

**Nagy intenzitású hibrid szilárdtest - excimer lézerrendszerek  
fejlesztése illetve optimalizálása, és alkalmazásuk a  
rövidimpulzusú anyagmegmunkálás területén**

PhD tézisek

Írta:

**Békési József**

Témavezető: **Dr. Simon Péter**

Belső konzulens: **Prof. Szatmári Sándor**

Szegedi Tudományegyetem

Kísérleti Fizikai Tanszék

Szeged

2003

## I. Tudományos előzmények, célkitűzések

A jól ismert fázismodulált impulzus erősítés (*CPA: Chirped Pulse Amplification*) technikának köszönhetően kompakt, nagy intenzitású szilárdtest lézerrendszerek széles körben kerülnek alkalmazásra napjainkban, uralkodó szerepet töltve be a felhasználási területek jelentős részében. Ezen lézerrendszerek túlnyomórészt Ti:Sa alapúak, és az infravörös tartományban - 800 nm-es hullámhossz környékén - működnek. Viszonylag kis mértékű tudományos erőfeszítés irányult azonban olyan megbízható és könnyen kezelhető rendszerek fejlesztésére, amelyek az elektromágneses spektrum ultraviola (*UV*) tartományában sugároznak. Számos felhasználás esetében azonban nagy intenzitású UV femtoszekundumos nyalábok alkalmazása jelentős előnyökkel járhat az infravörös lézerek nyújtotta lehetőségekkel szemben. A nagyintenzitású kísérletek többségében például az alkalmazott lézerrendszer legmértékűbb paramétere a legkisebb elérhető fókuszméret. Összehasonlítva a 800 nm környékén működő szilárdtest lézerek nyújtotta lehetőségeket az UV lézerekével, az utóbbiak esetében - a hullámhossz-különbségből adódóan - kb. háromszor kisebb elméletileg elérhető fókuszmérettel számolhatunk. Ehhez járul hozzá az általában gáz közegű UV lézerek anyagában létrejövő torzulások kisebb aránya. A két effektus kombinációjából adódóan tipikusan körülbelül 10-100-szor kisebb fókusztérület érhető el ilyen rendszerekkel a szilárdtest lézerekhez viszonyítva.

Pillanatnyilag nem ismert olyan eljárás, amelynek segítségével jó hatásfokkal tudnánk nagy energiájú és rövid impulzushosszú UV sugárzást előállítani. A legalkalmasabb módszer e célra frekvencia-többszörözés segítségével előállított rövid UV impulzusokat erősíteni egy speciálisan módosított excimer modulban. A rövid impulzusok előállításához különböző szilárdtest- illetve festéklézer-rendszerek alkalmazhatók. A Ti:Sa alapú szilárdtest lézerek kezelhetőség, megbízhatóság és ismétlési frekvencia tekintetében is előnyösebb tulajdonságokkal bírnak. Egy  $\lambda = 745$  nm-re hangolt rendszer esetén frekvencia-háromszorozás után megkapható a KrF aktív közegben történő erősítéshez szükséges 248 nm-es hullámhosszú rövid impulzus, amely ezután különböző optikai eljárások alkalmazásával erősíthető speciálisan módosított excimer modulokban. A napjainkban kereskedelmi forgalomban is kapható megbízható, könnyen kezelhető és nagy ismétlési frekvenciát biztosító szilárdtest lézerek új utat nyitottak szilárdtest – excimer hibrid lézerek kifejlesztéséhez, lehetővé téve a különféle rendszerek előnyös tulajdonságainak kombinálását. Ezt a fejlesztési

irányt követi a jelen dolgozat, kiegészítve a rendszerhez kapcsolódó alkalmazási lehetőségek tanulmányozásával.

