Ph.D. értekezés tézisei

Optikai rácsok és nanostruktúrák lézeres kialakítása és vizsgálata

Kiss Bálint

Témavezető:

Dr. Vass Csaba

tudományos munkatárs

Fizika Doktori Iskola

Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Kar

Szeged, 2015

Bevezetés

A lézerek megjelenését követően, számos területen hasznosították azok kedvező tulajdonságait, melynek következtében a lézerek/lézerrendszerek, a lézer-alapú műszerek és diagnosztikai eljárások nélkülözhetetlen eszközeivé váltak a természettudományos és interdiszciplináris (orvosi, biofizikai, kémiai) kutatásoknak csakúgy, mint az ipari méretű termelésnek.

A mikrométeres és az alatti méretskálán kialakított felületi struktúrák mind önmagukban, mind integrált formában felhasználhatóak olyan szerteágazó területeken, mint az optikai spektroszkópia, a mikroelektronika vagy éppen a szenzorika. Ezen területeken gyakran merül fel az igény arra, hogy egy mikrostruktúrált felület valamilyen széles hullámhossz tartományban átlátszó hordozón, az arra felvitt vékonyréteg(ek)ben, vagy egy optikai szálon legyen kialakítva. A mikrostruktúra lehet egy térben periodikus modulációval bíró felszín, vagy az adott alkalmazás által megkövetelt speciális morfológiával rendelkező – és ennek következtében – fizikailag aktív felület. Az előbbire példa az egyik legfontosabb periodikus mintázat, a *rács,* míg az utóbbira a *felület erősített Raman szórást* mutató felszín.

Az optikai rácsok megjelenése megalapozta és végigkísérte a spektroszkópia fejlődését a XIX. század vége óta, melynek segítségével lehetőség nyílt a világunkat alkotó (látható) anyag atomjainak és molekuláinak energia állapotait felderíteni, az emissziós és abszorpciós spektrumok vizsgálatával. A spektrum – azaz a különböző hullámhosszú komponenseire felbontott fény – előállításának a mai napig legelterjedtebb módja az optikai rácsot, mint diszperziós bontóelemet tartalmazó elrendezések használata. Ezen túlmenően a ráccsatolt hullámvezetőben, mely legegyszerűbb esetben egy hordozóra felvitt vékonyrétegből és a rétegben kialakított rácsból áll, a hullámvezető rétegbe be- és kicsatolhatóak bizonyos diszkrét fénymódusok a rács segítségével. Az ilyen és ehhez hasonló ráccsatolt hullámvezetők segítségével egyes kémiai, biológiai komponensekre érzékeny szenzorok készíthetőek.

Az átlátszó anyagok mikrostruktúrálására számos lézeres eljárást fejlesztettek ki, melyek közül, a közvetett (indirekt) lézeres technikák igen hatékonynak bizonyultak a közvetlen (direkt) ablációs eljárásokkal szemben. Egyik ilyen követett technika a *lézer indukált hátoldali folyadékos maratás*, mely a céltárgyat annak hátoldalával érintkező folyékony abszorberben elnyelt lézerenergia következtében munkálja meg, jól kontrollálható módon, kiemelkedően jó felületi minőséget eredményezve.

Jelen értekezés a *lézeres hátoldali folyadékos maratással* különböző átlátszó sík céltárgyakban létrehozható transzmissziós rácsok, azok felhasználásával tömbi fém felületén

kialakítható reflexiós rácsok, valamint optikai szál kimenetén létrehozható nanostruktúrák készítése és vizsgálata során elért eredményeimet foglalja össze. Munkám során igyekeztem olyan felületek kialakításával és vizsgálatával foglalkozni, melyeknek van, és lehet gyakorlati felhasználása.

Tudományos előzmények

Az elmúlt évtizedekben számos olyan eljárást fejlesztettek ki, melyekkel mikrométernél kisebb karakterisztikus mérettel rendelkező, permanens felületi mintázatok alakíthatóak ki szilárd minták felszínén.

A **többlépéses eljárások**at csoportosíthatjuk aszerint, hogy a kívánt felületi struktúra valamilyen maszkolási folyamatot felhasználó eljárással készül el, vagy az valamilyen etalonról készített másolatot eredményez (mester-replika módszer). Mindkettőben közös, hogy a végtermék egy többlépéses munkafolyamat eredményeképp jön létre.

