DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Nanostruktúrák lézeres kialakítása különböző fémek, illetve dielektrikumok felületén

Írta:

Csizmadia Tamás

Témavezető:

Prof. Dr. Hopp Béla

egyetemi tanár

Fizika Doktori Iskola
Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Szegedi Tudományegyetem
Természettudományi és Informatikai Kar

Szeged
2016

1. BEVEZETÉS

Nanostrukturált felületeken általánosan olyan anyagokat értünk, amelyeken található objektumok jellemző méretei megközelítőleg az 1–100 nm-es tartományba esnek. Egy nanométer mindössze a méter egy milliárdod része, egy átlagos emberi hajszál átmérőjének százezred része, a hidrogénatom átmérőjének mindössze hússzorosa. Az ilyen mérettartományba eső rendszerek előállításával, manipulálásával és tanulmányozásával a nanotudomány foglalkozik. A nanostrukturált anyagoknál számos olyan különleges és újszerű viselkedést figyelhetünk meg, amelyek kizárólag ebben – éppen a makroszkopikus és az atomi/molekuláris rendszerek közé eső – mérettartományban lelhetőek fel. A teljesség igénye nélkül ilyenek például a fém nanorészecskéknél megfigyelhető szuperkeménység, szuperparamágnesség, kivételes katalitikus tulajdonságok, továbbá a fény hullámhosszához közeli rácsperiódussal rendelkező fotonikus kristályok fénnyel való kölcsönhatásának, a lokalizált felületi plazmonok gerjesztésének vagy a kvantum bezártságnak (confinement) a jelenségei. Ezekért a rendkívüli mechanikai, optikai, elektromágneses és kémiai tulajdonságokért általánosságban a nanorészecskék nagy felület-térfogat aránya, a kis részecskeméretük miatt felbukkanó kvantumos effektusok, valamint a közöttük fellépő elektrodinamikai kölcsönhatások felelnek.

Napjainkban a hatékonyság, a gazdaságosság és a minőség iránt támasztott növekvő követelményeknek köszönhetően a lézeres technológiák szerepe megkérdőjelezhetetlenné vált a különböző anyagok precíz, ún. mikro- és nanomegmunkálásának területén. Lézerek segítségével a nanostrukturált felületeken található egységek méretét és a közöttük lévő kölcsönhatást kontrollálni lehet, amivel a nanostrukturált anyagok alapvető tulajdonságait is változtatni tudjuk. A hagyományos, mechanikai megmunkáló módszerekkel szemben a lézeres eljárások előnye, hogy az alkalmazott felületformáló „eszköz”, a lézerfény nem degradálódik, szemben például a nyomásos és sajtolásos technikákban alkalmazott lenyomatokkal, vagy a litográfiai maszkokkal, amelyek cseréje jelentős költségeket okoz. A lézernyaláb és a minta mechanikai kapcsolatának hiányából adódó további privilégium, hogy a mintát nem szennyezi be a strukturáló szerszám, ami nem csak anyagtudományi szempontból lényeges, de nagy fontossággal bír a fertőzések átvitelére érzékeny orvosi, biológiai célra gyártott minták kezelésekor is. Mindemellett a besugárzás paramétereinek precíz szabályozhatósága kedvez a procedúra pontos megismételhetőségének.

Doktori értekezésem nemesfémek, valamint dielektrikumok felületén impulzuslézeres megmunkáló eljárásokkal kialakított nanostruktúrák létrehozása, tanulmányozása és lehetséges alkalmazása köré épül. Az elkészített felületekkel két izgalmas, időszerű alkalmazást kívánok

bemutatni. Közülük az első jó elektromos vezetőképességű anyagok (fémek) reflexiós tulajdonságainak módosítása, a második pedig olyan nanostruktúrákat tartalmazó dielektrikum alapú szubsztrátok készítése, amelyek alacsony koncentrációban jelen levő festékek vagy biomolekulák Raman spektroszkópiai detektálására alkalmasak az ún. felületerősített Raman szórás jelensége által.

2. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK

A különböző anyagok felületi mikro- és nanostrukturálásának vizsgálata egy olyan kutatási téma, amely számos fontos felhasználási lehetőséggel rendelkezik több alkalmazási területen is. Ezek közül néhány példa: megfelelően strukturált felülettel gyorsítható a sejtosztódás és a sejtnövekedés mértéke, javítható a felület biokompatibilitása, vagy a csontszövetbe való integrációjának gyorsasága biológiai és élettudományi alkalmazásokban. Az elektronikai alkalmazások közül említésre méltók azok a kísérletek, amelyekben szigetelő, valamint félvezető nanoanyagok ultrarövid lézerimpulzussal való besugárzásával ultragyors kapcsolókat hoztak létre. Megfelelő nanostrukturálással módosíthatók továbbá a kezelt felület adhéziós tulajdonságai erősen hidrofób, öntisztító felszínek létrehozása céljából, vagy testre szabhatók a tapadási és súrlódási jellemzők a tribológiai felhasználások számára.

Az egyik fontos kutatási terület jó elektromos vezetőképességű anyagok felületén alacsony reflexiójú felszínek kialakítása. Bizonyos fémek ultrarövid lézerimpulzusokkal történő kölcsönhatásának vizsgálatakor megfigyelték, hogy a lézerrel kezelt felület optikai tulajdonságai a lézeres besugárzás hatására jelentősen megváltoznak. Megfelelő kísérleti körülmények mellett az eredetileg magas reflexiójú anyagok közel teljesen elnyelővé tehetők, amely jelenség széles spektrális tartományon (a közeli ultraibolyától a közeli infravörösig) bekövetkezik. Az abszorpciónövekedést fémek széles skálája (például platina, volfrám, alumínium, acél vagy titán-ötvözetek) esetén sikerült elérni. A megmunkált felületek nagyfelbontású elektronmikroszkópos képei nanométeres méretskálájú struktúrák létrejöttét mutatták ki a kezelt felszíneken. A felület makroszkopikusan megfigyelhető optikai tulajdonságait erősen meghatározza ezen struktúrák mérete és formája, amelyet a céltárgy tulajdonságai és a besugárzás paraméterei (alkalmazott energiasűrűség, környező gáz anyagi minősége, nyomása, stb.) egyaránt befolyásolnak. A megnövekedett fényelnyelésért több folyamat is felelőssé tehető, mint például a fény hullámhosszának nagyságrendjébe eső méretű felületi elemeken fellépő fényszóródás, a fény csapdázódása a felszín alatt kialakuló mikroüregekben, plazmonikus abszorpció vagy akár a röntgensugárkeltésből ismert fékezési sugárzás ellentétes folyamata. Az utóbbi néhány évben növekvő érdeklődés mutatkozott a

megváltozott abszorpciós/reflexiós tulajdonságú fém felületek lehetséges alkalmazási területeinek feltárása iránt is. A magas hatásfokú és széles hullámhossztartományon történő abszorpció alapvető jelentőségű lehet antireflexiós bevonatok készítésekor, gravírozásnál, a fotovoltaikus eszközök konverziós hatásfokának javítása szempontjából, de szélessávú hőmérsékleti sugárzók kialakításánál, fénymérő eszközök fejlesztésénél és optoelektronikai, továbbá plazmonikai felhasználásoknál is. Az alkalmazott reflexiócsökkentő módszer egyik nagy előnye, hogy az magában a fém anyagában történik, ezáltal mentesülünk a rétegleválasztás feladatától, továbbá az eltérő hőtani, mechanikai és elektromos tulajdonságú rétegek illesztésének problémájától.