A rövidimpulzusú lézerrendszerek felhasználási területei között fontos szerephez jut az egyre szélesebb körben alkalmazott lézeres anyagmegmunkálás, különösen abban az esetben, ha nagy optikai felbontóképesség kívánatos. Nagy precizitású anyagmegmunkálás esetén a legfontosabb követelmények a rendszerrel szemben a rövid behatolási mélység, a rövid hővezetési hossz és nagy optikai felbontás. A nagy intenzitás többfotonos abszorpciót eredményez, ezáltal minimalizálva a behatolási mélységet azon anyagok esetében is, amelyek egyébként az UV tartományban is magas transzmisszióval rendelkeznek. A rövid impulzushossz meggátolja a folyamat során keletkező hő szétterjedését a környező területekre, lehetővé téve kisméretű struktúrák létrehozását. Ezen tulajdonságokat kombinálva a rövid hullámhossz biztosította nagy optikai felbontással a legtöbb (más módszerekkel egyáltalán nem, vagy alig megmunkálható) anyag mikron alatti méretű megmunkálása válik lehetővé.

PhD munkámban célul tűztem ki nagy intenzitású femtoszekundumos UV lézerrendszerek paramétereinek (mint pl. kimenő energia, ismétlési frekvencia, átlagteljesítmény) javítását, illetve a rendszerhez kapcsolódó felhasználási lehetőségek szélesítésének vizsgálatát. Ezek között is kitüntetett helyet foglalt el a rövidimpulzusú szubmikronos anyagmegmunkálás. A kísérletek során különös figyelmet fordítottam azon lézer- és optikai paraméterek optimalizálására, amelyek a mikron alatti méretű felületmegmunkálás szempontjából fokozott jelentőséggel bírnak. Célul tűztem ki továbbá olyan leképezési technikák vizsgálatát, amelyek segítségével nagy optikai felbontás érhető el, a lehető legkisebb mértékű energiaveszteség mellett. Nagy felületek gyors és effektív megmunkálása válik ezáltal lehetővé.

## **II. Vizsgálati módszerek és eszközök**

A kísérletek során nagy számú vizsgálati módszert és eszközt alkalmaztam. A nagy intenzitású szilárdtest - excimer rendszer kifejlesztéséhez egy kiloherzes ismétlési frekvenciájú, 745 nm-es hullámhosszon működő Ti:Sa lézerrendszert használtam (*Spectra Physic Inc., USA*) a rövid impulzusok generálására. A frekvencia konverzióhoz olyan háromszorozó egységet építettem, amely igen kis helyet elfoglaló lineáris elrendezésének köszönhetően stabil, mindennapos beállítási eljárást nélkülöző működtetést tesz lehetővé.

Nemlineáris közegként BBO kristályok (*CASIX, Kína*) kerültek felhasználásra. A végerősítő kifejlesztéséhez különböző KrF excimer modulokat (*Lambda Physik GmbH, Németország*) alakítottam át és optimalizáltam a rövid impulzusú erősítés szabta követelményekhez. Az excimer erősítők optimalizálása során használt optikai elrendezések az „off-axis erősítés” és az „interferometrikus multiplexelés” elvén alapulnak. A nyalábprofillal kapcsolatos mérésekhez egy digitális képfeldolgozó rendszert használtam (*MrBeam, LLG, Göttingen*). Az impulzushossz meghatározásához gázok kétfotonos ionizációján alapuló UV autokorrelátor állt rendelkezésre. A Ti:Sa rendszerben működő lézerek teljesítményének mérésére egy Spectra Physics teljesítménymérőt (*model 407a*), a 745 nm-es nyaláb energiájának mérésére pedig Gentec *RJP735* típusú energiamérőt használtam. A különböző energiájú 248 nm-es hullámhosszú erősítetlen illetve erősített lézerimpulzusok energiájának mérésére Gentec *ED100, ED200, ED500*, vagy *RJP735* típusú piezoelektromos elven működő energiamérőket alkalmaztam. A spektrális vizsgálatokhoz egy házi készítésű Littrow-elrendezésű rácsos spektrográfot használtam. A különböző lézeregységek pontos időbeli szinkronizálását gyors fotodiódákat (*Hamamatsu R1193U, Alphas UPD-200-UD*) alkalmazva egy nagy sávszélességű (1 GHz) Tektronix (*Tektronix 7104*) oszcilloszkóp segítségével végeztem.