A mester-replika eljárás során először valamilyen nagy pontosságot igénylő módszerrel létrehoznak egy etalont (mester), ezután annak felületi struktúráját közvetlenül (leképezés nélkül) átviszik több munkadarabra (replika). Ilyen módszert alkalmaznak például diffrakciós rácsok sorozatgyártására, ahol a mesterrácsok kialakítása speciális, nagy mechanikai stabilitású, speciális marógépekkel, illetve ún. holografikus előhívással történik. A replikák készítése során, egy hordozóra felvitt folyékony fázisú gyantarétegbe nyomják bele a mesterrácsot, mely így hordozza az etalon felület profiljának inverzét.

A litográfiás eljárások alapja, hogy egy – az adott maratási folyamattal szemben – ellenálló maszkot hoznak létre a minta felszínén, melynek előhívása és szelektív eltávolítása után az így előkészített mintát valamilyen maratási technikával kezelve, a maszk által nem fedett részek anyaga eltávolítható. A céltárgy anyagának eltávolítása lehetséges nehéz ionok gyorsításával keletkező nagyenergiájú részecskenyalábbal, mely csupán fizikai kölcsönhatás segítségével távolítja el a céltárgy anyagát (ionnyalábos maratás), vagy olyan részek gyorsításával, melyek kémiai kölcsönhatásba is lépnek a minta anyagával (reaktív-ion maratás). Általában a megfelelő maszk előállítása az, ami hosszadalmassá és drágává teszi a folyamatot, mivel a néhány száz nanométeres felbontású struktúrák realizálásához optikai, vagy elektronnyalábos litográfia szükséges, ami önmagában egy többlépéses folyamat. Ugyanakkor az UV lézeres optikai litográfia ipari méretű elterjedése nagyban elősegítette a

számítástechnikai forradalmat, hiszen a processzorok és memóriaelemek a mai napig így készülnek, ipari mennyiségben.

A fentieknél egyszerűbb, és szerényebb laboratóriumi körülmények között is alkalmazható eljárások a közvetlen és közvetett lézeres módszerek. Az **impulzus lézeres abláció** alapja, hogy a lézer által kibocsátott elektromágneses energia jelentős részét a céltárgy abszorbeálja, mely elnyelt energiahányad annak anyagában fototermális illetve fotokémiai változásokat indukál. Bizonyos küszöb energiasűrűség felett a minta anyaga eltávolítható. Az céltárgy lézer hullámhosszán vett lineáris abszorpciója elsődleges fontosságú, ami szerint megkülönböztethetünk jól abszorbeáló és átlátszó anyagokat. Jól abszorbeáló anyagok esetén az ablációs folyamat jól tervezhető struktúrákat eredményez, viszonylag nagy megmunkálható felülettel párosulva.
Átlátszó céltárgyak esetén az adott fotonenergia általában nem elegendő a kötések felszakításához, ekkor a csúcsintenzitás növelése (impulzusidő csökkentése) által az anyagban indukált nemlineáris (többfotonos) abszorpciót kihasználva érhető el hatékonyabb anyageltávolítás. Látható, hogy impulzuslézeres abláció az átlátszó céltárgyak esetén nyilvánvaló nehézségekbe ütközik, melyek következtében a megmunkálható felület teljes mérete és minősége egyaránt erősen korlátozott.

Alkalmazott módszerek

A **közvetett lézeres eljárások**kal a fenti probléma részben megkerülhető: a céltárgy magas transzmisszióját kihasználva, egy közvetítő közeg segítségével (közvetett módon) valósítható meg anyageltávolítás. A mintán lényegében gyengítetlenül áthaladó lézerfényt a minta hátoldalán elhelyezett közvetítő közeg abszorbeálja, mely a minta felületének egy vékony rétegét hődiffúzión, illetve plazma által indukált folyamatokon keresztül eltávolítja. Számos közvetett eljárást fejlesztettek ki, melyek közül én a **lézer-indukált hátoldali folyadékos maratást** (*Laser-Induced Backside Wet Etching* – ***LIBWE***) **alkalmaztam** a dolgozatomban ismertetett kísérletekben. Ekkor az átlátszó céltárgy hátoldala érintkezésben van egy folyékony abszorberrel (szerves oldat vagy folyékony fém), mely az elnyelt fényenergia következtében drasztikusan felmelegszik, és az energia jelentős részét hődiffúzióval átadja a céltárgynak. A megmunkálási küszöb energiasűrűség felett, a céltárgy egy vékony rétege olvadás, illetve forrás következtében eltávozik. A megmunkálási küszöb értéke erősen függ az alkalmazott céltárgy és abszorber összetételétől és a lézerfény hullámhosszától. A *LIBWE* – akárcsak a többi indirekt