Egy másik, sok lehetőséget tartogató felhasználási terület a nanostruktúrák ún. felületerősített Raman spektroszkópiára (SERS) való alkalmazhatóságát célozza meg. A hagyományos Raman spektroszkópia egy jól ismert és széles körben használt módszer molekulák vibrációs és rotációs nívóinak tanulmányozására a kivilágító lézerfény rugalmatlan szóródása által. A Raman spektrum specifikus információkat hordoz a vizsgált mintában található kémiai kötésekről és szimmetriákról, amelyek alapján a minta anyagi minősége és keverékek esetén az alkotók koncentrációja megadható. Más spektroszkópiai technikákkal összevetve a Raman spektroszkópia gyors, roncsolásmentes vizsgálatot tesz lehetővé, mindemellett a vizsgált minta csak csekély előkészítést igényel. A módszer hátránya ugyanakkor, hogy a detektálható molekulák csoportját, valamint koncentrációjuk mérhető mennyiségét jelentősen korlátozza a Raman szórás kis hatáskeresztmetszete (általánosan a Raman jel intenzitása nagyságrendekkel kisebb a rugalmas Rayleigh szóródásból származó fényintenzitásnál). Emiatt a vizsgált molekulák által kibocsátott Raman jel erősítése fontos probléma. Erre nyújt lehetőséget a felületerősített Raman szórás jelensége, amely akkor figyelhető meg, ha a vizsgálni kívánt molekulákat jól vezető anyagok érdes felületére helyezzük. A Raman rendszer lézerének sugárzása gerjeszti a vezető anyagok felületi plazmonjait, amelynek hatására a szubsztrát felületén kialakuló elektromos tér bizonyos helyeken nagymértékben erősödik. A detektálható Raman intenzitás erősen függ az elektromos térerősség amplitúdójától, ezáltal nagymértékű erősítés érhető el a detektált jelben. A felületerősített Raman spektroszkópia kulcsfontosságú tényezője a megfelelő vezető anyag kiválasztása, és a minta felületének optimális módon való kialakítása, mikro- illetve nanostrukturálása.

3. ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

A dolgozatomban különböző fémek (réz, ezüst, arany) és dielektrikumok (ömlesztett kvarc és poliimid) impulzuslézeres megmunkálását végeztem nanostruktúrált felület kialakításának céljából. Erre direkt, illetve indirekt lézeres módszereket egyaránt bevetettem a megmunkálandó anyagtól függően. A direkt lézeres megmunkálás egyszerű, alacsony eszköz- és anyagigényű eljárás, amely az abláció folyamatán alapszik. Ennek során a lézernyaláb energiájának egy része elnyelődik a céltárgy anyagában, amely fotokémiai, illetve fototermális hatásokon keresztül a felület szerkezetének megváltozását és nanostruktúrák létrejöttét eredményezi. A kialakított morfológia lehet mind szabályos, mind véletlenszerű. A hatékony ablációs mechanizmushoz elengedhetetlen, hogy a megmunkálandó céltárgy nagy abszorpciós együtthatóval rendelkezzen az alkalmazott lézer hullámhosszán. Ha ez a feltétel nem teljesül (ún. átlátszó anyagok), akkor az abszorpció csak többfotonos folyamaton keresztül valósítható meg, amelyhez nagy teljesítményű lézerrendszer szükségeltetik. Ez a megmunkálási folyamatot komplikálttá és energiaigényessé teszi. A probléma megoldására indirekt módszereket fejlesztettek ki. Ezen eljárások lényege, hogy az átlátszó anyagon keresztül egy nagy abszorpciójú közeget sugároznak be. A megmunkálás a gerjesztett abszorbens és az átlátszó anyag kölcsönhatásának eredményeképpen következik be. A kísérleteimben használt indirekt megmunkáló eljárás a lézeres hátsó oldali száraz maratás (LIBDE) volt. A LIBDE esetében az abszorbeáló közeg egy néhány 10 nm vastagságú, vákuumpárologtatással vagy impulzuslézeres leválasztással a megmunkálandó átlátszó felületen kialakított fémréteg. Az abszorbeált fotonok energiája felmelegíti az abszorbeáló bevonatot a besugárzás helyén, majd ennek következtében a környező fém, illetve hordozó is felmelegszik, köszönhetően a réteg jó hővezető tulajdonságainak és a fémfilm, illetve az átlátszó anyag közötti szoros kontaktusnak. Elég nagy energiasűrűséget alkalmazva a fémréteg teljes mértékben felforr, mialatt a hordozó legfelső rétege is képes forráspontig melegedni, illetve megolvadni. A meglőtt fém plazma formájában lerobban a hordozó tömbről, és ennek visszalökő hatása hatást gyakorol a képlékeny, olvadt felületi rétegre, szerkezeti változásokat eredményezve.

