

PhD értekezés tézisei

Plazmonikus struktúrák tervezése, előállítása és alkalmazása

Szerző:

Sipos Áron

Témavezető:

Dr. Csete Mária

egyetemi adjunktus



Fizika Doktori Iskola

Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Kar

Szeged, 2012

Bevezetés

Felületi plazmonnak nevezzük a dielektrikumok és vezetők (legtöbb esetben fém) határfelületén a kivilágító fény hatására létrejövő rezonáns kollektív elektromos töltésszűrés. A plazmonika, mint a fotonika plazmonokat tárgyaló ága ezen rezgések létrehozásával, karakterizálásával és befolyásolásával foglalkozik. A miniaturizálás fejlődésével elérhetővé vált eléggé kicsi méretű struktúrák kialakítása, ezekből olyan plazmonikus struktúrákon alapuló eszközök állíthatók össze, amelyeknél a terjedésből adódó inherens veszteség a működést nem gátolja.

A plazmonok egyedi tulajdonságain alapuló eszközök széles felhasználási kört fednek le, a hullámhosszal összemérhető periódusú plazmonikus struktúrák felhasználásával számos optikai elem, például kétdimenziós tükrök, nyalábosztók hozhatóak létre. A plazmonikus struktúrák az adattárolásban, mikroszkópiában és napelemek hatásfokának növelésére is felhasználhatóak. Jelentős alkalmazási terület a biológiai anyagok detektálása, a bioszenzorokban alkalmazott struktúrák jelentős hányadát a periodikus struktúrák adják.

Azonos frekvenciájú foton és plazmon esetén a plazmon $k_{plazmon}$ hullámvektora nagyobb, mint a fotoné, a felületi plazmon diszperziós relációja miatt, így a plazmonok keltése csak akkor lehetséges, ha ezt a különbséget valahogyan kompenzáljuk. Erre a problémára több megoldás is létezik, a legelterjedtebb kísérleti eljárásban prizmat használnak erre a célra. A fény és a plazmon hullámvektora felületi modulációt, leginkább fémrácsot használva csatolható. Rács segítségével a fény egy eszközbe be és kicsatolható, így lehetőséget nyújt plazmonikus áramkörök létrehozására, ami a jelenleg elérhető mérethatároknál kisebb elektronikai eszközök felé mutat, ami a fény alapú számítástechnika előképe lehet.

Periodikus nanostruktúrák kézzel tartható előállítására a sokrétű plazmonikai felhasználási terület szempontjából fontos. A lézeres anyagmegmunkálási eljárásokkal egy lépésben viszonylag nagy felületen alkalmazhatóak az anyag átstrukturálására. Lézeres litográfiai eljárásokban a felület maradandó módosítása a lézer paramétereitől és az alkalmazott anyagtól függően lehet abláció és/vagy fotokémiai változás az adott anyagban. Az ablációs eljárások általában egylépéses viszonylag gyors és egyszerűbbnek tekinthető technikák, de bonyolultabb struktúrák előállítására ezzel a módszerrel is nehézkes. Összetett szerkezetű felületek állíthatóak elő rezisztív többlépéses litográfiájával. A lézeres többlépéses litográfiai eljárások a legtöbb esetben bonyolult felszerelést és nagy szaktudást igényelnek, megfelelő méretű megmunkálás pedig nagyfokú tisztasággal rendelkező laboratóriumokban valósítható meg. Lézeres interferencia litográfia alkalmazásával hullámhossz nagyságrendű

struktúrák állíthatók elő. A lézeres alkalmazások közös hátránya, hogy a nanométeres tartományba eső felületmódosítás a diffrakciós határ miatt csak nehezen befolyásolható önszerveződő folyamatok segítségével lehetséges.