Az anyagmegmunkálási vizsgálatok során különféle hullámhosszú ( $F_2$ : 157 nm, ArF: 193 nm, KrF: 248 nm, XeCl: 308 nm, Ti:Sa: 745 nm) és különböző impulzusidejű (ns-os, ps-os, illetve fs-os nagyságrendű tartományba eső) lézereket használtam. Különböző leképezési technikákat hasonlítottam össze, különböző típusú és minőségű optikák – pl. egyszerű UV lencsék, akromatikus UV „transzmissziós” objektívek (*Spindler&Hoyer, DUV Retro*) és Schwarzschild típusú „reflexiós” objektívek (*Ealing 25x, 36x*) – felhasználásával. A kísérletek során egyszerű amplitúdomaszkokat, diffrakciós amplitúdomaszkokat vagy speciális módon tervezett és előállított diffrakciós fázismaszkokat (*DFM*) alkalmaztam. A minták nagy pontosságú pozicionálásához xyz-eltolókat (*Physik Instruments, M-510.11*) használtam, saját felépítésű monitoráló rendszerrel kiegészítve. Az ablált felületeket fénymikroszkóp (*Zeiss-féle Axioskop*) és pásztázó elektronmikroszkóp (*Zeiss, DSM 962*) segítségével vizsgáltam. Az ablált minták mélységét egy sekély struktúrák alaki tanulmányozására használható úgynevezett profilométerrel (*Dektak 3030 Auto II Stylus*) illetve atomi erőtér mikroszkóppal (*AFM*) mértem.

### III. Új eredmények

Az I. pontban leírt tudományos célkitűzéseket a II. pontban ismertetett kísérleti módszerek és eszközök segítségével megvalósítva az alább felsorolt új tudományos eredményeket értem el:

#### **1. Kifejlesztettem egy olyan szilárdtest – excimer hibrid lézerrendszert, amely 50 mJ energiájú femtoszekundumos UV impulzusok előállítását teszi lehetővé - 3 erősítési átmenetet alkalmazó - „off-axis” elrendezésben [4].**

A rendszerben a rövid impulzusok generálása egy Ti:Sa alapú szilárdtest lézerben történik, az infravörös (IR) hullámhossz-tartományban. Az alkalmazott szilárdtest-lézerrendszer egy diódalézerrel (*Millenia*) pumpált Ti:Sa oscillátorból (*Tsunami*) és egy Nd:Ylf (Merlin) lézerrel pumpált regeneratív erősítőből (*Spitfire*) áll, és  $\sim 400 \mu\text{J}$  energiájú impulzusok előállítására képes maximálisan 1000 Hz ismétlési frekvenciával. A „kezdeti” 745 nm-es hullámhossztól frekvencia-háromszorozás segítségével juthatunk az UV tartományban lévő 248 nm-es hullámhosszig. A frekvenciakonverzióhoz egy - BBO kristályokat alkalmazó - lineáris elrendezésű háromszorozó egységet építettem, amely lehetővé teszi a frekvencia-többszörözés esetén szokásos mechanikus optikai késleltető karok nélkülségét. Ezáltal az elállítódási lehetőségek túlnyomó részét kiküszöböltem, és  $\sim 8\%$ -os konverziós hatásfokot értem el. A kapott kb. 150-180 fs-os UV impulzusokat egy speciálisan módosított nagy apertúrájú KrF excimer modulban erősítettem. Három erősítési átmenetet alkalmazó „off-axis” típusú optikai elrendezésben - amelyben a rövid impulzus a kisülés hosszirányú tengelyéhez képest ferde szögben halad át az erősítő közegen – működtetve az erősítőt, 50 mJ energiájú kimenő impulzusokat detektáltam. Az erősített nyoláb impulzushosszát többlövéses UV autokorrelátorral 530 fs félértékszélességűnek mértem.