A lézerrel megmunkált minták felszíni tulajdonságait vizsgálati módszerek széles tárházával elemeztem. A strukturált felületek morfológiájának és kémiai elemösszetételének tanulmányozására a Szegedi Tudományegyetem Alkalmazott és Környezeti Kémiai Tanszékének Hitachi S4700 típusú pásztázó elektronmikroszkópját és annak energiadiszperzív röntgen spektroszkópiai detektorát; az Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék Park Systems Corporation PSIA XE-100 típusú atomerő mikroszkópját; Dektak 8 típusú profilométerét és Nikon optikai mikroszkópját vettem igénybe. A minták röntgen fotoelektron spektroszkópiai

vizsgálata a Szegedi Tudományegyetem Fizikai Kémiai és Anyagtudományi Tanszékén található Kratos XSAM 800 típusú készülék segítségével történt. A minták reflexiójának mérését a lipcsei Leibniz felületmódosítási kutatóintézet (IOM) laboratóriumában található optikai mikrospektrométer segítségével végeztem. A Raman szórási tulajdonságok feltérképezésére egy Thermo Scientific DXR típusú Raman optikai mikroszkópot használtam.

4. CÉLKITŰZÉSEK

Doktori munkám során célul tűztem ki, hogy nanostruktúrákat hozok létre különböző fémek (réz, ezüst, arany) és dielektrikumok (ömlesztett kvarc és poliimid) felületén direkt, illetve indirekt impulzuslézeres eljárások segítségével. A céltárgyak megmunkálását különböző hullámhosszak (193, 355, 775 és 1064 nm) és impulzushosszak (nanoszekundumos, pikoszekundumos, valamint femtoszekundumos) használatával végzem, minden esetben változtatva a felületre jutó energiasűrűséget és az impulzusok számát is. Felületvizsgálati módszerekkel (atomerő mikroszkópia, pásztázó elektronmikroszkópia, valamint profilometria) megvizsgálom és összehasonlítom, hogy a lézeres besugárzás hatására kialakult felületi struktúrák szerkezete hogyan függ az előbbiekben felsorolt besugárzási paraméterektől, továbbá a megmunkálandó anyag anyagi minőségétől.

A lézeres besugárzás segítségével nanostrukturált felületekkel két, egymástól független célt tűzök ki megvalósításra. Ezek közül az első alacsony reflexiójú kiterjedt felszín kialakítása jó elektromos vezetőképességű anyagok felületén. Az impulzuslézeres besugárzással nanostrukturált fém felületeken spektrofotométer segítségével reflexiós spektrumokat veszek fel a közeli ultraibolya tartománytól a közeli infravörösig azért, hogy megvizsgáljam, milyen paraméterek mellett készíthetők olyan nanostruktúra típusok, amelyek fénycsapdázó hatása a legerősebb. A reflexiócsökkentés mechanizmusának feltárása végett elkészítem továbbá egy felületi struktúra teljes reflexióra gyakorolt hatásának elméleti szimulációját sugárkövető program segítségével.

Ezek után egy másik izgalmas, sok lehetőséget tartogató felhasználási területet is górcső alá veszek, amelyben a nanostrukturált felületek létrehozásának céljaként a felületerősített Raman spektroszkópiában való alkalmazhatóság vizsgálatát tűzöm ki. Az általam készített struktúrák SERS aktivitását Raman mikroszkóp segítségével tanulmányozom. Célom a gyakorlati alkalmazhatóságot szem előtt tartva olyan megmunkálási módszert és megmunkálandó anyagot találni, amivel az erősítésre alkalmas szerkezetek gazdaságosan, nagy felületen és jól reprodukálhatóan hozhatók létre.

5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A disszertációban bemutatott kísérleteimben nanostrukturált felületek létrehozását tűztem ki célul fémek, továbbá dielektrikumok felületén direkt, valamint indirekt impulzuslézeres megmunkálási módszerek segítségével. Munkám során átfogó kísérletsorozatot végeztem, hogy megvizsgáljam az alkalmazott lézerparaméterek hatását a kialakuló nanostruktúrák szerkezetére, továbbá a megmunkált felület optikai és plazmonikai tulajdonságaira tekintettel. A lézeres besugárzás segítségével létrehozott nanostrukturált anyagokkal két, egymástól független feladat megvalósítását tűztem ki célul. Ezek közül az első alacsony reflexiójú felszín kialakítása volt különböző nemesfémek felületén. A másodikban olyan nanostruktúrákat tartalmazó szubsztrátok készítésével foglalkoztam, amelyek felhasználhatóak lehetnének felületerősített Raman spektroszkópiai célokra.