Jól kontrollálható viszont a lézeres kolloidgömb litográfiával létrehozható felület. A módszer lényege, hogy a megmunkálandó felületre különböző technikákkal kolloid gömböket visznek fel, ezek a rájuk eső lézerefényt fókuszálják és módosítják a szubsztrát felületét. A legtöbb esetben a gömbök szorosan illeszkedő hatszöges elrendezésben monorétegben helyezkednek el a felületen, így a kivilágítás ezt a szimmetriát örökíti tovább. Ettől eltérő mintázat csak maszkfelületekkel való terelessel vagy a gömbök közötti kémiai erők befolyásolásával érhető el.

A plazmonikus detektorok kutatásának eredményeként az első plazmon rezonancia spektroszkópián alapuló detektor 90-es évek elején jelent meg a kereskedelemben. A svéd Biacore céget több más követte az évek folyamán, így a folyamatos fejlesztéseknek köszönhetően az allergénektől és tumormarkerektől kezdve (Spreeta) antitesteken keresztül (Autolab Esprit) baktériumokig (Biacore 3000) biológia anyagok széles skálája mutatható ki. Az ilyen típusú eszközök általában egy áramlási csőben keringetett megfelelő koncentrációjú anyag optikai tulajdonságait vizsgálják meg és előzetes hitelesítés alapján következtetnek a mennyiségre. Többcsatornás készülékek is léteznek, ezekkel egyszerre akár több mérés is végezhető egy időben, de ezeknél viszonylag bonyolult a mérendő anyag megfelelő keringetése.

Ezen eszközöknél egyszerűbb lehet az úgynevezett lab-on-chip koncepción alapuló plazmonikus detektor, amikor egy felületen akár többféle, de jól meghatározott anyag kimutatására célzottan kifejlesztett detektorrészt helyeznek el, és a fény ezekbe való be- és kicsatolása pl. plazmonikus struktúrákkal megoldott. Ezek akár szárazon is működhetnek és litográfiás eljárásokkal gyorsan és kis költséggel nyomtathatóak lehetnek.

Munkám során a fent kifejtett elgondolás mentén azt vizsgáltam, hogy fém és polikarbonát felületen előállított rácsok hogyan alkalmazhatóak biodetektálásra. Az egyszerű rácsfelülettől a bonyolultabb, részletgazdagabb felületek előállítása felé haladva kompozit maszk alapú kolloid litográfiás elrendezéssel kísérletileg vizsgáltam, hogy lineáris struktúra hogyan állítható elő és a mintázat méretparaméterei milyen módon változtathatóak. Végesem modellezéssel a maszkos elrendezésnél kevesebb lépésből álló kombinált litográfiás elrendezés lehetőségeit tanulmányoztam, mellyel az előző megoldásnál egyszerűbb és szintén szabályozható módon állítható elő lineáris struktúra. A plazmonikus struktúrákat tanulmányozva kerestem, hogy mely tulajdonságok esetében alkalmasak sztreptavidin detektálására.

Célkitűzések

A periodikus és nanométeres plazmonikus struktúrákra vonatkozó irodalom áttekintése alapján levonható a következtetés, mely szerint a periodikus és komplex, azaz a diffrakciós limit alatti mérettartományba eső komponensekből felépülő, ugyanakkor a fény hullámhosszával összemérhető periódussal rendelkező struktúrák jelenleg is nagyon széles felhasználási köre még tovább bővíthető. Az ilyen típusú komplex struktúrák létrehozására alkalmas technikák általában időigényesek és a legtöbbször jelentős anyagi ráfordítás sem elhanyagolható szempont. Mindezek alapján szükségesnek látszik új periodikus és komplex plazmonikus struktúrák létrehozására alkalmas eljárások kidolgozása és ezen eljárások megvalósításához új kísérleti elrendezések összeállítása.

Az egyes nanofotonikai és nanoplazmonikai felhasználási területek speciális komplex struktúrákat igényelnek. Számos elméleti módszer alkalmas a felületi plazmonikus struktúrák optikai tulajdonságokra gyakorolt hatásának leírására. A létrehozott nano- és plazmonikus struktúráknak gyakorlati felhasználását megelőzi hatásuk kísérleti és elméleti módszerekkel történő vizsgálata, az előállított felületek biomolekula detektálásra való alkalmazhatóságának tesztelése.

