

DOKTORI (PH.D.) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Plazma és elektród eróziós folyamatok vizsgálata szikrakisüléses nanorészecske generátorokban

Kohut Attila

Témavezető:

Dr. Geretovszky Zsolt

egyetemi docens



Fizika Doktori Iskola
Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék
Természettudományi és Informatikai Kar
Szegedi Tudományegyetem

Szeged
2017

1. Bevezetés

A nanotechnológia kétségtelenül napjaink egyik legfontosabb kutatási területe, melynek jelentőségét mi sem bizonyítja jobban, hogy már nem is szorul bemutatásra. A legtöbb ember hallhatott már a „nano”-ról, azon titokzatos dolgok egyikéről, mely egyszerre menti meg és pusztítja el az emberiséget. De ahogy az lenni szokott, a valóság valahol a két véglet között helyezkedik el. Azon képesség, hogy különböző anyagokat a nanométeres mérettartományban manipulálhassunk vitathatatlanul olyan eszközöket adott a kezünkbe, melyek néhány évtizeddel ezelőtt még elképzelhetetlenek lettek volna. Noha a nanotechnológia valamint a nanotudományok számos eredménye sikerrel jutott el az ipari alkalmazásig és ezzel mindennapi életünk részévé vált, továbbra is jelentős azon alkalmazási lehetőségek száma, melyek csak a laboratóriumok falain belül léteznek. Számos feltételnek kell teljesülni ahhoz, hogy egy új technológia kitörjön a laborból és utat találjon a felhasználóig. Egyike e feltételeknek a megfizethető alapanyagok biztosítása. A nanotechnológia fő építőelemei a nanostruktúrák, melyek dimenzióik szerint lehetnek 2D-s nanorétegek, 1D-s nanorudak vagy nanoszálak, valamint 0D-s nanorészecskék. E struktúrák környezetbarát tömegtermelése egy olyan technológiai kihívás, melynek megoldása elengedhetetlen a nanotechnológián alapuló termékek további fejlődéséhez. Jelen dolgozat témája a szikrakisüléses nanorészecske generálás néhány alaptudományi aspektusának vizsgálata. E technika egyike a legígéretesebb módszereknek, melyek kontrollált tulajdonságú nanorészecskék akár ipari mennyiségű előállítására is alkalmasak.

A szikrakisüléses nanorészecske generátorok (angol rövidítéssel SDG-k) felépítése meglehetősen egyszerű, alapja egy gáz-tömör kamra, melyben két, egymástól néhány milliméter távolságra elhelyezett elektród található. A nagyfeszültségű elektromos szikrakisülések létrehozásáról a szikraközzel sorba kötött kondenzátor gondoskodik (kisülési kör), melyet egy DC tápegység tölt folyamatosan (töltő kör). A kondenzátor folyamatos töltése, majd a szikraközön keresztüli kisülése következtében repetitív szikrázás jön létre. A szikrakisülések létrejöttének lehetőségét a szikraköz átütése teremti meg, melynek során a két elektródot egy kezdetben elsősorban elektronokat és gáz ionokat tartalmazó vezető csatorna (szikra csatorna) köti össze. Az elektródok anyaga a szikraplazma hatására erodálódik, melynek következtében az elektródanyag atomjaiból álló gőz jön létre a szikraközben. A gáz-környezet hűtő hatása, valamint táglás következtében az atomok lehűlnek majd nukleációs, kondenzációs és koagulációs lépéseken keresztül nanorészecskéket hoznak létre.