Eredményeimet az alábbi tézispontokban foglalom össze:

T1. Alacsony reflexiójú nanostrukturált fém felszín kialakítása ultrarövid lézeres besugárzással

Femtoszekundumos impulzushosszú direkt lézeres pásztázással széles hullámhossztartományon alacsony reflexióval rendelkező kiterjedt felületeket hoztam létre eredetileg magas reflexióval rendelkező nemesfémek (réz, ezüst és arany) felszínén. [S1]

- A minták felületén végzett mikrospektroszkópiai mérésekkel megmutattam, hogy a reflexiócsökkenés a teljes látható tartományon bekövetkezik és 2000 mJ/cm^2 energiasűrűség, illetve 100 impulzus alkalmazása esetén eléri a kiinduló érték kevesebb, mint 5%-át.
- Pásztázó elektronmikroszkóp segítségével összehasonlító vizsgálatot végeztem a besugárzott fém felszíneken létrejött morfológiákat illetően, amelyek között kétfajta struktúra típust lehetett elkülöníteni: a szivacsszerű alapszerkezetet mindhárom fém esetében olvadt, majd visszafagyott, a szubmikrométeres mérettartományba eső cseppecskék alkotják, amelyeket a réz és az arany esetében néhány nanométer átmérőjű szálakból felépülő sűrű, habszerű struktúra borít. Ez utóbbiak létrejötte a néhány nanométeres dimenziójú nanorészecskék aggregációjának, majd visszaszóródásának tudható be. Igazoltam, hogy a kialakuló felületi szerkezetek karakterisztikus mérete és alakja erősen függ az alkalmazott energiasűrűségtől, valamint a besugárzások számától, amelyek precíz megválasztásával a besugárzott felület reflexiója jól kontrollálható.

T2. Alacsony reflexiójú nanostrukturált fém felszín kialakítása különböző megmunkálási hullámhosszakon pikoszekundumos lézeres abláció segítségével

Elsőként értem el nagymértékű reflexiócsökkenést réz, arany és ezüst felületek pikoszekundumos lézerrel történő nanostrukturálásával, mind ultraibolya (355 nm), mind infravörös (1064 nm) megmunkáló hullámhossz alkalmazása esetén. [S2]

- Kísérleteim megmutatták, hogy a megmunkáló lézerfényforrás hullámhossza nem befolyásolja jelentősen a kialakult felületi struktúrák morfológiáját, továbbá az elérhető reflexiócsökkenés mértékét. A gyakorlati alkalmazások során tehát célszerű a kisebb technikai kihívást jelentő infravörös alapharmonikus használata.
- Reflexiómérésekkel igazoltam, hogy a lézerrel kezelt felületek reflexióértékei az energiasűrűség növekedésével drasztikusan lecsökkennek, és 3 J/cm^2 fölött (átlagosan 50 impulzus alkalmazása esetén) a kezdeti érték 3%-a alá esnek. A csökkenés a femtoszekundumos kísérletekhez hasonlóan széles spektrális tartományon, a közeli infravöröstől a közeli ultraibolyáig bekövetkezik.
- A különböző energiasűrűségekkel kezelt felületek reflexiójának térbeli eloszlását elemeztem és kiderítettem, hogy a lézeres megvilágítás hatására a kezdeti direkt reflexió lecsökken, majd 3 J/cm^2 energiasűrűség fölött egy közel ideális diffúz visszaverő felület alakul ki alacsony integrált reflexióval.
- Pásztázó elektronmikroszkóppal végzett összehasonlító vizsgálataim azt mutatták, hogy a felületen az olvadékos szerkezetek dominálnak, a fonalszerű aggregátumok mennyisége a femtoszekundumos kísérletekben tapasztalthoz képest ugyanazon alkalmazott energiasűrűség mellett számottevően alacsonyabb.

