

Az T046394 számú tematikus

OTKA pályázat zárójelentés

### **Szakmai összefoglaló**

A kutatási téma címe: Excimer lézerekkel keltett plazma vizsgálata és alkalmazása különleges vékonyrétegek és mikrostruktúrák előállítására

futamidő:

2004-2007

támogatási összeg: (11630-258) ezer Ft = 11372 ezer Ft

Témavezető: Dr. Tóth Zsolt

Szeged

MTA Lézerfizikai Tanszéki Kutatócsoport

SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

# **1. A KUTATÁS CÉLJA, TERVEZETT FELADATOK**

## **1. 1. A kutatás célja**

Az impulzuslézeres vékonyréteg építés (Pulsed Laser Deposition: PLD) olyan réteg-előállítási technológia, mellyel eltérő tulajdonságú anyagokból lehet jó minőségű rétegeket előállítani. A PLD során lézerpulzusokat fókuszálunk egy céltárgy felületére, ahol nagy energiájú részecskékből álló plazma keletkezik. A plazmát egy hordozó felületén felfogva azon réteg épül. Az OTKA pályázatunk beadásakor célul tűztük ki olyan vizsgálatok végzését, amelyekkel felderíthetők a lézerrel keltett plazma tulajdonságai vákuumban és inert vagy reaktív háttérgázban, és értelmezhetőek a lejátszódó folyamatok. Olyan lézeres eljárások kidolgozását terveztük, amelyekkel különleges tulajdonságú és összetételű rétegek állíthatók elő.

## **1. 2. A szerződés kutatási munkatervében vállalt feladatok**

A kutatási szerződésben éves bontásban megadott munkaterv tematikus csoportosítása:

1. Különböző összetételű és keménységű polimer-, nitrid- és gyémántszerű rétegek reaktív PLD-vel való előállítása. A különböző gyémánttartalmú filmek elemzése. Széles nyomástartományú reaktív atmoszférában keltett impulzuslézeres plazma tulajdonságainak elemzése. A lézerrel segített impulzusüzemű kémiai gázfázisú leválasztás lehetőségeinek és korlátainak kritikus elemzése.
2. Ultrarövid impulzusokkal történő abláció és PLD mechanizmusának vizsgálata, a targethőmérséklet hatásának elemzése.
3. Nanorészecskék lézeres előállításának és lézeres átvitelének vizsgálata.
4. Ultrarövid és rövid impulzusokkal keltett lézerplazma vizsgálata optikai és spektroszkópiai módszerekkel. Gázokban és folyadékok belsejében keltett plazma és lökéshullámok gyorsfényképezése világos hátterű és Schlieren megfigyeléssel.
5. A különböző ablációs mechanizmusok feltérképezése. Biológiai aktivitást mutató anyagok (pl. oligonukleotidok, pepszin) vékonyrétegeinek előállítása orvosi analitikai és diagnosztikai alkalmazások céljára PLD-vel.
6. Szerves anyagok vékonyrétegeinek előállítása lézeres átmásolással és mátrixszal elősegített lézerdeszorpciós ionizációval orvosi analitikai alkalmazások céljára. A mátrixszal elősegített lézerdeszorpciós ionizáció vizsgálata. A gáztérbe juttatott és ionizált molekulák tömegspektroszkópiai vizsgálata.
7. A rétegek minősítése spektroszkópiai ellipszometriával, Raman spektroszkópiával és mikroszkópiai módszerekkel.

## **1. 3. A szerződésben vállalt kutatások során született publikációk**

Az OTKA pályázat támogatásával a fent kitűzött céljainkat a 4 év kutatómunka során a tömegspektroszkópiai mérések kivételével teljes mértékben megvalósítottuk. Az eredményeinket, 11 konferencia előadás során ismertettük. 1 magyar nyelvű és 13 referált nemzetközi folyóirat cikkünk megjelent vagy elfogadták, 2 beküldött cikkünk jelenleg bírálóknál van, és 2 cikk kézírata készül, melyeket szintén referált folyóiratokhoz tervezzük beküldeni. A tervezett tömegspektroszkópot nem tudtuk beszerezni, ezért - az OTKA bizottság engedélyével - egy UHV vákuumrendszert szereztünk be.