technika –legfontosabb előnyei az alacsony küszöb energiasűrűség és az ezzel párosuló jó minőségű megmunkált felületek (alacsony érdesség, határozott élek).

Az eljárást egy **két-nyaláb interferenciás elrendezés**ben használva (***TWIN-LIBWE***), gyorsan és egy lépésben alakíthatóak ki akár szubmikrométeres periódusú rácsok, átlátszó céltárgyak felületén. Ebben a geometriában, a térben és időben átfedő impulzusok interferenciája következtében kialakuló, térben modulált intenzitáseloszlás – és így a kialakított rácsok – periódusa, a nyalábok beesési szögével folytonosan változtatható.

A közelmúltban számos publikáció született a fenti technikával ömlesztett kvarcban létrehozott fázisrácsok készítésének optimalizálásával kapcsolatban, de azok diffrakciós hatásfoka eddig nem került meghatározásra.

Továbbá a technikával eddig csak lapformára kialakított tömbi átlátszó anyagokban készítettek rácsokat, hordozóra felvitt átlátszó vékonyrétegekben nem, pedig azoknak számos alkalmazási lehetőséggel bírnak. A ráccsatolt hullámvezetésen alapuló mérő módszerek (Grating Coupled Interferometry - GCI, Optical Waveguide Lightmode Spectroscopy - OWLS) például ilyenek.

Optikai szál kimenetének megmunkálását sem hajtották végre közvetett lézeres technikával, ugyanakkor a szálak rendkívül változatos felhasználási területekkel bírnak a képalkotástól a szenzorikáig.

Az ellenálló, kémiailag stabil ömlesztett kvarcban TWIN-LIBWE-vel kialakítható rácsok kiválóan alkalmasak „mester” struktúrának az olyan **direkt nano-lenyomatkészítés**es (Direct Nanoimprint Litography – D-NIL) eljárásokban, ahol a mester mintázatát közvetlenül nyomják bele a kívánt anyagba, miközben a céltárgyat megfelelő (lágyulás/olvadás eléréséhez szükséges) hőmérsékletre fűtik. Így várhatóan az eljárással eddig tesztelt fém filmeken túl, fém tömbanyagokban is kialakíthatóak reflexiós rácsok.

Célkitűzések

Bekapcsolódva az SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszéken folyó munkába, az irodalom áttanulmányozását követően, igyekeztem olyan mikrostruktúrált felületek kialakítását és vizsgálatát elvégezni, melyekre igény merülhet fel a különböző alkalmazások részéről. Célkitűzéseim az alábbi pontokban foglalhatóak össze.

1. A diffrakciós rácsok egyik legfontosabb értékmérője azok hatásfoka, mely alapján eldönthető, hogy az adott rács alkalmazható-e hatékonyan egy konkrét mérési elrendezésben, vagy sem. Ezért célul tűztem ki az ömlesztett kvarc tömbanyagban, *TWIN-LIBWE*-vel kialakítható, mikrométeres periódusú, transzmissziós rácsok diffrakciós hatásfokának meghatározását, három (igen elterjedt) kivilágító lézer hullámhosszán.

2. A tömbi hordozóra felvitt filmek és az azokban kialakított rácsok alkalmazhatóak a szenzorikában, mint ráccsatolt hullámvezetők, melyekre az elmúlt években több mérési módszert kifejlesztettek. Ezért célul tűztem ki, hogy a *TWIN-LIBWE* technikával hozok létre - lehetőleg a fény becsatolására alkalmas - mikro- és szubmikrométeres periódusú rácsokat széles hullámhossz tartományban átlátszó optikai vékonyrétegekben, és megvizsgálom, hogy az adott technikával melyek a rácskészítés optimális kísérleti körülményei.