A szikrakisüléses nanorészecske generálásban rejlő tömegtermelési potenciál csak részben köszönhető az eljárás viszonylagos egyszerűségének. Ennél fontosabb, hogy a részecske előállítási folyamat könnyedén és kontrolláltan skálázható fel környezetbarát

módon, viszonylag alacsony költségek árán identikus generátor kamrák párhuzamos üzemeltetésével. A BUONAPART-E projektben Európa 21 kutatóhelye (köztük a Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékén működő csoportunk) dolgozott együtt a technika felskálázásán. A négy évig tartó együttműködés során a szikrakisüléssel nanorészecske generálás számos alaptudományi aspektusát megvizsgáltuk partnereinkkel, leküzdve számos felmerülő technikai kihívást is. Kutatócsoportunk feladatai közé tartozott az SDG-ben lezajló fundamentális folyamatok vizsgálata, különös tekintettel azokra, melyek a szikra plazmában valamint az elektródok felszínén játszódnak le.

Annak ellenére, hogy az SDG-k alapelve egyidős a benzinmotorokkal, a kimondottan nanorészecskék előállítására szolgáló generátorok csak 1988 óta léteznek Andreas Schmidt-Ott és kollégái munkájának eredményeként. Noha napjainkban SDG-k már kereskedelmi forgalomban is kaphatók, és a technikát számos csoport használta és használja, a részecskék kialakulásához vezető fundamentális folyamatokkal kapcsolatban még mindig vannak nyitott kérdések. Ennek egyik oka az egyes részecske-keletkezési szakaszok vizsgálatának nehézsége, ami különösen hangsúlyos a folyamat kezdeti szakaszában. A szikrakisüléseken alapuló nanorészecske keletkezés egy széles időskálán lezajló folyamat, ami megnehezíti a teljes jelenség vizsgálatát. Összehasonlításként: a részecskék keletkezése szekundumos, vagy szekundum alatti időskálán játszódik le, melyhez képest a szikrák tipikusan mikroszekundumos élettartama gyakorlatilag elhanyagolható. Mindazonáltal e rövid idő alatt is jellegzetes, időben változó folyamatok zajlanak le minden egyes szikrában, amelyek befolyásolják az elektródok erózióját és ezáltal a keletkező részecskékre is hatással vannak.

Az SDG-kre jellemző technikai és elvi korlátok a generátorban lezajló folyamatok vizsgálatára alkalmazható módszerekre is korlátokat szabnak. A megszokott generátor felépítés nem változtatható meg annak érdekében, hogy kísérleteket végezhessünk a szikra plazmában, mert ezáltal a részecske-keletkezés kondíciói is megváltoznának. Olyan kísérleti eljárásokat kell alkalmazni, melyek lehetőleg nagy időbeli feloldással képesek információt szolgáltatni a szikrában lezajló folyamatokról úgy, hogy a lehető legkevésbé befolyásolják azokat. E peremfeltételeket figyelembe véve a munkám során alkalmazott kísérleti módszerek magját olyan non-invazív, *in situ* eljárások adták, mint az időben és térben bontott optikai emissziós spektroszkópia (OES) és képalkotás, kiegészítve a szikra elektromos jeleinek (pillanatnyi áram és feszültség) folyamatos monitorozásával. E technikákkal lehetőség nyílt a részecskék keletkezését megelőző folyamatok vizsgálatára azok megzavarása nélkül, beleértve a szikra plazma *operando* vizsgálatát a nanoszekundumos időskálán. Az optikai elvű vizsgálatokat a keletkezett nanorészecskék *in situ* és *ex situ* vizsgálata, valamint a szikráztatásnak kitett elektródfelszín *ex situ* vizsgálata egészítette ki. A változatos kísérleti módszerek lehetővé tették, hogy a szikra

plazma tulajdonságait és a plazma elektródokra gyakorolt hatását különböző szemszögekből közelítsem meg. Munkám célja a nanorészecskék előállítására használt szikrakisülés karakterizálása volt, ezen belül a szikra plazma optikai emissziójának és morfológiájának vizsgálata, valamint a plazma összetételének, a plazmát alkotó specieszek koncentrációjának és hőmérsékletének meghatározása az idő és különböző kísérleti paraméterek függvényében. További célom volt az elektród erózió vizsgálata, beleértve az elektródok felszínén lezajló folyamatokat és a kisülési kör elektromos paramétereinek erózióra gyakorolt hatását. A fenti gondosan megválasztott kísérleti eszköztárral megszerzett információ hozzájárult ahhoz, hogy pontosabb képet kapjunk a szikrában lezajló folyamatokról, illetve elvezetett a szikrakisülések segítségével előállított részecskék tulajdonságainak még hatékonyabb kontrollálásához.