T3. Strukturált titán felület reflexiócsökkentő hatásának modellezése sugárkövető algoritmus segítségével

Sugárkövető módszer segítségével elsőként igazoltam, hogy femtoszekundumos lézeres ablációval létrehozott titán felületi struktúra reflexiócsökkentő hatásában a struktúrák közötti fényvisszaverődésnek döntő szerepe van. [S3]

- A felhasznált modellt optimalizáltam mind az alkalmazott geometria (kúpok száma és elhelyezkedése), mind a szimulációs paraméterek (sugarak száma és a kivilágított terület nagysága) szempontjából. A modellezett felület számított reflexiója jelentősen kisebbnek bizonyult a referenciaként használt megmunkálatlan felületnél és 6,7 százalékponton belül megközelítette a kísérletileg mért értéket. Ez azt mutatja, hogy a relatíve egyszerű és

mérsékelt számítási igényű sugárkövető módszerrel történő modellezés ígéretes módszer mikrostrukturált felületek reflexiójának elfogadható hibahatáron belüli meghatározására.

T4. Nanostrukturált ömlesztett kvarc felszín kialakítása felületerősített Raman spektroszkópiai célokra lézeres hátoldali száraz maratás segítségével

Elsőként mutattam meg, hogy a lézeres hátoldali száraz maratás (LIBDE) technikája önmagában alkalmas ömlesztett kvarc felületi nanostruktúrák kialakítására. Bebizonyítottam, hogy a LIBDE módszerrel készített és vékony ezüstréteggel bevont ömlesztett kvarc nanostruktúrák használhatóak felületerősített Raman spektroszkópiai célokra. [S4]

- Kísérletekkel igazoltam, hogy a Rhodamin 6G vizes oldatának karakterisztikus Raman csúcsai jelentősen intenzívebbek ezüst vékonyréteg alkalmazásakor, továbbá a vizsgált tartományon (10–40 nm) a vastagabb rétegek nagyobb erősítést eredményeznek.
- A maratott gödrök karakterisztikus területeiről nagyfelbontású AFM képeket készítettem és azok segítségével meghatároztam a felületek érdességi paramétereit (R_a). Megfigyeltem, hogy a vizsgált érdességi tartományon belül az érdesebb felületeken nagyobb Raman erősítés tapasztalható. Ezt az eredményt három hasonló morfológiájú, különböző R_a értékkel rendelkező felületi struktúra elektromágneses közelterének modellezésével is alátámasztottam.
- Összehasonlító méréseket végeztem egy kommerciálisan elérhető SERS szubsztrát, a Renishaw Diagnostics által gyártott Klarite® felhasználásával. Az alkalmazott kísérleti körülmények mellett a LIBDE technikával készített SERS aktív felületen mért Raman intenzitások körülbelül 20%-kal voltak kisebbek a Klarite® használata közben mért értékeknél.

T5. Nanostrukturált poliimid felszín kialakítása felületerősített Raman spektroszkópiai célokra direkt impulzuslézeres ablációval

Igazoltam, hogy direkt excimer lézeres besugárzással létrehozott, és vékony ezüstréteggel bevont nanostrukturált poliimid felszín felhasználható erősített Raman-szórású (SERS) szubsztrátként. A kapott SERS aktív felület amellett, hogy gazdaságos módon és egyszerű technikával lett létrehozva, jól reprodukálhatóan, relatíve nagy felületen helyezkedett el, amely tulajdonságok az alkalmazott módszert későbbi gyakorlati felhasználásra is ígéretessé teszik. [S5]

- Bebizonyítottam, hogy a nagyobb megmunkáló energiasűrűségek nagyobb Raman intenzitásokat eredményeznek a vizsgált energiasűrűség tartományon (40–80 mJ/cm^2) belül.
- A besugárzott területek legnagyobb Raman erősítéssel rendelkező részeit pásztázó elektronmikroszkóppal megvizsgálva kúpszerű képződményeket, valamint törmelékes finomstruktúrát fedeztem fel. Vizsgálataim során arra a következtetésre jutottam, hogy a SERS aktív felületen megfigyelt, az ablációs felhőből visszaszóródó és lerakódott mikro- és nanofragmentumok által alkotott finomstruktúra lényeges szerepet játszik az erősítés folyamatában.