3. A reflexiós rácsok felépítése általában a megfelelő felületi profillal rendelkező hordozóból és az arra felvitt fém filmből áll. Belátható, hogy az előbbi struktúra lézer indukált roncsolási küszöbe alacsonyabb, mint egy tömbanyagban kialakított fém rácsé. Ezért tűztem ki célul, hogy ón tömbanyagban alakítok ki mikro- és szubmikrométeres periódusú reflexiós rácsokat egy erre alkalmas lenyomat készítéses (mester-replika) eljárással, melyhez a *TWIN-LIBWE*-vel ömlesztett kvarcban kialakított rácsokat használom fel mester struktúrának.

4. Az optikai szálak a telekommunikációs felhasználásokon túl, számos tudományterületen terjedtek el és képezik számos méréstechnika és műszer alapját. Mivel szál kimenetének megmunkálását indirekt lézeres technikával még nem végezték el, annak tesztelése ígéretes vállalkozásnak tűnt. Ezért célul tűztem ki optikai szálvég megmunkálását a *LIBWE* módszerrel, és a kialakítható felületeti struktúra lehetőség szerinti felhasználását.

Eredmények

1. Méréssel és szimulációval elsőként határoztam meg a TWIN-LIBWE eljárással ömlesztett kvarcba készíthető, mikrométeres periódussal (0,95, 2,12 és 3,71 μm) rendelkező transzmissziós rácsok diffrakciós hatásfokát három hullámhosszon (266, 532 és 654,5 nm), az összes megengedett elhajlási rendre. A kiértékelés során alkalmazott módszer a modulációs mélység inhomogén, de szimmetrikus függvényekkel jól illeszthető eloszlását figyelembe véve, a szimulált hatásfokok adott modulációs mélységhez tartozó területtel való súlyozásán alapul. Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy a TWIN-LIBWE-vel készíthetőek

olyan rácsok, melyek diffrakciós hatásfoka a ±1 rendben maximális, esetenként 50% fölötti, így azok várhatóan hatékonyan alkalmazhatóak különböző optikai elrendezésekben [T1].

2. Elsőként készítettem TWIN-LIBWE technikával ömlesztett kvarc hordozóra felvitt optikai optikai vékonyrétegekbe (SiO_2, Al_2O_3 és Y_2O_3) mikrométeres illetve fél mikrométeres periódusú rácsokat. Megállapítottam, hogy az SiO_2 film küszöb energiasűrűsége megegyezik a tömbi SiO_2–re korábban mért 285 mJ/cm^2-el, és e rácsok modulációs mélysége a tömbanyaghoz hasonlóan, széles intervallumban skálázható a készítési paraméterekkel. Az Al_2O_3 és Y_2O_3 vékonyrétegek maratási küszöbét 240 és 220 mJ/cm^2–nek mértem és az optimális megmunkálási tartomány jelentősen szűkebb, mint ömlesztett kvarc illetve az SiO_2 film esetén, melynek következtében a modulációs mélység kevésbé skálázható a készítési paraméterekkel. Demonstráltam, hogy a TWIN-LIBWE-vel készíthetőek olyan rácsok, melyek alkalmasak a fény becsatolására hullámvezető rétegbe [T2].

3. Ón tömbanyagban reflexiós rácsokat alakítottam ki egy „mester-replika" eljárással (olvasztásos lenyomatkészítés), melyhez mesterrácsként az ömlesztett kvarcban, TWIN-LIBWE technikával létrehozott rácsokat használtam fel. A mesterrácsok és így a fémrácsok periódusai is egy nagyságrendet lefednek (266, 505, 1045, 2120 és 3710 nm), melyekre összevetettem a replika és mester rácsok modulációs mélységét. Megállapítottam, hogy adott perióduson belül a replikák modulációs mélysége közel állandó (rendre közelítőleg 5, 25, 55, 75, 120 nm), független a mester modulációs mélységétől, ugyanakkor ez a jellemző érték – ahogy a mesterrácsok modulációs mélysége is – a periódussal növekszik. Továbbá demonstráltam, hogy a kialakított reflexiós rácsokat kivilágítva, az összes megengedett rendben elhajlított nyaláb megjelenik [T3].