2. Kísérleti módszerek

Többféle SDG kialakítás létezik, amelyek bizonyos technikai részletekben eltérhetnek, de működési elvük és a fő építőelemek azonosak. Minden SDG központi eleme a kisülési kamra, valamint az elektromos áramkör, ami a szikrázást táplálja. A tipikusan rozsdamentes acélból készült, gáz-tömör kamrát¹ általában úgy alakítják ki, hogy lehetővé tegye az elektromos átvezetések, elektród-mozgatók, egyéb mérőműszerek csatlakoztatását, valamint tartalmazzon legalább egy betekintő ablakot optikai megfigyeléshez. Az elektródok elhelyezése a kamrán belül egyaránt lehet vízszintes vagy függőleges, és a szikraköz folyamatosan öblítő vivő gáz áramlási iránya szintén lehet keresztirányú, vagy koaxiális, lefelé, vagy felfelé irányuló. Az elektródok egymással szemben álló két vége közötti távolságot (vagyis a szikraköz méretét) egy vagy két eltolóval lehet beállítani. A kamrában atmoszferikus nyomást hoznak létre, a vivő gáz áramlási sebességét pedig általában egy tömegáram szabályozóval (Mass flow controller, MFC) kontrollálják.

Kísérleteimben a szikraköz méretét a 0,5-4,0 mm tartományban szabályoztam mikrométercsavarok segítségével. Az argon vagy nitrogén vivő gáz áramlási sebességét az 1-10 l/min tartományban változtattam. Minden kísérletemet atmoszferikus nyomáson végeztem, melyet egy vákuum pumpa és egy túszelep segítségével állítottam be és egy nyomásmérő segítségével monitoroztam. Kísérleteimben 6,35 mm illetve 3,00 mm átmérőjű, henger alakú elektródokat használtam lapos, vagy hegyezett (30°-os csúcshöszöggel) végekkel. A lapos végű elrendezésnél az eróziós hatás eloszlik az elektród teljes keresztmetszetén, míg a kihegyezett elektródok esetén a csúcs közelében koncentrálódik. Az elérni kívánt lehető legnagyobb részecske termelés miatt hatékony

¹ A kísérleteim túlnyomó többségében használt, a Pfeiffer Vacuum GmbH által gyártott kisülési kamra az EU FP7 keretprogramja által támogatott BUONAPART-E projekt keretein belül került kifejlesztésre.

erózió kívánatos, emiatt általában a lapos geometriát alkalmazzák SDG-kben. Ugyanakkor e geometriában az egymást követő szikrák „vándorolnak” az elektród felszínén, ami a szikra plazma pozicionális instabilitását okozza, ami megnehezíti az optikai elvű vizsgálatokat. Továbbá a szikrázás elektromos stabilitását is ronthatja, a folyamatosan változó felszíni tulajdonságok és az ennek következtében változó átütési feszültség miatt. A fentiek alapján elmondható, hogy hegyezett elektródok segítségével megbízhatóbb fundamentális információkat nyerhetünk a plazmáról, míg a lapos elektródok használata közvetlenebb kapcsolatot jelent a részecske-generálás standard körülményeivel. Emiatt a nagy helyzeti stabilitást igénylő kísérletekben hegyezett elektródokat használtam, míg azokban, amelyekben a fő hangsúly az elektród erózió, vagy a keletkező részecskéken volt, lapos elektródokat alkalmaztam.