## 2. EREDMÉNYEK

### 2. 1. Reaktív PLD

A magas olvadáspontú átmeneti fémek (Ti, V, Mo, Ta, W) nitridjeiből álló vékonyrétegek nagy keménységük, magas olvadáspontjuk, termodinamikai és kémiai stabilitásuk révén széles körben felhasználhatóak például mikroelektronikai, aeronautikai, és fémipari bevonatokként. Molibdén-, tantál- és wolfram-nitrid vékonyrétegeket állítottunk elő reaktív PLD-vel. Megállapítottuk, hogy a vékonyréteg építést erősen befolyásolja a nehézfém atomok, ionok és a gáztér molekulái között lezajló ütközések száma. A rétegek vizsgálata alapján 10 Pa nitrogénnyomás szükséges ahhoz, hogy a gázfázisú reakciók már domináns szerephez jussanak, és ugyanakkor a fém részecskék még ne lassuljanak le jelentősen az ütközések során, és elérjék a hordozót. Röntgen-diffrakciós mérésekkel kimutattuk, hogy kristályosodás a leválasztási hőmérséklet növelésével erőteljesebb [1].

A kopásálló és korrózió elleni védőréteggént vagy antireflexiós bevonatként alkalmazott gyémántszerű szén rétegek fontos paramétere a rétegben található, a gyémántra jellemző  $sp^3$ -as kötések mennyisége. Megvizsgáltuk, hogy a reaktív PLD hidrogén és metán háttérgáz esetén javítja-e a gyémántszerű tulajdonságokat. Infravörös abszorpcióméréssel kimutattuk, hogy a hidrogént tartalmazó gáz a nyomás növelésével az egyre jobban beépül a rétegbe. Kis nyomások esetén, ahol a plazma részecskéi ritkán ütköznek a háttérgázzal, a rétegek optikai tulajdonságai kismértékben a gyémánt tulajdonságai felé tolódtak el. Abban a nyomás tartományban, ahol a szén plazma többször ütközik a háttérgázzal, a lelassult szén részecskék grafitos kötésekben gazdag réteget építenek. A kémiai gázfázisú leválasztás körülményeinek megfelelő nagy nyomásokon a rétegek polimerszerű tulajdonságokat mutattak. Ekkor a metánban készült rétegek gyorsabban növekedtek, amit a  $CH_x$  gyökök rétegbe történő beépülésével értelmeztünk. [2, 3]

A szilícium karbid szélessávú félvezető, ugyanakkor kemény és korrózió elleni védőréteggént is alkalmazható. PLD-vel kontrollált elem-összetételű nem-sztöchiometrikus rétegeket állítottunk elő, szilíciumból és szénből álló összetett céltárgyak felhasználásával. A minták összetételét ionsugaras analitikával, az optikai tulajdonságait spektroszkópiail ellipszometriával határoztuk meg. Az összetétel változásával a komplex törésmutató az amorf szilíciumra, szilícium-karbidra, grafitos és gyémántszerű szénre jellemző komplex törésmutató értékek tartományában változott [4].