4. Elsőként alakítottam ki a fémes (Ga) abszorberes LIBWE (M-LIBWE) elrendezés használatával porózus, <100 nm karakterisztikus mérettel rendelkező nanostruktúrát egy többmódusú, ömlesztett kvarc maggal rendelkező optikai szál kimenetének felületén. A szálmag maratási küszöbét 450 mJ/cm^2-nek, a maratási sebességet 20 és 37 nm/impulzus közöttinek mértem a 450-1060 mJ/cm^2 energiasűrűség tartományban. Megmutattam, hogy a módszerrel létrehozható olyan felületi struktúra, melyet bevonva néhány nanométeres fémréteggel, az alkalmas felület erősített Raman szórási (SERS) spektrumok felvételére [T4].

Publikációk

A tézispontokhoz kapcsolódó, referált folyóiratokban megjelent közlemények:

[T1] B. Kiss, Cs. Vass, P. Heck, P. Dombi and K. Osvay: „*Fabrication and analysis of transmission gratings produced by the indirect laser etching technique*", J. Phys. D: Appl. Phys. 44 (2011) 415103 (5pp)

[T2] B. Kiss, F. Ujhelyi, Á. Sipos, B. Farkas, P. Dombi, K. Osvay and Cs. Vass: „*Microstructuring of Transparent Dielectric Films by TWIN-LIBWE Method for OWLS Applications*", JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 8, No. 3 (2013) 271-275

[T3] B. Kiss, R. Flender and Cs. Vass: „*Fabrication of Micro- and Submicrometer Period Metal Reflection Gratings by Melt-Imprint Technique*", JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 8, No. 3 (2013) 287-291

[T4] Cs. Vass, B. Kiss, J. Kopniczky and B. Hopp: „*Etching of fused silica fiber by metallic laser-induced backside wet etching technique*", Appl. Surf. Sci. 278 (2013) 241–244

További referált folyóiratokban megjelent közlemények:

[1] B. Hopp, T. Smausz, T. Csizmadia, Cs. Vass, Cs. Tápai, B. Kiss, M. Ehrhardt, P. Lorentz and K. Zimmer: „*Production of nanostructures on bulk metal samples by laser ablation for fabrication of low-reflective surfaces",* Appl. Phys. A Vol. 113, Issue 2 (2013) 291-296

[2] Cs. Vass, B. Kiss, R. Flender, Z. Felházi, P. Lorenz, M. Ehrhardt and K. Zimmer: *„Comparative Study on Grating Fabrication in Transparent Materials by TWIN-LIBWE and Ultrashort Pulsed Ablation Techniques"*, JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 10, No. 1 (2015) 38-42

[3] B. Kiss, R. Flender, J. Kopniczky, F. Ujhelyi, Cs. Vass: *„Fabrication of Polarizer by Metal Evaporation of Fused Silica Surface Relief Gratings"*, JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 10, No. 1 (2015) 53-58

Társszerzői nyilatkozatok

TÁRSSZERZŐI NYILATKOZAT

Alulírott *Dr. Vass Csaba* kijelentem, hogy Kiss Bálint szerepe meghatározó volt a

[T1] **B. Kiss**, Cs. Vass, P. Heck, P. Dombi and K. Osvay: „*Fabrication and analysis of transmission gratings produced by the indirect laser etching technique*", J. Phys. D: Appl. Phys. 44 (2011) 415103 (5pp)

[T2] **B. Kiss**, F. Ujhelyi, Á. Sipos, B. Farkas, P. Dombi, K. Osvay and Cs. Vass: „*Microstructuring of Transparent Dielectric Films by TWIN-LIBWE Method for OWLS Applications*", JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 8, No. 3 (2013) 271-275

[T3] **B. Kiss**, R. Flender and Cs. Vass: „*Fabrication of Micro- and Submicrometer Period Metal Reflection Gratings by Melt-Imprint Technique*", JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 8, No. 3 (2013) 287-291

[T4] Cs. Vass, **B. Kiss**, J. Kopniczky, B. Hopp: „*Etching of fused silica fiber by metallic laser-induced backside wet etching technique*", Applied Surface Science 278 (2013) 241–244

publikációkban közzétett azon eredményeink kidolgozásában, melyekre a jelölt *„Optikai rácsok és nanostruktúrák lézeres kialakítása és vizsgálata"* című PhD-dolgozatának 1., 2., 3., és 4. tézispontjaiban hivatkozik.