#### **2. Az 1. pontban leírt excimer erősítőn a polarizációs multiplexeléses technikának kétnyalábos osztáson alapuló változatát alkalmazva, 100 mJ energiájú impulzusok kibocsájtására alkalmas rövidimpulzusú UV fényforrást építettem [4].**

Ez esetben a rövid impulzusok generálásához egy festéklézerekből álló, az elosztott visszacsatolású festéklézerek (EVFL) működési elvén alapuló rendszert használtam (*Szatmári-féle festéklézer-rendszer*) az erősítő telítéséhez szükséges kb. 2-3 mJ bemenő energia biztosítására. Az impulzusok háttérsugárzástól való megszürése érdekében egy 3 m hosszúságú, nagy intenzitású térszűrőt építettem, magas roncsolási küszöbű  $\text{CaF}_2$

pinholokat készítve és beépítve a rendszerbe. A Sagnac-féle interferométerek működési elvén alapuló polarizációs multiplexelés segítségével a bemeneten kettéosztott nyalábot két-két „off-axis” átmenetben erősítettem. A nyalábok fázishelyes egyesítésével 100 mJ kimenő energiát mértem az 1. pontban alkalmazott speciális excimer erősítő kimenetén. A vizsgált kétszeresen diffrakciólimitált femtosekundumos nyaláb előimpulzust nem tartalmazott, köszönhetően az elrendezésben használt polarizációs osztó tervezésének. A polarizációs osztó tervezésekor a főbb szempontok a megfelelő mechanikai stabilitás elérése (vastag hordozóanyag), az anyagban fellépő többfotonos abszorpció okozta veszteségek lecsökkentése (különböző hordozóanyagok összehasonlítása), illetve előimpulzusok keletkezésének elkerülése (ékes lap használatának átgondolása, térbeli elhelyezés megválasztására vonatkozó megfontolások) voltak.

**3. Kifejlesztettem egy olyan Ti:Sa - excimer hibrid lézerrendszert, amely 30 mJ energiájú UV impulzusok kibocsájtására képes, 300 Hz-es ismétlési frekvencia mellett, több mint 9 W-os átlagteljesítmény elérését téve lehetővé, 300 femtoszekundumos UV optikai impulzusok formájában, 248 nm-es hullámhosszon [7].**

Az UV lézerek alkalmazásainak széles körében nem okvetlenül a maximális kimenő energia, hanem az elérhető legnagyobb átlagteljesítmény a legfontosabb paraméter. Mivel az 1. és 2. pontban leírt rendszerek esetében az elérhető legnagyobb ismétlési frekvencia a néhány 10 Hz-es tartományba esett, az átlagteljesítmény a nagy kimenő energia ellenére is csak alacsony értékeket érhetett el. Kihhasználva a Ti:Sa rendszerek nyújtotta nagy ismétlési frekvencia elérését biztosító lehetőségeket, olyan Ti:Sa - excimer hibrid rendszert fejlesztettem ki, amely több mint 9 W-os átlagteljesítmény elérésére képes 300Hz-es ismétlési frekvencián. A szükséges magas repetíciós ráta biztosításához egy különleges, nagy teljesítményű excimer lézernek (*NovaLine100, Lambda Physik*) a rövidimpulzusú erősítéshez optimalizált, nagy apertúrájú módosított változatát alkalmaztam. A működési paraméterek optimalizálását többek között a pillanatnyilag tárolt energia mérésével végeztem. Megvizsgáltam a különböző elektromos és működési paraméterek – mint pl. a „peaking” kondenzátorok eredő kapacitása, az erősítőben alkalmazott gáz nyomása – hatását a pillanatnyilag tárolt energiára és azt állapítottam meg, hogy maximális tárolt energia 28.5 nF-os eredő kapacitású „peaking” kondenzátorok esetén, 3.3 bar gáznyomás esetén érhető el. Ezen kapacitás és nyomás paraméterek mellett, az 1.pontban is alkalmazott - 3 optikai átmenetet használó - „off-axis” elrendezés segítségével 30 mJ-os

erősített impulzusokat detektáltam. Az erősített nyaláb impulzushosszát autokorrelációs mérés segítségével 300 fs-nak mértem.