Ennek fényében a következő célokat tűztem ki:

Első célom vizsgálni a lézeres besugárzással létrehozható fémrácsok arany-ezüst rétegvastagságaitól függő felületi minőségét, mely a biodetektáláshoz szükséges ideális rétegekombináció meghatározásához szükséges. Célom kimutatni ezen felületek felületi plazmon rezonancia spektroszkópiás (surface plasmon resonance spectroscopy, SPRS) vizsgálatával, hogy a fémrácsok plazmonikus biodetektorként alkalmazhatók.

Második célom meghatározni azokat a lézeres strukturálási paramétereket, melyekkel bimetál filmre felvitt polimer réteg felületi topográfiája hangolható. SPRS módszerrel vizsgálni kívántam polikarbonát rács biodetektorként való alkalmazását, és hogy hogyan változik a sztreptavidin detektálásának érzékenysége a vonalas polikarbonát rácsra felvitt molekulához kötött arany részecék esetén.

Harmadik célom polimer mesterrácsra forgatva bevonással felvitt kolloid gömbökön alapuló kompozit maszk készítése, és ennek homogén lézeres kivilágításával vonalas elrendezésű lyukmintázat létrehozása. Tervezem a lineáris lyukmintázat dielektrikumok detektálására alkalmas szenzorfelületként való tesztelését.

Negyedik célom végeselem modellezéssel az arany filmre helyezett arany és Stöber-kvarc kolloid részecskékből képezett monorétegek két interferáló lézernyalábbal történő kivilágításának vizsgálata, a létrejövő mintázat tulajdonságainak a monoréteg és a megvilágítás paramétereitől való függésének meghatározása. Tervezem az így létrehozható lineáris komplex struktúrák plazmonikus hatásának elméleti tanulmányozását.

Alkalmazott módszerek

Fém bimetál filmek és bimetál filmre felvitt polikarbonát rétegben rácsok előállítására megmunkálására a kétnyaláb interferencia módszer alkalmaztam. Előnye, hogy egyszerűbb elemekkel, költséghatékonyabban, rugalmasan változtatható módon állítható elő megfelelő periódusú struktúra. Két koherens, azonos hullámhosszú, ugyanazon beesési síkban adott szögben találkozó nyaláb interferálva csíkrendszert hoz létre. A kísérletek során a módszernek kétféle megvalósítását alkalmaztam. Az első elrendezés alkalmazása során tükrök segítségével hozunk létre interferencia-mintázatot a megmunkálandó felületen, a másik a mesterrácson alapuló elrendezés volt. Az előnyöket és hátrányokat figyelembe véve a tükrök alkalmazásán alapuló módszerrel a nagyobb energiasűrűséget igénylő fémfelületeken, míg a rácsot alkalmazó elrendezéssel a polikarbonáttal bevont mintákon állítottunk elő periodikus struktúrákat. Az alkalmazott fényforrás egy impulzusüzemű Nd:YAG (Spectra Physics Qanta Ray Pro, 10 Hz) lézer volt, negyedik harmonikusának $\lambda_{SH} = 266$ nm hullámhosszú, $\tau = 10$ ns impulzushosszú fényével munkáltuk meg a mintafelületet.