6. SAJÁT PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

6.1. A tézispontokhoz kapcsolódó referált nemzetközi szakfolyóiratcikkek listája

[S1]: Hopp B., Smausz T., Csizmadia T., Vass Cs., Tápai Cs., Kiss B., Ehrhardt M., Lorenz P., Zimmer K.: *"Production of nanostructures on bulk metal samples by laser ablation for fabrication of low-reflective surfaces"*, Applied Physics A: Materials Science and Processing 113 (2), 291-296 (2013)
doi:10.1007/s00339-013-7913-y

[S2]: Csizmadia T., Smausz T., Tápai Cs., Kopniczky J., Wang X., Ehrhardt M., Lorenz P., Zimmer K., Orosz L., Varga E., Oszkó A., Hopp B.: *"Comparison of the production of nanostructures on bulk metal samples by picosecond laser ablation at two wavelengths for the fabrication of low-reflective surfaces"*, Journal of Laser Micro / Nanoengineering 10 (2), 110-118 (2015)
doi: 10.2961/jlmn.2015.02.0001

[S3]: Csizmadia T., Erdélyi M., Smausz T., Novák T., Hopp B.: *"Simulation of the Reflectivity Properties of Microstructured Titanium Surface by Ray Tracing Method"*, Journal of Laser Micro / Nanoengineering 10 (2), 210-215 (2015)
doi: 10.2961/jlmn.2015.02.0019

[S4]: Csizmadia T., Hopp B., Smausz T., Kopniczky J., Hanyecz I., Sipos Á., Csete M., Szabó G.: *"Possible application of laser-induced backside dry etching technique for fabrication of SERS substrate surfaces"*, Applied Surface Science 278, 234-240 (2013)
doi:10.1016/j.apsusc.2012.12.037

[S5]: Csizmadia T., Hopp B., Smausz T., Bengery Z., Kopniczky J., Hanyecz I., Szabó G.: *"Fabrication of SERS active surface on polyimide sample by excimer laser irradiation"*, Advances in Materials Science and Engineering 2014, 987286 (2014)
doi:10.1155/2014/987286

6.2. Nemzetközi szakfolyóiratokban megjelent további publikációk listája

[S6]: Smausz T., Csizmadia T., Kresz N., Vass Cs., Márton Zs., Hopp B.: *"Influence on the laser induced backside dry etching of thickness and material of the absorber, laser spot size and multipulse irradiation"* Applied Surface Science 254, 1091-1095 (2007) doi:10.1016/j.apsusc.2007.08.068

[S7]: Hopp B., Smausz T., Csizmadia T., Budai J., Oszkó A., Szabó G.: *"Laser-induced backside dry etching: wavelength dependence"*, Journal of Physics D: Applied Physics 41, 175501 (2008) doi:10.1088/0022-3727/41/17/175501

[S8]: Hopp B., Smausz T., Csizmadia T., Vass Cs., Csákó T., Szabó G.: *"Comparative study of different indirect laser-based methods developed for microprocessing of transparent materials"*, Journal of Laser Micro/Nanoengineering 5, 80-85 (2010) doi:10.2961/jlmn.2010.01.0017

[S9]: Smausz T., Kecskeméti G., Csizmadia T., Benedek F., Hopp B.: *"Study on the applicability of polytetrafluoroethylene-silver composite thin films as sensor material"*, Applied Surface Science 278, 117-121 (2013) doi:10.1016/j.apsusc.2013.01.051

[S10]: Zimmer K., Ehrhardt M., Lorenz P., Wang X., Vass Cs., Csizmadia T., Hopp B.: *"Reducing the incubation effects for rear side laser etching of fused silica"*, Applied Surface Science 302, 42-45 (2014) doi:10.1016/j.apsusc.2014.01.115

[S11]: Lorenz P., Smausz T., Csizmadia T., Ehrhardt M., Zimmer K., Hopp B.: *"Shadowgraph studies of laser-assisted non-thermal structuring of thin layers on flexible substrates by shock-wave-induced delamination processes"*, Applied Surface Science 336, 43-47 (2014) doi:10.1016/j.apsusc.2014.09.114

[S12]: Lorenz P., Klöppel M., Smausz T., Csizmadia T., Ehrhardt M., Zimmer K., Hopp B.: *"Time dependency of the laser-induced nanostructuring process of chromium layers with different thicknesses on fused silica"*, Applied Surface Science 336, 176-181 (2014) doi:10.1016/j.apsusc.2014.10.130

[S13]: Lorenz P., Klöppel M., Smausz T., Csizmadia T., Ehrhardt M., Zimmer K., Hopp B.: *"Dynamics of the laser-induced nanostructuring of thin metal layers: Experiment and theory"*, Materials Research Express 2 (2), 026501 (2015) doi:10.1088/2053-1591/2/2/026501