A szikraköz elektromos táplálásáról egy egyszerű kondenzátortöltő áramkör gondoskodott. Egy, a kísérleteimben tipikusan 8-29 nF kapacitású kondenzátort (vagy kondenzátor bankot) egy nagyfeszültségű kondenzátortöltő tápegység töltött maximum 10 kV körüli feszültségre, jellemzően néhány, vagy néhány tíz milliamper töltőáram mellett. Mivel a szikraköz sorba van kötve a kondenzátorral, a kisülés akkor jön létre, amikor a kondenzátor feszültsége eléri a szikraköz átütési feszültségét. Ennek hatására egy bipoláris, oszcilláló kisülés jön létre, melynek frekvenciáját és csillapodási tényezőjét az áramkör ellenállása, induktivitása és kapacitása szabja meg. A tápegység a kisülés alatt is folyamatosan tölti a kondenzátort („szabadonfutó” üzemmód), de mivel a kisülés során a körben folyó áram erőssége (ami tipikusan néhány száz amper) sok nagyságrenddel nagyobb, mint a töltőáram erőssége, a töltési és kisülési ciklusok függetlennek tekinthetők egymástól. A szikrák ismétlési gyakoriságát a szikra-ismétlési frekvenciával szokás megadni, ami a töltőárammal és az átütési feszültség változtatásával szabályozható, ha feltételezzük, hogy az egyéb kísérleti paraméterek állandóak.

A szikra plazma jellemzésére irányuló kísérletekben rutinszerűen mértem az elektródok közti feszültség és a szikraközben folyó áram időbeli változását egy nagyfeszültségű szondával (pl. Agilent N2771B) és egy árammérővel (Pearson 110). Ezen elektromos méréseknek a szikrára jellemző elektromos jelalakok meghatározásán túl az egyéb kísérleti eszközök szinkronizálásában is nagy szerepe volt. A szikrák vizsgálata azok szabályozatlan kialakulása és tranziens jellege miatt pontos időbeli szinkronizációt igényel, amit a szikraköz átütését kísérő éles feszültségeséshez, vagy áramugráshoz rögzítve valósítottam meg, egy jelgenerátor (Stanford DG535) segítségével. A szikra morfológiájának, illetve optikai emissziójának időbontott vizsgálatát egy erősített CCD (ICCD) kamerával végeztem (Andor iStar 734-18F-03), tipikusan 50-500 ns időbeli felbontással. A morfológiai (gyors-fényképezés) vizsgálatokhoz a kamerát a megfelelő objektívekkel láttam el, míg az emissziós

spektroszkópiai mérésekhez a kamerát egy Andor Mechelle 5000 száloptikás spektrográffal kiegészítve használtam. Térben integrált mérések esetén a szikra fényét egy lencsével gyűjtöttem, míg a térben bontott mérésekhez a szikrát egy lencsével leképeztem, majd a kép különböző pontjaiba helyeztem a spektrográf optikai szálát. A spektroszkópiai elrendezés a 300-800 nm hullámhossztartomány vizsgálatát tette lehetővé, $\sim 0,125$ nm (435 nm-en) felbontással. A térbeli felbontás a spektroszkópiai mérésekben ~ 50 μ m volt. Az emissziós spektrumok plazma diagnosztikai felhasználása érdekében a spektroszkópiai rendszer spektrális érzékenységét egy NIST-kalibrált deutérium-halogén fényforrás (Ocean Optics Inc, DH-2000-CAL) segítségével kalibráltam. A kalibrációt minden mérési sorozat előtt ellenőriztem és szükség szerint megismételtem.

Az SDG-ben keletkező nanorészecskéket az *ex situ* elektronmikroszkópiás analízishez egy házi készítésű alacsony nyomású tehetetlenségi impaktorral, illetve elektrosztatikus úton választottam le hordozókra (tipikusan TEM gridekre). A nanorészecskék méreteloszlását a generálás után közvetlenül, *in situ* is meghatároztam, melyhez egy Grimm Aerosol Technik GmbH SMPS-C, illetve egy házi készítésű mozgékonyág szerinti részecske szeparátor és számláló (Scanning Mobility Particle Sizer, SMPS) SMPS rendszert használtam.