A felhasznált mintafelületek alapja NBK7 típusú interferometrikusan sima üveghordozóra (Geodasy és EKSMA) vákuumpárolgatott (Optilab Kft.) arany és ezüst nemesfém réteg volt, a legtöbb esetben ezüst-arany bimetál réteget alkalmaztunk különböző rétegekombinációkban. A fémfelületeket egyes esetekben polikarbonát réteggel is bevontuk. Ennek előnye, hogy a fémeknél alacsonyabb a roncsolási küszöbe, így rendezett és jól kontrollálható rácsok hozhatók létre a felületen kis energiasűrűségeknél. A polikarbonát réteget az ún. spin-coating, forgatva bevonás technikával vittük fel a felületre. Ugyancsak a forgatva bevonás technikáját használtuk kvarc kolloid gömbök a rácsok felületére való felvitelénél. Itt a rács völgyeinek adhéziója és a felület periodikus topográfiája biztosítja a gömbök rendezettségét. A rács völgyeibe felvitt gömbök alkotta komplex maszkot KrF excimer lézerrel világítottam ki, majd a létrehozott lyukmintázat vizsgálata után további kolloid gömbökkel vagy polikarbonát réteggel vontam vissza a már említett módszerek szerint. Kolloidgömb litográfia modellezésénél Stöber-kvarc és fém kolloidgömböket használtam, a kísérleteket Stöber-kvarc gömbökkel végeztem el.

A létrehozott rétegekombinációk és megmunkált mintafelületek gyengített teljes visszaverődés (ATR) módszerén alapuló plazmon rezonancia spektroszkópiái (SPRS) vizsgálatára a hagyományos Kretschmann-féle elrendezés egy módosított változatát építettük meg. A rétegek felületi topográfiájának vizsgálatára az atomi erő mikroszkópia (AFM) módszerét alkalmaztam. Méréseim során a dinamikus ún. tapping üzemmódot használtam, melynek során a tú statikus kontakt móddal szemben nem érintkezik közvetlenül a felülettel, így kényesebb, sérülékenyebb, akár élő biológiai mintafelületek is mérhetők ezzel a módszerrel. A fáziskép segítségével a felületen elhelyezkedő különböző anyagokat lehet feltérképezni az oszcilláció fázisának a vezérlő jelzéshez képest mért változásából.

A készített mintákat biológiai anyagok detektálására használtuk, vizsgáltuk a tiszta és arany részekével jelölt sztreptavidin kis mennyiségű kimutatását különböző esetekben. A mintákra való anyagfelvitel minden esetben frissen készült oldatok használatával végeztük. A sztreptavidin és biotin között az egyik legerősebb nem kovalens kötés jön létre, így a biotin mennyiségének szabályozásával a felülethez kötött sztreptavidin mennyisége, és így a jelölő arany mennyiség állandósága jól befolyásolható.

Elméleti módszereket is alkalmaztam a felületeken mért SPRS jel elemzésére illetve a kolloid gömb monorétegek kivilágításával elérhető mintázat tanulmányozására. A véges elem módszer (Finite Element Method, FEM) egy numerikus számítási eljárás, mellyel meghatározott parciális differenciálegyenletek közelítő megoldásait lehet kiszámolni egy jól definiált térháló csomópontjaiban, amely megoldás a metszéspontok közötti térre extrapolálható. FEM módszerrel meghatároztam, hogy kolloid részecskékből képezett monorétegek két interferáló lézernyalábbal való kivilágítása hogyan befolyásolja a létrejövő mintázat tulajdonságait, valamint periodikus lyukmintázatokra a felület transzmissziójának hullámhosszra való érzékenységet.

A mintafelületek tervezésére, modellezésére illetve az SPRS mérések során kapott rezonanciagörbék elemzésére, analitikus számítási módszereket is alkalmaztunk. Az analitikus számolásra a transzfer mátrix módszert (transfer matrix method, TMM) használtam, mellyel vékonyréteg és vékonyrétegek kombinációjának reflexiója, transzmissziója és abszorpciója egyszerűen számolható. A módszer lényege, hogy a rétegek határán egy megfelelő transzfer mátrix segítségével az elektromágneses tér reflexiója, transzmissziója pontosan számolható, több réteg esetén pedig a teljes rendszerre vonatkozó mátrix kiszámítható.

Új tudományos eredmények

1.(a) Különböző összetételű ezüst és arany bimetál réteggel bevont üveghordozón készített 900 nm periódusú rácsok atomi erő mikroszkópos vizsgálatával igazoltam, hogy a felületen létrehozható struktúra minősége függ az egyes fémrétegek vastagságától [T1].

