosensors* 9 (3), 93 (2019).
- V. **István Rigó**, Miklós Veres, Orsolya Hakkel, Péter Fürjes; Hierarchically Combined Periodic SERS Active 3D Micro- and Nanostructures for High Sensitive Molecular Analysis; *PROCEEDINGS* 2(13), 1069 (2018).

- VI. **István Rigó**, Miklós Veres, Zsuzsanna Pápa, László Himics., Rebeka Öcsi, Orsolya Hakkel, Péter Fürjes; Plasmonic enhancement in gold coated inverse pyramid substrates with entrapped gold nanoparticles. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 253, 107128 (2020).

5. A DOLGOZAT TÉMAKÖRÉHEZ NEM KAPCSOLÓDÓ EGYÉB KÖZLEMÉNYEK

- 1) L. Himics, S. Tóth, M. Veres, A. Czitrovsky, A. Nagy, D. Oszetzky, A. Kerekes, S. Kugler, I. Rigó, A. Tóth, and M. Koós, “Creation of blue light emitting color centers in nanosized diamond for different applications,” *Nato Science For Peace And Security Series A: Chemistry And Biology*, vol. 39, pp. 93–101 (2015).
- 2) S. Kugler, A. Kerekes, A. Nagy, I. Rigó, M. Veres, and A. Czitrovsky, “New optical method for MMAD determination of the metered dose inhalators,” in *European Aerosol Conference*, (2015).
- 3) I. Rigó, A. Czitrovsky, L. Himics, A. Kerekes, S. Kugler, M. Koós, A. Nagy, D. Oszetzky, S. Tóth, T. Verebélyi, and M. Veres, “Determination amount of impactor settled pharmacies with optical microscope methods,” in *European Aerosol Conference* (2015).
- 4) A. Kerekes, S. Kugler, A. Nagy, D. Oszetzky, M. Veres, I. Rigó, and A. Czitrovsky, “Az APSD változásának mérése inhalációs készítmények esetében magas páratartalmú környezetben különböző tartózkodási időtartamok mellett,” *A XII. Magyar Aeroszol Konferencia előadás-kivonatai*, Szeged, pp. 34-35 (2015).
- 5) I. Rigó, A. Czitrovsky, L. Himics, A. Kerekes, S. Kugler, M. Koós, A. Nagy, D. Oszetzky, S. Tóth, T. Verebélyi, and M. Veres, “Impaktorban kiülepedett gyógyszer-mennyiségek meghatározása optikai mikroszkópiás módszerekkel” in Filep Ágnes, *A XII. Magyar Aeroszol Konferencia előadás-kivonatai*, Szeged, p. 38-39 (2015).

- 6) S. Kugler, A. Kerekes, A. Nagy, I. Rigó, M. Veres, and A. Czitrovsky, “Kimért dózisú inhalátorok méreteloszlásának meghatározása az új generációs kaszkád impaktorral,” in *A XII. Magyar Aeroszol Konferencia előadás-kivonatai*, Szeged, pp. 82–83 (2015).
- 7) S. Tóth, L. Himics, M. Koós, P. Schlosser, T. Verebélyi, I. Rigó, M. Veres, A. Kerekes, A. Nagy, D. Oszetzky, S. Kugler, and A. Czitrovsky, “Különböző aeroszol gyógyszerek fotolumineszcencia módszerrel történő vizsgálata” in *A XII. Magyar Aeroszol Konferencia előadás-kivonatai*, Szeged, pp. 93–94 (2015).
- 8) M. Veres, I. Rigó, L. Himics, T. Verebélyi, S. Tóth, M. Koós, A. Nagy, A. Kerekes, D. Oszetzky, S. Kugler, and A. Czitrovsky, “Measurements of aerosol drug deposition using optical methods,” in *The 23th International Conference on Advanced Laser Technologies, ALT’15* (2015).
- 9) A. Kerekes, A. Nagy, M. Veres, I. Rigó, Á. Farkas, and A. Czitrovsky, “In vitro and in silico (IVIS) flow characterization in an idealized human airway geometry using laser Doppler anemometry and computational fluid dynamics techniques,” *MEASUREMENT*, vol. 90, pp. 144–150 (2016).
- 10) I. Rigó, L. Himics, A. Nagy, A. Czitrovsky, S. Tóth, P. Fürjes, G. Singh, and M. Veres, “Gold-plated silicon nanostructures for surface-enhanced Raman scattering (SERS),” in *17th International Conference “Laser Optics”* (2016).
- 11) A. Czitrovsky, A. Nagy, M. Veres, A. Kerekes, and I. Rigó, “Complex measurement of aerosol drug deposition using laser methods,” in *17th International Conference Laser Optics* (2016).
- 12) M. Veres, I. Rigó, L. Himics, S. Tóth, A. Nagy, A. Czitrovsky, C. Popov, and V. Ralchenko, “Study of Nitrogen Incorporation into Nanodiamond Films by Multi-wavelength Raman Spectroscopy,” in *24th Annual International Conference on Advanced Laser Technologies* (2016).
- 13) I. Rigó, M. Veres, A. Czitrovsky, P. Takács, D. Beke, L. Himics, S. Tóth, and P. Fürjes, “Surface-enhanced Raman scattering of SiC