Az elektród-felszín eróziójának vizsgálatához egy laboratóriumunkban tervezett elektromos áramkört használtam, mely lehetővé tette kontrollált számú szikra keltését az SDG-ben. Ennek segítségével követtem a felszín morfológiájában egyetlen szikra hatására bekövetkező változásokat. A mérésekhez előre polírozott elektródokat használtam, melyeket szikráztatás előtt és után is optikai mikroszkópiával (Nikon Optiphot 100S), lézeres pásztázó mikroszkópiával (Keyence VK-X100K) és atomerő mikroszkópiával (PSIA XE-100) jellemeztünk. Vizsgáltuk az elektródok felszínén kialakult struktúrákat hosszan tartó szikrázás (több százezer szikra) után is, melyeket lézeres pásztázó mikroszkópiával (Keyence VK-X100K) karakterizáltunk.

A kísérletek során keletkező nagy mennyiségű mérési adat feldolgozásához, kiértékeléséhez és a plazma diagnosztikai számolásokhoz Origin szoftvert (Originlab Corporation), illetve saját készítésű cél-szkripteket használtam, melyeket MATLAB (MathWorks, Inc.) illetve Python programozási nyelveken írtam.

3. Eredmények

A nanorészecskék előállítására használt elektromos szikra plazmát, valamint a szikra elektródokra gyakorolt eróziós hatását vizsgáló kísérleteim során *in situ*, *non-invazív* eljárásokat használtam, a nanorészecskék keletkezését előidéző folyamatok megzavarása nélkül, kiegészítve a keletkező nanorészecskék karakterizálásával. A szikra

plazma tér- és időbeli változását gyors-fényképezés segítségével vizsgáltam. A néhány tíz nanoszekundumos illetve szub-mikroszekundumos időbeli felbontással készített képsorozatokból rekonstruáltam a plazma alakjának változását. Kimutattam, hogy az egy viszonylag jól körülhatárolt, hengerszerű csatornából diffúzzá, és szabálytalanná válik. A plazma csatorna átmérőjének időbeli változását és a plazma tágulási sebességét is meghatároztam, a spektrálisan integrált optikai emisszió térbeli eloszlásával együtt. Időben és térben bontott emissziós spektrumok analízisével meghatároztam a gerjesztési plazma hőmérsékletet és az elektron koncentrációt különböző térbeli és időbeli pontokban. Egy egyszerű szemi-empirikus plazma modell segítségével az egy szikra által erodált elektród anyag szikraközben jelenlévő koncentrációját is megbecsültem. Az optikai emissziós mérésekkel párhuzamosan a szikra áramát és feszültségét is folyamatosan regisztráltam, valamint meghatároztam a keletkező részecskék méreteloszlását. Korrelációt találtam az elektromos, optikai és részecske adatok között. Az egy, illetve több százezer szikra hatásának kitett elektródok eróziójának vizsgálatával megmutattam, hogy már egyetlen szikra hatására is komplex struktúrák alakulnak ki az elektródok felszínén, amelyek hosszantartó szikrázás (nagy számú szikra) hatására ön-rendeződő, szabályos mintázatokká alakulnak.

Munkám legfontosabb tudományos eredményeit a következő tézispontok összegzik:

I. *Gyors-fényképezés* alkalmazásával megvizsgáltam egy szikrakisüléssel nanorészecske generátorban réz elektródok között, nitrogén atmoszférában keltett szikra plazma morfológiájának időbeli változását. Megmutattam, hogy a szikra csatorna megtartja viszonylag szabályos, hengeres alakját mindaddig, míg elektromos áram folyik az elektródok között. A csatorna az idővel tágul, szélessége szuperszonikus sebességgel növekszik, ami közel lineárisan skálázódik a szikra energiájával. Azt találtam, hogy a szikra által emittált fény térbeli eloszlása nem egyenletes, a szikraközben egy maximális intenzitású axiális régiót, ún. „hot spot”-ot azonosítottam. Megmutattam, hogy e régió helye szinkronban van a pillanatnyi árammal és mindig az aktuálisan negatív polaritású elektród közelében található **[T1]**.