A fent leírt rendszerek nyújtotta lehetőségeket számos felhasználási területen lehet kamatoztatni. Ezek közé tartozik pl. XUV impulzusok generálása frekvencia-sokszorozás segítségével [5], a rövidimpulzusú ablációs mechanizmus vizsgálata [1], különböző anyagok ablációs tulajdonságainak tanulmányozása [2], fémek leválasztása polymer illetve Si minták felületére [13,14], periodikus struktúrák illetve lyukak ablálása a mikron alatti mérettartományban [1,3,5,6,8] stb. Az anyagmegmunkálásra vonatkozó kísérletek legfontosabb eredményei a következő pontokban foglalhatók össze:

**4. Az ablációs folyamat során bekövetkező morfológiai változásokat az impulzus-időtartam függvényében, nagy hővezető képességű anyagok esetén tanulmányozva megállapítottam, hogy az olvadásos jelenségek mértéke erősen függ a lézerimpulzus hosszától. Nagy pontosságú szubmikronos megmunkáláshoz 5 ps-nál rövidebb impulzusok szükségesek. Hagyományos illetve nanorészecskékből felépülő arany filmek ablációs tulajdonságainak vizsgálatainak során bemutattam, hogy míg az ablált felületek morfológiája megegyezik, a nanorészecskékből felépülő filmek esetében 5-ször nagyobb ablációs sebesség mérhető [1,2].**

A vizsgálatok kimutatták, hogy a nagy hővezető képességű anyagok fotomaratása (*ablációja*) során kialakuló struktúrák minősége szorosan függ az alkalmazott impulzus hosszától. A kísérletekben rövid impulzushosszú KrF lézerrendszert használtam, amelyben az impulzushosszt 500 fs és 50 ps között lehetett változtatni. A folyamatok pontos nyomkövetése érdekében mikron alatti méretű rácsokat és lyukakat abláltam fémes illetve félvezető minták felületére. A minták besugárzását követően a felületi struktúrák körül megfigyelt olvadt réteg vastagsága függ az impulzushossztól, illetve az adott anyagra jellemző elektron-fonon relaxációs időtől és hővezető-képességtől. A vizsgálatok eredménye szerint 50 ps-os impulzusokkal ablált próbák esetében nem kívánt olvadásos jelenségek figyelhetők meg, amelyek többsége kiküszöbölhető 5 ps-os impulzusok alkalmazásával. Tovább rövidítve az impulzust, jelentős változás már nem figyelhető meg. Az olvadt réteg vastagságának impulzushossztól való függése egyezik a nemzetközi irodalomban közölt elmélettel, mely szerint az olvadt zóna mérete minimálisra csökkenthető, ha  $L_{th} = \sqrt{2\kappa\tau} \leq \alpha^{-1}$ , ahol  $L_{th}$  a hővezetési hossz,  $\kappa$  az anyag hővezetési

együtthatója,  $\tau$  a lézer impulzushossza és  $\alpha^{-1}$  a sugárzás behatolási mélysége. Ez a feltétel fémek és félvezetők esetében csak néhány pikoszekundumosnál rövidebb impulzusokra teljesül. Az újra megszilárdult struktúrák formája szintén impulzushosszfüggő. Rövid impulzusok esetén inkább éles formák és apró cseppek, míg hosszú impulzusok esetén széles, sima gyűrődések figyelhetők meg.

Új, nanorészecskékből felépülő arany filmeknek a femtoszekundumos impulzushosszra vonatkozó ablációs tulajdonságait (ablációs küszöb, ablációs sebesség, morfológia) vizsgáltam és összehasonlítottam a hagyományos módon párologtatott arany filmek ablációs jellemzőivel. A kísérletekhez fényforrásként egy 50 mJ-os Ti:Sa - excimer lézerrendszert alkalmaztam. Amíg az ablációs küszöb illetve az ablált felületek morfológiája a két anyag esetében hasonlóknak bizonyultak, nanorészecskékből felépülő filmekben végzett kísérletek során mintegy 5-ször magasabb ablációs sebességet figyeltem meg. Az ablációs küszöb és sebesség függött a nanofilm felépítő részecskék méretétől illetve a párologtatás során alkalmazott nyomástól is.