[S14]: Sansone G., Kuehn S., Dumergue M., Kahaly S., Lopez-Martens R., Tzallas P., Fule M., Csizmadia T., Varjú K., Charalambidis D., Osvay K., Calegari F., Devetta M., Frassetto F., Mansson E., Poletto L., Stagira S., Nisoli M., Rudawski P., L'Huillier A., Kalpouzos C.: *"The ELI-ALPS facility: the next generation of attosecond sources"* (beküldve)

6.3. Külföldi szakmai konferencián megjelent poszterek, konferenciakiadványok

1. Csizmadia T., Smausz T., Tápai Cs., Kopniczky J., Wang X., Ehrhardt M., Lorenz P., Zimmer K., Varga E., Oszkó A., Hopp B.: "Production of nanostructures on bulk metal samples by picosecond laser ablation at two wavelengths for fabrication of low-reflective surfaces"
   LPM 2014: 15th International Symposium on Laser Precision Microfabrication
   Vilnius, Lithuania, 2014.06.17. - 2014.06.20.

2. Csizmadia T., Erdélyi M., Smausz T., Hopp B.: "Simulation of the reflective properties of microstructured titanium surface by ray tracing method"
   LPM 2014: 15th International Symposium on Laser Precision Microfabrication
   Vilnius, Lithuania, 2014.06.17. - 2014.06.20.

3. Hopp B., Csizmadia T., Smausz T., Tápai Cs., Kopniczky J., Wang X., Ehrhardt M., Lorenz P., Zimmer K.: "Production of Low-Reflecting Surface Structure on Metal Films"
   12th International Conference on Laser Ablation
   Ischia, Italy, 2013.10.06. - 2013.10.11.

4. Csizmadia T., Bengery Zs., Kopniczky J., Hanyecz I., Hopp B.: "Fabrication of SERS active surface structures on rotating polyimide sample by excimer laser irradiation"
   The European Conference on Lasers and Electro-Optics 2013
   Munich, Germany, 2013.05.12. - 2012.05.16.

5. Csizmadia T., Hopp B., Smausz T., Hanyecz I., Kopniczky J., Szabó G.: "Application possibility of laser-induced backside dry etching technique for fabrication of SERS active surfaces"
   E-MRS 2012 Spring Meeting: V: Laser materials processing for micro and nano applications
   Strasbourg, France, 2012.05.14. - 2012.05.18.

6. Kecskeméti G., Smausz T., Csizmadia T., Benedek F., Hopp B.: "Study on the applicability of polytetrafluoroethylene-silver composite thin films as sensor material"
   E-MRS 2012 Spring Meeting: V: Laser materials processing for micro and nano applications
   Strasbourg, France, 2012.05.14. - 2012.05.18.

7. Csizmadia T., Smausz T., Vass Cs., Hopp B.: "Laser-induced backside dry etching of transparent materials having significantly different thermal parameters"
   E-MRS 2010 Spring Meeting: R: Laser processing and diagnostics for micro and nano applications
   Strasbourg, France, 2010.06.07. - 2010.06.11.

8. Papdi B., Csizmadia T., Vass Cs., Szabó G., Hopp B.: "Fabrication of micro-channels in fused silica using laser induced backside wet etching (LIBWE) method"
   E-MRS 2010 Spring Meeting: R: Laser processing and diagnostics for micro and nano applications
   Strasbourg, France, 2010.06.07. - 2010.06.11.

9. Hopp B., Smausz T., Csizmadia T., Vass Cs., Csákó T., Szabó G.: "Comparative study of different indirect laser-based methods developed for microprocessing of transparent materials"
   LAMP 2009: The 10th International Symposium on Laser Precision Microfabrication
   Kobe, Japan, 2010.06.29. - 2010.07.02.

10. Smausz T., Csizmadia T., Kresz N., Vass Cs., Márton Zs., Hopp B.: "Influence on the laser induced backside dry etching of thickness and material of the absorber, laser spot size and multipulse irradiation"
E-MRS 2007 Spring Meeting: P: Laser synthesis and processing of advanced materials Strasbourg, France, 2007.05.28. - 2007.06.01.