- and diamond nanostructures,” in *24th Annual International Conference on Advanced Laser Technologies* (2016).
- 14) A. Nagy, A. Czitrovsky, M. Veres, A. Kerekes, and I. Rigó, “Characterisation of pharmaceutical inhalers and study of pulmonary drug delivery using lasers and optical methods,” in *24th Annual International Conference on Advanced Laser Technologies* (2016).
 - 15) L. Himics, M. Veres, S. Tóth, I. Rigó, and M. Koós, “Experimental Study of Spectral Parameters of Silicon-Vacancy Centers in MWCVD Nanodiamond Films Important for Sensing Applications,” in *Advanced Nanotechnologies for Detection and Defence against CBRN Agents*, pp. 215–220 (2018).
 - 16) M. Veres, L. Himics, I. Rigó, A. Nagy, S. Toth, S. Kugler, P. Baranyai, A. Czitrovsky, and T. Vaczi, “In vivo study of cell division with stimulated Raman scattering,” in *Proceedings - International Conference Laser Optics*, pp. 548 (2018).
 - 17) A. Nagy, M. Veres, I. Rigó, I. Vass, I. Kreisz, and A. Czitrovsky, “Characterisation of biological smoke generated by short pulse lasers,” in *Proceedings - International Conference Laser Optics* , pp. 604. (2018).
 - 18) L. Himics, M. Veres, C. Popov, N. Felgen, T. Vaczi, I. Rigó, S. Tóth, and M. Koós, “Enhancement of the light emission of color center containing nanodiamond structures,” in *Proceedings - International Conference Laser Optics*, pp. 392–392 (2018).
 - 19) M. Veres, L. Himics, I. Rigó, T. S. Borossáné, R. Holomb, M.M.Hadi, and T. Váczi, “Indukált Raman-szórás femto-szekundumos lézerrel,” in *Kvantumelektronika* (2018).
 - 20) A. Czitrovsky, A. Nagy, M. Veres, S. Kugler, I. Kreisz, I. Vass, and I. Rigó, “Measurements of surgical smoke using optical methods”,” in *26th International Conference on Advanced Laser Technologies. Book of Abstracts*, pp. 138–138 (2018).
 - 21) Nagy, A. Czitrovsky, M. Veres, S. Kugler, I. Kreisz, I. Vass, and I. Rigó, “Characterization of the aerosol plume released during laser

- tissue interactions,” in *26th International Conference on Advanced Laser Technologies. Book of Abstracts*, pp. 139–139 (2018).
- 22) L. Himics, M. Veres, M. Koós, S. Tóth, I. Rigó, P. Baranyai, T. Váczi, A. Czitrovsky, A. Nagy, R. Holomb, D. Oszetzky, N. Felgen, and C. Popov, “Multi-Wavelengths Fluorescence and Raman Spectroscopic Study of The SiV Center Containing Diamond Nanostructures,” in *26th International Conference on Advanced Laser Technologies. Book of Abstracts*, pp. 150 (2018).
- 23) R. Holomb, M. Veres, O. Kondrat, I. Rigó, L. Himics, A. Czitrovsky, A. Csik, V. Takats, and V. Mitsa, “Synthesis, reversible laser modification and structural characterization of As-S based functional media for ultrafast photonics,” in *26th International Conference on Advanced Laser Technologies. Book of Abstracts*, pp. 151 (2018).
- 24) M. Veres, L. Himics, I. Rigó, S. Tóth, P. Baranyai, A. Czitrovsky, and T. Váczi, “In Vivo Study of Intracellular Processes in Animal Embryo with Stimulated Raman Imaging,” in *26th International Conference on Advanced Laser Technologies. Book of Abstracts*, pp. 137 (2018).
- 25) L. Himics, M. Veres, S. Tóth, I. Rigó, and M. Koós, “Origin of the asymmetric zero-phonon line shape of the silicon-vacancy center in nanocrystalline diamond films,” *Journal of Luminescence*, vol. 215 (2019).
- 26) S. Kugler, A. Nagy, A. Kerekes, M. Veres, I. Rigó, and A. Czitrovsky, “Determination of emitted particle characteristics and upper airway deposition of Symbicort® Turbuhaler dry powder inhaler,” *Journal Of Drug Delivery Science And Technology*, vol. 54 (2019).
- 27) O. Hakkel, I. Rigó, M. Veres, and P. Fürjes, “Microfluidically Integrated SERS Active Cell Trap Array for Sensitive Analysis of Red Blood Cells,” in *20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems and Eurosensors XXXIII (Transducers 2019 And Eurosensors XXXIII)*, pp. 964–967 (2019).