**5. Kísérleti úton megmutattam, hogy UV femtoszekundumos lézerimpulzusokat alkalmazásával acél-minták szubmikronos méretű megmunkálása lehetséges. A szükséges optikai feloldás biztosításához nagy numerikus apertúrájú Schwarzschild-objektívvel képeztem le egy kis méretű amplitúdómaszkot a minták felszínére. Megmutattam, hogy 500 nm-es átmérőjű lyukak fúrhatók a minták felületére, illetve ilyen módon lehetővé válik  $\sim 5 \mu\text{m}$  vastag lemezek átfúrása is. Vastagabb minták esetében előfúrási technikát alkalmaztam [3,5,6].**

Az UV femtoszekundumos lézerek nyújtotta lehetőségek kísérleti úton történő demonstrálása céljából nagy hővezető képességű anyagok (pl. fémek, félvezetők) szubmikronos méretű megmunkálási lehetőségeit tanulmányoztam. Ezen anyagok esetében a mikronnál kisebb méretű struktúrák létrehozása hosszú impulzusú lézerekkel az anyagok besugárzása során fellépő olvadásos folyamatot kísérő jelenségek miatt csak igen korlátozott mértékben vagy egyáltalán nem valósítható meg, amelyet a 4. pontban közölt eredmények is alátámasztanak. Néhány száz nanométeres átmérőjű lyukak különböző típusú fémek felületére történő ablálásához egy egyszerű amplitúdómaszk ( $12\text{-}25 \mu\text{m}$  átmérőjű kör alakú apertúra) leképezésén alapuló optikai elrendezést használtam. Egy Schwarzschild típusú „reflexiós” objektív segítségével elérhető maximális (kb.  $360 \text{ nm}$ -es) felbontást kihasználva lehetővé válik az iparilag nagy fontossággal bíró acél mikrométernél



nagyobb pontosságú megmunkálása is. Néhány 10 lézerimpulzus alkalmazásával 500 nm-es lyukakat abláltam a minták felületére. Megmutattam, hogy nemcsak felületmegmunkálás válik lehetővé  $\mu\text{m}$ -nél nagyobb pontossággal, hanem vékony minták átfúrása is. A vizsgálatok eredménye szerint maximálisan 5  $\mu\text{m}$ -es vastagságú minták átfúrása lehetséges. Vastagabb lemezek esetében azonban – valószínűleg a leképező rendszer nagy numerikus apertúrája és a rövid konfokális tényező miatt – az átfúráshoz megfelelő előfűrási technikák használata szükséges. Egy nagy pontosságú hagyományos (mechanikus) előfűrási technikát alkalmazva szubmikron méretű lyukakat fűrtam 1 mm vastag acél lemezbe.

**6. Kísérleti úton bizonyítottam, hogy nagy intenzitású lézerrendszert alkalmazva a felhasznált leképező rendszer a különféle megmunkálási eljárásokra optimalizálható, jelentősen növelve ily módon a folyamat hatásfokát. Megmutattam, hogy a leképező rendszer optimalizálható a különböző felhasználások szabta követelményekhez, mint a) mikron alatti periódusú felületi struktúrák (rácsok, keresztrácsok) létrehozása, b) nagy számú, 300 nm-es minimális átmérőjű lyuk egyidejű fúrása egy speciális interferometrikus technika alkalmazásával, illetve c) mikrométeres méretű lyukakból álló mátrixok ablálása - speciálisan az adott struktúra létrehozására optimalizált - diffrakciós fázismaszkok (DFM) segítségével [1,6,8].**