Társszerzőként a hivatkozott eredményeket tudományos fokozatszerzés céljából eddig nem használtam fel, és ezt a jövőben sem teszem.

Szeged, 2015. szeptember 29.

.....

Dr. Vass Csaba

TÁRSSZERZŐI NYILATKOZAT

Alulírott *Dr. Osvay Károly* kijelentem, hogy Kiss Bálint szerepe meghatározó volt a

[T1] **B. Kiss**, Cs. Vass, P. Heck, P. Dombi and K. Osvay: „*Fabrication and analysis of transmission gratings produced by the indirect laser etching technique*", J. Phys. D: Appl. Phys. 44 (2011) 415103 (5pp)

[T2] **B. Kiss**, F. Ujhelyi, Á. Sipos, B. Farkas, P. Dombi, K. Osvay and Cs. Vass: „*Microstructuring of Transparent Dielectric Films by TWIN-LIBWE Method for OWLS Applications*", JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 8, No. 3 (2013) 271-275

publikációkban közzétett azon eredményeink kidolgozásában, melyekre a jelölt *„Optikai rácsok és nanostruktúrák lézeres kialakítása és vizsgálata"* című PhD-dolgozatának 1. és 2. tézispontjaiban hivatkozik.

Társszerzőként a hivatkozott eredményeket tudományos fokozatszerzés céljából eddig nem használtam fel, és ezt a jövőben sem teszem.

Szeged, 2015. szeptember 29.

.....

Dr. Osvay Károly

TÁRSSZERZŐI NYILATKOZAT

Alulírott *Dr. Sipos Áron* kijelentem, hogy Kiss Bálint szerepe meghatározó volt a

[T2] **B. Kiss**, F. Ujhelyi, Á. Sipos, B. Farkas, P. Dombi, K. Osvay and Cs. Vass: „*Microstructuring of Transparent Dielectric Films by TWIN-LIBWE Method for OWLS Applications*", JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 8, No. 3 (2013) 271-275

publikációban közzétett azon eredményeink kidolgozásában, melyekre a jelölt *„Optikai rácsok és nanostruktúrák lézeres kialakítása és vizsgálata"* című PhD-dolgozatának 2. tézispontjában hivatkozik.

Társszerzőként a hivatkozott eredményeket tudományos fokozatszerzés céljából eddig nem használtam fel, és ezt a jövőben sem teszem.

Szeged, 2015. szeptember 29.

.....

Dr. Sipos Áron

TÁRSSZERZŐI NYILATKOZAT

Alulírott *Dr. Hopp Béla* kijelentem, hogy Kiss Bálint szerepe meghatározó volt a

[T4] Cs. Vass, **B. Kiss**, J. Kopniczky, B. Hopp: „*Etching of fused silica fiber by metallic laser-induced backside wet etching technique*", Applied Surface Science 278 (2013) 241–244

publikációban közzétett azon eredményeink kidolgozásában, melyekre a jelölt *„Optikai rácsok és nanostruktúrák lézeres kialakítása és vizsgálata"* című PhD-dolgozatának 4. tézispontjában hivatkozik.

Társszerzőként a hivatkozott eredményeket tudományos fokozatszerzés céljából eddig nem használtam fel, és ezt a jövőben sem teszem.

Szeged, 2015. szeptember 29.

.....

Dr. Hopp Béla

TÁRSSZERZŐI NYILATKOZAT

Alulírott *Dr. Kopniczky Judit* kijelentem, hogy Kiss Bálint szerepe meghatározó volt a

[T4] Cs. Vass, **B. Kiss**, J. Kopniczky, B. Hopp: „*Etching of fused silica fiber by metallic laser-induced backside wet etching technique*", Applied Surface Science 278 (2013) 241–244

publikációban közzétett azon eredményeink kidolgozásában, melyekre a jelölt *„Optikai rácsok és nanostruktúrák lézeres kialakítása és vizsgálata"* című PhD-dolgozatának 4. tézispontjában hivatkozik.

Társszerzőként a hivatkozott eredményeket tudományos fokozatszerzés céljából eddig nem használtam fel, és ezt a jövőben sem teszem.

Szeged, 2015. szeptember 29.

.....