1.(b) A fedetlen és sztreptavidin molekula-réteggel bevont fémrácsok módosított Kretschmann-féle elrendezésben végzett szögfüggő plazmon rezonancia spektroszkópiái (SPRS) vizsgálatával kimutattam, hogy a periodikus felületi struktúrákat tartalmazó bimetál fémrétegek plazmonikus detektor-elemként alkalmazhatók [T1].

2.(a) Kimutattam, hogy a bimetál filmre forgatva bevonás módszerével felvitt vékony polikarbonát dielektrikum réteg mesterrácsos elrendezésben kivilágítása hatására kialakuló felületi topográfia moduláció hangolható a kísérleti paraméterekkel (lövészám, energiasűrűség, polarizáció) [T2].

2.(b) Igazoltam, hogy az s-polarizált fényvel létrehozható lineáris polikarbonát-rácscsal fedett bimetál réteg plazmonikus detektor-elemként alkalmazható kis mennyiségű sztreptavidin plazmon rezonancia spektroszkópia módszerével történő kimutatására. SPRS

vizsgálattal és végeelem módszerrel igazoltam, hogy a sztreptavidin molekula kolloid-részecskével történő jelölésével a detektálás érzékenysége növelhető [T3].

3.(a) A 416 nm és 833 nm periódusú lineáris polikarbonát rácsokra a forgatva bevonás módszerével felvitt 250 nm és 500 nm átmérőjű Stöber-kvarc kolloid gömbök alkotta kompozit maszk lézeres megvilágításával igazoltam, hogy többlépcsős kísérleti eljárással lineáris lyukmintázat hozható létre [T4].

3.(b) A lyukmintázat utólagos dielektrikum kolloid részecske- és polimer-réteggel történő bevonásával igazoltam, hogy a kompozit maszk alkalmazásával előállított szenzor-felület dielektrikum rétegek detektálására alkalmazható [T4].

4.(a) Arany filmre helyezett arany és Stöber-kvarc anyagú kolloid gömbök monorétegének kétnyalábos interferencia-mintázattal kivilágításának végeelem módszerrel történő modellezésével igazoltam, hogy optikai eljárással is létrehozható lineáris lyukmintázat. Kimutattam, hogy a d távolságra elhelyezkedő gömbök monorétegének $(1, 0, 0)$ irányához képest az interferencia-maximumok irányát változtatva a gömbök közötti $[d/2]/[\sqrt{3}d/2]$ távolsággal összemérhető periódusú, egymástól $[d/\sqrt{3}d]$ távolságra elhelyezkedő nano-objektumok lineáris mintázatát lehet létrehozni. Kimutattam, hogy a kivilágító fény 400 nm vagy 532 nm hullámhosszától és cirkuláris vagy lineáris polarizációjától függetlenül kétnyalábos interferencia-mintázattal való kivilágítás esetén a gömbök alatti közeltér erősítése nagyobb, mint a homogén kivilágítással elérhető értékek [T5, T6].

4.(b) Arany gömb esetén igazoltam, hogy az 532 nm-es hullámhosszon való kivilágításakor a létrehozható struktúra mérete a gömbátmérővel csökken. A lyukak és lyukpárok alkotta hatszöges és négyszöges mintázatok spektrális hatásának végeelem modellezésével bizonyítottam, hogy a ~ 10 nm átmérőjű a lyukak és a lyukakból képezett mintázat geometriája már kimutathatóan befolyásolja az objektumokat tartalmazó vékony aranyfilm transzmissziós spektrumát, amely a specifikus bioszenzorizációs alkalmazásokat elősegítheti [T5].