Egy viszonylag egyszerű, nagy optikai feloldást biztosító leképező rendszer felhasználásával (Schwarzschild-objektívvel leképezve egy amplitúdórácsot) mikronnál kisebb periódusú rácsokat abláltam fémek, félvezetők, dielektrikumok, illetve hullámvezető anyagok felületére. Két rácsot keresztezve és maszkként felhasználva keresztrácsok ablálhatók a minták felületére. További kísérletekben Fourier szűrést alkalmaztam, és csak kiválasztott diffrakciós rendeket használtam fel a képalkotáshoz. Így minimálisan 300 nm-es átmérőjű lyukakból álló mátrixokat sikerült létrehozni, mindössze néhány lövéssel több tízezer lyukat képezve a minta felületére. Olyan mintázatok esetében, ahol a maszk felületének csak viszonylag kis hányada átlátszó, diffrakciós fázismaszkok alkalmazásával jelentősen hatékonyabb megmunkálás érhető el. Kísérletileg bizonyítottam, hogy ilyen fázismaszkok alkalmazásával mikronos méretű struktúrák hozhatók létre különböző fémek felületén. Mindhárom bemutatott eljárás nagy felületek egyidejű megmunkálását teszi lehetővé lényegesen lecsökkentve ezáltal az egységnyi számú lyuk létrehozásához szükséges impulzusok számát.

**7. Kí dolgoztam egy olyan egylépes lézeres eljárást, amely kvarc hordozóanyagú fázismaszkok gyors és nagy pontosságú létrehozását teszi lehetővé. A maszkot alkotó pixelek mélységére vonatkozó elvárások enyhítésére immerziós technikát alkalmaztam, melynek segítségével a maszk és a közeg törésmutató-különbsége a pixelmélység által meghatározott értékre illeszthető [8].**

Az 5c pontban említett diffrakciós fázismaszkok létrehozása általában igen bonyolult, több lépésből álló, időigényes és nagyon költséges eljárások (pl. maratásos technikák) alkalmazásával valósítható meg. Kísérleti úton bemutattam egy olyan egylépes lézeres abláción alapuló eljárást, amely lehetővé teszi a maszk hordozóanyagát alkotó kvarc mintáknak egyszerű és gyors megmunkálását, biztosítva a fázismaszk optimális működéséhez szükséges megmunkálási pontosságot. A kvarc hordozóanyag megmunkálása bonyolult feladat, különösen kis mélységű, nagy pontosságú, sima struktúrák létrehozása esetén. A fázismaszkok hatékony működéséhez szükséges pixelmélység a  $d = \lambda / (2(n_m - n_k))$  egyenlettel adható meg, ahol  $d$  a kívánt pixelmélység,  $\lambda$  a maszk megvilágítási hullámhossza (248 nm),  $n_m$  a maszk anyagának,  $n_k$  pedig a környezet (immerzió) anyagának törésmutatója. Ezen képlet alapján a maszk hatékony működéséhez 244 nm-es mélységű pixelek létrehozása szükséges (kvarc hordozóanyagon, levegőben). Ilyen kis mélységű struktúrák létrehozása igen bonyolult feladatnak bizonyult. A pixelek mélységére vonatkozó elvárások enyhítésére egy immerziós technikát alkalmaztam, amely lehetővé tette a szükséges pixelmélység szabályozását az immerzió törésmutatójának illesztésével. Desztillált vizet használva immerziós folyadékként a kívánt pixelmélység 900 nm. Ilyen mélységű struktúrákat sikerült nagy pontossággal előállítani pixelenként 2 lövéssel,  $19 \text{ J/cm}^2$ -es energiasűrűségű impulzusokat használva. Az elkészített maszkokat profilométerrel és pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltam, majd 248 nm-en kísérletileg is teszteltem.

#### **IV. Az eredmények alkalmazása**

A felsorolt tudományos eredmények hozzájárulnak a KrF-os excimer erősítők fizikai tulajdonságainak tökéletesebb megértéséhez. Kombinálva a szilárdtest lézerek előnyös

tulajdonságait az UV excimer erősítők biztosította lehetőségekkel, kis méretű és igen nagy teljesítményű rendszerek létrehozása válik lehetővé. A dolgozatban leírt kis méretű és viszonylag alacsony áron beszerezhető lézerrendszerek új utakat nyithatnak olyan fizikai jelenségek tanulmányozásához, amelyekre korábban csak nagy anyagi ráfordítással, jól felszerelt laboratóriumokban nyílt lehetőség. A kifejlesztett rendszerek és leképezési eljárások segítségével hagyományos eszközökkel nehezen megmunkálható anyagok lézeres megmunkálása is lehetővé válik, akár ipari környezetben is.