Dr. Heszlerné Dr. Kopniczky Judit

TÁRSSZERZŐI NYILATKOZAT

Alulírott *Flender Roland*, valamint témavezetői, *Dr. Vass Csaba és Dr. Börzsönyi Ádám* kijelentjük, hogy Kiss Bálint szerepe meghatározó volt a

[T3] **B. Kiss**, R. Flender and Cs. Vass: „*Fabrication of Micro- and Submicrometer Period Metal Reflection Gratings by Melt-Imprint Technique*", JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 8, No. 3 (2013) 287-291

publikációban közzétett azon eredményeink kidolgozásában, melyekre a jelölt *„Optikai rácsok és nanostruktúrák lézeres kialakítása és vizsgálata"* című PhD-dolgozatának 3. tézispontjában hivatkozik.

Társszerzőként a hivatkozott eredményeket tudományos fokozatszerzés céljából eddig nem használtuk fel, és ezt a jövőben sem tesszük.

Szeged, 2015. szeptember 29.

.....	.....	.....
Flender Roland	Dr. Vass Csaba	Dr.Börzsönyi Ádám
társszerző	*témavezető*	*témavezető*

TÁRSSZERZŐI NYILATKOZAT

Alulírott *Farkas Balázs* kijelentem, hogy Kiss Bálint szerepe meghatározó volt a

[T2] **B. Kiss**, F. Ujhelyi, Á. Sipos, B. Farkas, P. Dombi, K. Osvay and Cs. Vass: „*Microstructuring of Transparent Dielectric Films by TWIN-LIBWE Method for OWLS Applications*", JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 8, No. 3 (2013) 271-275

publikációban közzétett azon eredményeink kidolgozásában, melyekre a jelölt *„Optikai rácsok és nanostruktúrák lézeres kialakítása és vizsgálata"* című PhD-dolgozatának 2. tézispontjában hivatkozik.

Társszerzőként a hivatkozott eredményeket tudományos fokozatszerzés céljából eddig nem használtuk fel, és ezt a jövőben sem tesszük.

Szeged, 2015. szeptember 29.

.....

Farkas Balázs

TÁRSSZERZŐI NYILATKOZAT

Alulírott *Dr. Dombi Péter* kijelentem, hogy Kiss Bálint szerepe meghatározó volt a

[T1] **B. Kiss**, Cs. Vass, P. Heck, P. Dombi and K. Osvay: „*Fabrication and analysis of transmission gratings produced by the indirect laser etching technique*", J. Phys. D: Appl. Phys. 44 (2011) 415103 (5pp)

[T2] **B. Kiss**, F. Ujhelyi, Á. Sipos, B. Farkas, P. Dombi, K. Osvay and Cs. Vass: „*Microstructuring of Transparent Dielectric Films by TWIN-LIBWE Method for OWLS Applications*", JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 8, No. 3 (2013) 271-275

publikációkban közzétett azon eredményeink kidolgozásában, melyekre a jelölt *„Optikai rácsok és nanostruktúrák lézeres kialakítása és vizsgálata"* című PhD-dolgozatának 1. és 2. tézispontjaiban hivatkozik.

Társszerzőként a hivatkozott eredményeket tudományos fokozatszerzés céljából eddig nem használtam fel, és ezt a jövőben sem teszem.

Budapest, 2015. szeptember 29.

.....

Dr. Dombi Péter

TÁRSSZERZŐI NYILATKOZAT

Alulírott *Dr. Ujhelyi Ferenc* kijelentem, hogy Kiss Bálint szerepe meghatározó volt a

[T2] **B. Kiss**, F. Ujhelyi, Á. Sipos, B. Farkas, P. Dombi, K. Osvay and Cs. Vass: „*Microstructuring of Transparent Dielectric Films by TWIN-LIBWE Method for OWLS Applications*", JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 8, No. 3 (2013) 271-275

publikációban közzétett azon eredményeink kidolgozásában, melyekre a jelölt *„Optikai rácsok és nanostruktúrák lézeres kialakítása és vizsgálata"* című PhD-dolgozatának 2. tézispontjában hivatkozik.

Társszerzőként a hivatkozott eredményeket tudományos fokozatszerzés céljából eddig nem használtam fel, és ezt a jövőben sem teszem.

Budapest, 2015. szeptember 29.

.....

Dr. Ujhelyi Ferenc