II. Térben és időben bontott *emissziós spektroszkópia* alkalmazásával, a generátor működésének megzavarása nélkül jellemeztem a szikrakisüléssel nanorészecske generátorban, argon atmoszférában létrehozott, réz nanorészecskék előállítására használt szikra plazmát. Meghatároztam a szikra „ív” fázisában (arc stage) a plazma gerjesztési hőmérsékletét és az elektron koncentrációt az idő függvényében. A hőmérséklet a 16600-20000 K, az elektron koncentráció pedig a $\sim 2 \times 10^{17}$ - $\sim 7 \times 10^{17}$ cm⁻³ tartományban változott. A szikra „utóizzás” fázisának (afterglow stage) leírásához megalkottam egy szemi-empirikus egyensúlyi plazma modellt. A modell segítségével meghatároztam a plazma hőmérsékletét és az elektron koncentrációt, valamint

megbecsültem a nanorészecske generátorban előállított réz atomok és ionok számkoncentrációját, melynek értékére azt kaptam, hogy az a 10^{14} cm^{-3} nagyságrendbe esik [T2]. Az „utóizzás” (afterglow) fázisban felvett emissziós spektrumokból a plazma-hőmérséklet változásának sebességét is meghatároztam, ami a fém atomok hűlési sebességeként értelmezhető. A hűlési sebességre mind argon [T2], mind nitrogén gázban 10^8 Ks^{-1} nagyságrendbe eső értéket kaptam [T3].

III. Megvizsgáltam egy szikrakisüléses nanorészecske generátor *elektromos tulajdonságait*, vagyis a feszültség és áram időfüggését, a teljes ellenállást, valamint a pillanatnyi disszipált teljesítményt és energiát. Megmutattam, hogy a kondenzátorban tárolt elektromos energiának csak egy része disszipálódik a szikraközben. A pillanatnyi áramból számolt (disszipált) szikra energia és a tárolt energia aránya 80% körül volt az általam vizsgált generátorban [T1]. Eredményeim azt bizonyítják, hogy az elektródok tömegfogyása a pillanatnyi áramból számolt szikra energiával korrelál, nem pedig a kondenzátorban tárolt energiával, ahogy azt a szakirodalomban általában feltételezik. Ha a kisülési kör elektromos paraméterei (ellenállás, induktivitás, kapacitás) állandóak, az áramból számolt szikra energia arányos a tárolt energiával. Emiatt egy adott szikra-generátorban mindkét mennyiség használható az eróziós folyamat leírására, viszont csak az áramon alapuló mennyiség használható különböző generátorok összehasonlítására [T4].

IV. Kontrollált számú szikrakisülés – egytől több százezer szikráig – kitett fém elektródok (kiemelten Ni és Cu) *felületi morfológiájának* változását nyomon követve megmutattam, hogy a szikra-generátorokban alkalmazott elektródok felületi morfológiájának analízisével hasznos információk nyerhetők. Megmutattam, hogy már egyetlen oszcilláló szikra (az ún. egy-szikra) is komplex felületi morfológiát hoz létre, melyet több száz kráter dominál, és megjelennek ún. hullámos (undulált) és dendritikus struktúrák is. A kráterek mérete és száma függ a szikraközben mérhető áram erősségétől [T5]. Növelve a szikrák számát az elektródok között, szorosan elhelyezkedő, ön-rendező mintázatok kialakulását figyeltem meg nikkelt, arany és ezüst elektródokon [T6]. Eredményeim arra utalnak, hogy a szikra energia (vagyis a szikraközbe pumpált elektromos energia) döntően az elektródok anyagának megolvastására és annak az elektród-felületen történő átrendeződésére fordítódik, mindössze egy kis része hasznosul anyageltávozásra és ezáltal nanorészecskék keltésére [T5].