## V. Publikációs Lista

### A tézispontokat közvetlenül alátámasztó publikációk listája

1. P. Simon, J. Ihlemann, J-H Klein-Wiele, and **J. Békési**: „*Ablation of solid targets with UV femtosecond pulses*”, SPIE **3822**, 118-124 (1999).
2. **J. Békési**, R. Vajtai, P. Simon, and L. B. Kiss: „*Subpicosecond excimer laser ablation of thick gold films of ultra-fine particles generated by a gas deposition technique*”, Appl. Phys. A **69** [Suppl.], 385-387 (1999).
3. **J. Békési**, P. Simon, and J. Ihlemann: „*Femtosecond UV-laser processing of sub-micron holes in steel foils*”, 2000 IEEE, Conference Digest 390 (2000).
4. **J. Békési**, G. Marowsky, S. Szatmári, and P. Simon: „*A 100 mJ table-top short pulse amplifier for 248 nm using interferometric multiplexing*”, Zeitsch. für Phys. Chem. **215**, 1543-1555(2001).
5. P. Simon, **J. Békési**, C. Dölle, J.-H. Klein-Wiele, and S. Szatmári: „*Ultraviolet femtosecond pulses: Key technology for sub-micron machining and efficient XUV pulse generation*”, Appl. Phys. B **74** [suppl.], 189-192 (2002).
6. **J. Békési**, J.-H. Klein-Wiele, and P. Simon: „*Efficient submicron processing of metals with femtosecond UV pulses*”, Appl. Phys A **76**, 355-357 (2002)
7. **J. Békési**, S. Szatmári, P. Simon, and G. Marowsky: „*Table-top KrF amplifier delivering 270 fs output pulses with over 9 W average power at 300 Hz*”, Appl. Phys. B **75**, 521-524 (2002).
8. **J. Békési**, J.-H. Klein-Wiele, D. Schäfer, J. Ihlemann, and P. Simon: „*Surface texturing of metals with sub-micron precision using a short pulse UV laser*”, SPIE 4830, 497-500 (2003) (Student Award of the Conference)

### Egyéb publikációk

9. **J. Békési**, K. Kordás, K. Bali, R. Vajtai, Cs. Beleznai, and L. Nánai: „*UV-laser-induced etching and metal seeding on polymers; a surface characterization*”, App. Surf. Sci. **138-139**, 613-616 (1999).

10. K. Kordás, **J. Békési**, K. Bali, R. Vajtai, L. Nánai, Thomas F. George and S. Leppävuori: „*UV laser-induced liquid phase palladium seeding on polymers*”, J. Mater. Res. **14**, 3690-3694 (1999).
11. K. Kordás, L. Nánai, K. Bali, **J. Békési**, Thomas F. George, S. Leppävuori and A. Uusimäki: „*Palladium thin film deposition on polyimide by cw Ar<sup>+</sup> laser for electroless copper plating*”, Thin Solid Films **384**, 185-188 (2001).
12. K. Kordás, **J. Békési**, R. Vajtai, L. Nánai, S. Leppävuori, A. Uusimäki, K. Bali, Thomas F. George, and G. Galbács: „*Laser-assisted metal deposition from liquid-phase precursors on polymers*”, Appl. Surf. Sci. **172**, 178-189 (2001).
13. K. Kordás, **J. Békési**, R. Vajtai, M. Jauhianen, J. Remes, A. Uusimäki, S. Leppävuori, T. F. George, and L. Nánai: „*Laser-assisted via hole metallization in PCB materials*”, J. Electron. Mater. **30**, 21-24 (2001).
14. K. Kordás, S. Leppävuori, **J. Békési**, L. Nánai, J. Remes, R. Vajtai, and S. Szatmári: „*Nickel deposition on porous silicon utilizing lasers*”, Appl. Surf. Sci. **186**, 232-236 (2002).
15. R. Vajtai, K. Kordás, B. Q. Wie, **J. Békési**, S. Leppävuori, T. F. George, and P. M. Ajayan: „*Carbon nanotube network growth on palladium seeds*”, Mat. Sci and Eng. C **19**, 271-274 (2002).