### 2. 2. Ultrarövid impulzusokkal történő abláció mechanizmusának vizsgálata

Ultrarövid lézerimpulzusokkal történő abláció során magas hőmérsékletű és nagy kinetikus energiájú plazma alakul ki. Megvizsgáltuk hogy a lézer impulzus hosszának (~20 ns és ~500 fs) és a hullámhosszának (248 nm és 193 nm) milyen hatása van üvegszerű szén, polietilén tereftalát és polikarbonát céltárgyakból PLD-vel létrehozott rétegek tulajdonságaira. Demonstráltuk, hogy az igen eltérő céltárgyakon a különböző lézerforrások által okozott lézeres abláció leírható és összehasonlítható egy általunk javasolt fizikai mennyiség, a „térfogati teljesítmény sűrűség” használatával. A polimer céltárgyak alkalmazása során hidrogénezett amorf szénrétegeket állítottunk elő. A rétegek hidrogén és oxigén tartalma minden esetben kisebb volt, mint az eredeti céltárgyaké. Megállapítottuk, hogy a térfogati teljesítménysűrűség növelésével üvegszerű szén céltárgyból grafitos, gyémántszerű és porózus rétegek állíthatók elő [5].

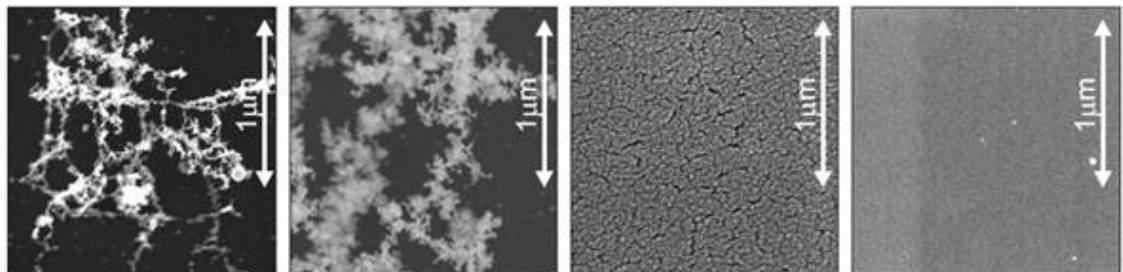
A plazma energiáját a céltárgy felületi hőmérsékletével is lehet szabályozni. Üvegszerű szén céltárgy hatékony előfűtését, illetve plazma állapotba vitelét Ti:zafir lézer (180 fs,  $\lambda =$

800 nm) és KrF excimer lézer (500 fs,  $\lambda = 248$  nm) dupla impulzusaival valósítottuk meg. Az ablációs küszöb környéki intenzitások ( $4 \times 10^{12}$  W/cm<sup>2</sup>) alkalmazásával akkor kaptunk a gyémántra jellemző sp<sup>3</sup> kötésekből gazdagabb rétegeket, ha a két impulzus közötti időközletetés kicsi volt (<10ps), míg magasabb intenzitásoknál ( $7 \times 10^{12}$  W/cm<sup>2</sup>) a késletetés növelésével a rétegekben megjelenő sp<sup>3</sup>-as kötések száma nőtt [6].

### 2. 3. Nanorészecskék lézeres előállításának és lézeres átvitelének vizsgálata

Wolfram és bór-karbid nanorészecskéket állítottunk elő atmoszférikus nitrogén atmoszférában ugyanilyen anyagú céltárgyak excimer lézeres ablációja során. A részecskék méreteloszlását differenciális mobilitás analízissel határoztuk meg. A termikus ablációs energiasűrűség küszöb alatt a méreteloszlás egymódusú, a részecskék átmérője kisebb ~ 20 nm-nél. Nagyobb energiasűrűségeknél az eloszlás kétmódusú, megjelenik egy nagyobb átmérőjű (30-50 nm) nanorészecske populáció is. A méreteloszlást jelentősen befolyásolta még az ismétlési frekvencia, melynek növelése (50 Hz-re) a nagyobb részecske populáció kialakulásának kedvezett. Ezt a gáztérben már kialakult nanorészecskék és az egymást követő lézerimpulzusok kölcsönhatásával értelmeztük [7].