4.(c) Arany filmre helyezett 500, 250 és 100 nm átmérőjű Stöber-kvarc gömbök esetén igazoltam, hogy a homogén nyalábbal kivilágítás kör alakú nano-objektumokat eredményez cirkuláris polarizáció esetében mindkét vizsgált hullámhosszon, míg a lineáris polarizált nyaláb hatására létrejövő objektumok nagyobb ellipticitást mutatnak 532 nm hullámhosszon, mint 400 nm-en. Kétnyalábos interferencia-mintázattal való kivilágítást alkalmazva elliptikus lyukakból álló lineáris mintázat hozható létre lineáris polarizációval, cirkuláris polarizáció esetén pedig a köralakot jobban közelítő nanolyukak és nanoholdak együttes mintázata állítható elő [T6].

Publikációk

A tézispontokhoz kapcsolódó, referált folyóiratokban megjelent közlemények:

[T1] M. Csete, A. Kőházi-Kis, Cs. Vass, Á. Sipos, G. Szekeres, M. Deli, K. Osvay, Zs. Bor: “*Atomic force microscopical and surface plasmon resonance spectroscopical investigation of sub-micrometer metal gratings generated by UV laser based two-beam interference in Au-Ag bimetallic layers*”, Applied Surface Science, **254**(19), p. 7662-7671 (2007).

[T2] M. Csete, Á. Sipos, A. Kőházi-Kis, A. Szalai, G. Szekeres, A. Mathesz, T. Csákó, K. Osvay, Zs. Bor, B. Penke, M. A. Deli, Sz. Veszélka, A. Schmatulla, O. Marti: “*Comparative study of sub-micrometer polymeric structures: Dot-arrays, linear and crossed gratings generated by UV laser based two-beam interference, as surfaces for SPR and AFM based bio-sensing*”, Applied Surface Science **254**(4), p. 1194-1200 (2007).

[T3] Á. Sipos, H. Tóháti, A. Mathesz, A. Szalai, Sz. Veszélka, M. A. Deli, L. Fülöp, A. Kőházi-Kis, M. Csete, Zs. Bor: “*Effect of nanogold particles on coupled plasmon resonance on biomolecule covered prepatterned multilayers*”, Sensor Letters **8**, p. 512-520 (2010).

[T4] Á. Sipos, H. Tóháti, A. Szalai, A. Mathesz, M. Görbe, T. Szabó, M. Szekeres, B. Hopp, M. Csete, I. Dékány: “*Plasmonic structure generation by laser illumination of silica colloid spheres deposited onto prepatterned polymer-bimetal films*”, Applied Surface Science **225**(10) p. 5138-5145 (2009).

[T5] M. Csete, Á. Sipos, A. Szalai, G. Szabó: “*Theoretical Study on Interferometric Illumination of Gold Colloid Sphere Monolayers to Produce Complex Structures for Spectral Engineering*”, IEEE Photonics Journal, **4**(5) p. 1909-1921 (2012).

[T6] Á. Sipos, A. Szalai, M. Csete: “*Integrated lithography to prepare periodic arrays of nano-objects*” Applied Surface Science, online megjelent, DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.11.078 p. 1-6. (2012).

További, referált folyóiratban megjelent közlemény:

1. H. Tóháti, Á. Sipos, G. Szekeres, A. Mathesz, A. Szalai, P. Jójárt, J. Budai, Cs. Vass, A. Kőházi-Kis, M. Csete, Zs. Bor: “*Surface plasmon scattering on polymer-bimetal layer covered fused silica gratings generated by laser-induced backside wet etching*”, Applied Surface Science **255**(10) (2009) p. 5130-5137.

2. Deli MA, Veszélka S, Csiszár B, Tóth A, Kittel A, Csete M, Sipos A, Szalai A, Fülöp L, Penke B, Abrahám CS, Niwa M.: “*Protection of the Blood-Brain Barrier by Pentosan Against Amyloid- β -Induced Toxicity*”, Journal of Alzheimers Disease **22** (2010) p. 777–794.