V. Megvizsgáltam, hogy milyen hatással van a szikrakisüléses nanorészecske generátor fő kontroll-paraméterei közül kettőnek (a szikraköz méretének és a töltő áram erősségének) változtatása nitrogén atmoszférában előállított réz és arany

nanorészecskék méreteloszlására. Azt találtam, hogy a szikraköz méretének és ezáltal a szikra energiájának növelésével az előállított részecskék mérete maximumot mutat. Megmutattam, hogy ez a viselkedés korrelál a szikra plazma fém atomjai, az „utóizzás” (afterglow) fázisában mérhető, integrált emissziójának változásával. A megfigyelt tendenciák arra utalnak, hogy a szikra energia egyszerű növelésével az egyetlen szikrával létrehozható fém atomok koncentrációja nem növelhető folyamatosan egy adott szint fölé. Az eredményeket a szikra csatorna tágulásának és az elektród anyag eróziójának a szikra energia növelésével jelentkező, egymással ellentétes hatásával magyaráztam [T3].

Publikációk

A tézispontok alapjául szolgáló közlemények:

[T1] J. M. Palomares, **A. Kohut**, G. Galbács, R. Engeln, and Zs. Geretovszky: “A time-resolved imaging and electrical study on a high current atmospheric pressure spark discharge” *Journal of Applied Physics*, **118**, 233305 (2015).

[T2] **A. Kohut**, G. Galbács, Zs. Márton and Zs. Geretovszky: “Characterization of a copper spark discharge plasma in argon atmosphere used for nanoparticle generation” *Plasma Sources Science and Technology*, **26** 045001 (2017).

[T3] **A. Kohut**, L. Ludvigsson, B. O. Meuller, K. Deppert, M. E. Messing, G. Galbács, and Zs. Geretovszky: “From plasma to nanoparticles: optical and particle emission of a spark discharge generator” *Nanotechnology*, DOI: 10.1088/1361-6528/aa8f84 (2017).

[T4] **A. Kohut**, L. P. Villy, T. Ajtai, G. Galbács, and Zs. Geretovszky: “The effect of circuit resistance on the particle output of a spark discharge nanoparticle generator” bírálat alatt a *Journal of Aerosol Science*-ben (2017).

[T5] **A. Kohut**, M. Wagner, M. Seipenbusch, Zs. Geretovszky, and G. Galbács: “Surface features and energy considerations related to the electrode erosion processes in a spark discharge nanoparticle generator” bírálat alatt a *Journal of Aerosol Science*-ben (2017).

[T6] M. Wagner, **A. Kohut**, Zs. Geretovszky, M. Seipenbusch, and G. Galbács: “Observation of fine-ordered patterns on electrode surfaces subjected to extensive erosion in a spark discharge” *Journal of Aerosol Science*, **93** 16-20 (2016).

Egyéb publikációk, válogatott poszterek és konferencia előadások

B. Hopp, G. Kecskeméti, T. Smausz, T. Ajtai, A. Filep, N. Utry, **A. Kohut**, Z. Bozóki, G. Szabó: *Characterization of excimer laser ablation generated pepsin particles using multi-wavelength photoacoustic instrument*, Appl. Phys. A-Mater. **107**(2) (2012) 429-435

Geretovszky Zsolt, **Kohut Attila** és Galbács Gábor: *Európai kooperációban fejlesztett szikrakisüléssel generált nanorészecske generátor és jellemzése*, XII. Magyar Aeroszol Konferencia, Szeged, 2015. március 18-20. konferencia kötet 63-64 oldal (**ISBN 978-963-306-364-4**)