Argonban és nitrogénben lézeres abláció során keltett plazmából állítottunk elő wolfram nanorészecskéket és azokat szilíciumhordozón fogtuk fel. Amint az alábbi képsorozatból is látható, a hordozóra átvitt nanorészecskékből álló agglomerátumok szerkezete nagymértékben függ az alkalmazott háttérgáz nyomásától. Az ábrán nagyfelbontású pásztázó elektronmikroszkóp képek láthatók 10 kPa, 1 kPa, 100 Pa, 10 Pa argon nyomás mellett készített mintákról. Nagy nyomások esetén az összetapadó részecskék hálószerű laza szerkezetet, egyre kisebb nyomáson nanoszerkezetű, majd tömör rétegeket alkotnak. Számítógépes modellezéssel értelmeztük a nanostrukturált rétegek szerkezetének kialakulását és összevetettük atomi erő mikroszkóppal felvett topográfiai képekkel. Eredményeinket nemzetközi referált folyóiratban tervezzük hamarosan megjelentetni.



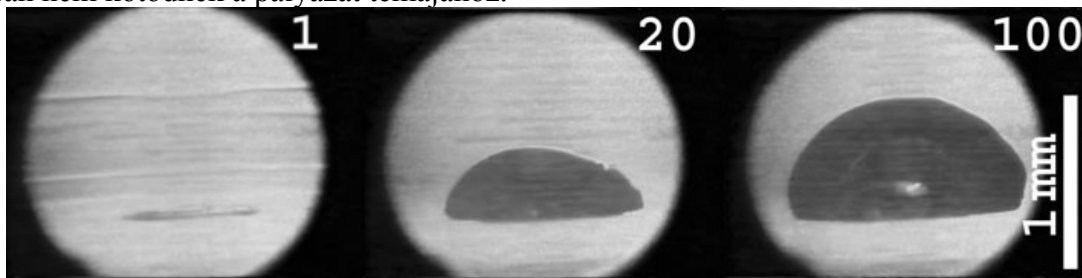
### 2. 4. Lézerplazma vizsgálata optikai és spektroszkópiai módszerekkel

Titán zafír lézer 180 fs hosszú impulzusaival üvegszerű szén céltárgyon keltett plazma időintegrált emissziós spektrumait vettük fel különböző intenzitások mellett. A spektrumok alapján a plazma ionos összetevőinek száma az intenzitás növelésével egyenes arányban nő, míg a neutrális vonalak intenzitása kezdetben növekszik majd  $6 \times 10^{12}$  W/cm<sup>2</sup> fölött csökken. Dupla impulzusok alkalmazásával megvizsgáltuk a spektrumok szerkezetének változását a két impulzus közötti időkülönbség függvényében. Mind az atomos, mind az ionos összetevőktől származó spektrumvonalak intenzitása akkor volt 10 ps időkülönbség esetén volt maximális. A jelenségek értelmezése után tervezzük a publikálást.

Femtosekundumos lézerrel (100 fs) réz céltárgyon keltett plazma fejlődését követtük nyomon dupla lézerimpulzusok segítségével. Az első, nagy energiájú, 620 nm hullámhosszúságú impulzussal keltett plazmát egy késletetett ultraibolya (hullámhossz: 310 nm) impulzussal gerjesztettük tovább. A felületről visszaverődő UV impulzus intenzitását és

plazma UV gerjesztéssel megnövelt emisszióját mértük. A késleltetés függvényében mért intenzitás 4 tranziens csúcsot mutatott, amelyet a különböző időben megjelenő plazma alkotóelemekkel - úgymint az elektronokkal, ionokkal, atomokkal és nanorészecskékkel - azonosítottunk. A nanorészecskéket felfogtuk szilícium hordozón is. Ezek atomi-erő és elektronmikroszkópos vizsgálata befagyott olvadék cseppek jelenlétét mutatta, ami arra utal, hogy a nanorészecskék túlfűtött olvadék felszínből lépnek ki [8].