3. M. Csete, Á. Sipos, F. Najafi, X. Hu and K. K. Berggren: “*Numerical method to optimize the polar-azimuthal orientation of infrared superconducting nanowire single-photon detectors*”, Applied Optics, Vol. 50/31 (2011) p. 5949-5956.

4. György B, Módos K, Pállinger E, Pálóczi K, Pásztói M, Misják P, Deli MA, Sipos A, Szalai A, Voszka I, Polgár A, Tóth K, Csete M, Nagy G, Gay S, Falus A, Kittel A, Buzás EI: “*Detection and isolation of cell-derived microparticles are compromised by*

protein complexes due to shared biophysical parameters”, Blood 117(4) (2011) p. E39-E48.

5. M. Merő, Á. Sipos, G. Kurdi, and K. Osvay: “*Generation of energetic femtosecond green pulses based on an OPCPA-SFG scheme*”, Optics Express 19(10) (2011) p. 9646-9655.

6. M Csete, A Szalai, Á Sipos, G Szabó: “*Impact of polar-azimuthal illumination angles on efficiency of nano-cavity-array integrated single-photon detectors*” Optics Express 20(15) (2012) p. 17065-17081.

7. M Csete, Á Sipos, F Najafi, K K Berggren: “*Optimized polar-azimuthal orientations for polarized light illumination of different superconducting nanowire single-photon detector designs*” Journal of Nanophotonics 6(1) (2012) p. 063523.

8. Edit Csapó, Rita Patakfalvi, Viktória Hornok, László Tamás Tóth, Áron Sipos, Anikó Szalai, Mária Csete, Imre Dékány: “*Effect of pH on stability and plasmonic properties of cysteine-functionalized silver nanoparticle dispersion*” Colloids and Surfaces B-Biointerfaces 98 (2012) p. 43-49.

9. A Szalai, Á Sipos, E Csapó, L Tóth, M Csete, I Dékány: “*Comparative study of plasmonic properties of cysteine functionalized gold and silver nanoparticle aggregates*” Plasmonics (2012) in press DOI: 10.1007/s11468-012-9420-y p. 1-10.

10. T. Csizmadia, B. Hopp, T. Smausz, J. Kopniczky, I. Hanyecz, Á. Sipos, M. Csete, G. Szabó: “*Possible application of laser-induced backside dry etching technique for fabrication of SERS substrate surfaces*”, Applied Surface Science (2012) in press, DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.12.037, p. 1-7.

Fontosabb konferenciakiadványok:

11. M. Csete, Á. Sipos, A. Szalai, A. Mathesz, M. A. Deli, Sz. Veszélka, A. Schmatulla, A. Kőházi-Kis, K. Osvay, O. Marti, Zs. Bor: “*Bio-sensing based on plasmon-coupling caused by rotated sub-micrometer gratings in metal-dielectric interfacial layers*” Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies V. Edited by Vo-Dinh, Tuan; Lieberman, Robert A.; Gauglitz, Günter. Proceedings of the SPIE, Volume 6755, pp. 67550X (2007.)

12. Mária Csete; Áron Sipos; Faraz Najafi; Karl K. Berggren: “*Polar-azimuthal angle dependent efficiency of different infrared superconducting nanowire single-photon detector designs*” Infrared Sensors, Devices, and Applications; and Single Photon Imaging II, Edited by Paul D. LeVan; Ashok K. Sood; Priyalal S. Wijewarnasuriya; Manijeh Razeghi; Jose Luis Pau Vizcaíno; Rengarajan Sudharsanan; Melville P. Ulmer; Tariq Manzur, Proceedings of the SPIE, Volume 8155, pp. 81551K (2011)

13. Áron Sipos, Anikó Szalai, Mária Csete “*Integrated lithography to prepare arrays of rounded nano-objects*” In: William M Tong, Douglas J. Resnick (szerk.) Alternative Lithographic Technologies IV., Proceedings of SPIE 8323, SPIE - The International Society for Optical Engineering, pp. 83232E-1-83232E-10. (2012)