Kohut Attila, Galbács Gábor, Linus Ludvigsson, Bengt O. Meuller, Maria E. Messing, Knut Deppert és Geretovszky Zsolt: *Spektroszkópiai és részecske tulajdonságok kapcsolata szikrakisüléssel generált nano aeroszolnál*, XII. Magyar Aeroszol Konferencia, Szeged, 2015. március 18-20. konferencia kötet 65-66 oldal (**ISBN 978-963-306-364-4**)

Kohut Attila, Hopp Béla, Kopniczky Judit, Kószó Eszter, Szörényi Tamás, Geretovszky Zsolt: *Nanostruktúrált ezüst rétegek lézeres kialakítása és alkalmazásuk a száloptikás érzékelésben*, Kvantumelektronika 2014: VII. Szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről, Budapest, 2014. november 28. konferencia kötet P43 (2 oldal) (**ISBN 978-963-642-697-2**)

Kohut Attila, Metzinger Anikó, Márton Zsuzsanna, Linus Ludvigsson, Knut Deppert, Galbács Gábor, Geretovszky Zsolt: *Szikrakisüléssel generált nanorészecske generátor emissziós spektroszkópiai vizsgálata Cu nanorészecskék előállításában*, XI. Magyar Aeroszol Konferencia, Debrecen, 2013. október 28-30. konferencia kötet 84-85 oldal (**ISBN 978-963-8321-50-3**)

Kohut Attila, Metzinger Anikó, Márton Zsuzsanna, Kopniczky Judit, Galbács Gábor, Geretovszky Zsolt: *Nanorészecskék folyadékfázisú lézer ablációs előállítása és vizsgálata*, 19th International Symposium on Analytical and Environmental Problems, Szeged, 2013. szeptember 23. konferencia kötet 289-292 oldal (**ISBN 978-963-315-141-9**)

A. Kohut, G. Galbács, L. Ludvigsson, B.O. Meuller, M.E. Messing, K. Deppert, and Zs. Geretovszky: *On the correlation of the emission spectrum and nanoparticle yield in a spark discharge generator*, European Aerosol Conference 2015, Milan, Italy, 2015. szeptember 6-11. **#3ANT_P025**

A. Kohut, G. Galbács, L. Ludvigsson, B.O. Meuller, M.E. Messing, Zs. Márton, K. Deppert, and Zs. Geretovszky: *On the correlation of spectral emission and nanoparticle yield in a spark discharge generator*, Aerosol Technology 2015, Tampere, Finland, 2015. június 15-17. **#P5**

A. Voloshko, **A. Kohut**, J-Ph. Colombier, G. Galbács, Zs. Geretovszky and T.E. Itina: *Numerical and experimental study of a spark discharge used for nanoparticle production*, Aerosol Technology 2015, Tampere, Finland, 2015. június 15-17. **#0094**

Galbács, G.; **Kohut, A.**; Buzás, A.; Geretovszky, Z: *Temporally and spatially resolved emission spectroscopic investigation of a spark discharge plasma used for copper nanoparticle generation*, European Winter Conference on Plasma Spectrochemistry 2015, Münster, Germany, 2015. február 22-26. #**IN3-P006**

A. Kohut, T. Szörényi, B. Hopp, J. Kopniczky, and Zs. Geretovszky: *One-step generation of nanostructured Ag layers and their use for fiber-optic biochemical sensing*, 2nd International Conference on Nanotechnology in Medicine, London, United Kingdom, 2014. február 26-28. poszter #**MED-74**

A. Kohut, A. Metzinger, G. Galbács, L. Ludvigsson, B.O. Meuller, M.E. Messing, Zs. Márton, K. Deppert, and Zs. Geretovszky: *Emission spectroscopic investigation of the spark discharge used for Cu nanoparticle production*, European Aerosol Conference, Prague, Czech Republic, 2013. szeptember 1-6. #**B148**