Gyorsfényképezéssel vizsgáltuk folyadék szilárd határfelületen lejátszódó lézeres abláció lefolyását. Az alábbi képsorozatból látható, hogy a lézeres besugárzást 1, 20 és 100  $\mu\text{s}$ -mal követően a magas hőmérséklet következtében kialakuló buborékok kitágulnak. A fényképek alapján meghatároztuk a táguló buborékokban uralkodó nyomás nagyságát és modelleztük a buborékképződés és a folyadékban történő abláció folyamatait. Meg kell jegyeznünk, hogy ezek a mérések, bár szerepeltek a szerződésben rögzített munkatervben, szorosan nem kötődnek a pályázat témájához.



## 2. 5. Szerves anyagok vékonyrétegeinek előállítás PLD-vel

Az olyan polimereket, amelyek természetes vagy mesterséges körülmények között biológiailag lebonthatók biopolimereknek nevezzük. Az orvostudomány számos területén alkalmazható polihidroxi-butirát (PHB) vékonyrétegeket állítottunk elő PLD-vel ArF excimer lézert alkalmazva. A rétegek infravörös spektrumai alapján a  $0.12 \text{ J/cm}^2$  energiasűrűséggel leválasztott réteg szerkezete hasonlított legjobban az eredeti PHB szerkezetéhez. Az atomi erő mikroszkópos vizsgálataink kimutatták, hogy a polimer réteg a mikrométeres összetevőkön kívül 1-10 mikronos szemcséket is tartalmaz, melyek azonban nem befolyásolják későbbi alkalmazhatóságukat [9].

Összetett molekulaláncú szerves anyagú rétegek PLD-vel történő előállításakor, ha ugyanazon anyagot használjuk céltárgyként, akkor a plazmakeltés többnyire a molekulák degradációjához vezet. Ennek elkerülésére céltárgyként a porított anyagból újrásajtolott tablettákat alkalmazunk. Ekkor az abláció során a porózus céltárgyból megfelelő energiasűrűség hatására már eltávolíthatók szemcsék, melyek anyaga változatlan formában megjelenik a vékonyrétegben. PLD-vel koenzim Q10-ből, pepszinből és teflonból készítettünk vékonyrétegeket. Kimutattuk, hogy koenzim Q10 rétegek esetén nem sikerült az eredetihez hasonló szerkezetű réteget előállítani, míg a pepszin vékonyrétegek megtartották az eredeti kémiai szerkezetüket és biológiai aktivitásukat, ha az energiasűrűség  $1.3 \text{ J/cm}^2$ -nél kisebb volt [10]. Kimutattuk, hogy a préselt teflonból az abláció során kirepülő és később a réteget alkotó részecskék száma exponenciálisan csökken a méretük növekedésével. A lézer energiasűrűségének növelése a részecskék átlagméretének növekedését okozta [11].

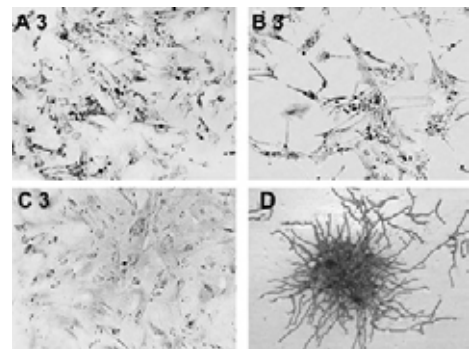
450 fs impulzushosszúságú KrF excimer lézert alkalmazva PLD-vel szerves anyagú rétegeket állítottunk elő. Az ultrarövid impulzusok alkalmazásával a káros hő terjedése csökkenthető, nagyobb energiasűrűségek esetén is megóvhatjuk a biológiai mintánkat. Céltárgyként polimer (politetrafluoroetilén: PTFE), biopolimer (polihidroxibutirát: PHB, poliglükolsav: PGA), enzim (pepszin) és humán minta (fog) porokból préselt tablettákat alkalmaztunk. "Fog-vékonyréteg" leválasztása során  $3,5 \text{ J/cm}^2$ , PHB és a pepszin esetében  $0,6 \text{ J/cm}^2$  energiasűrűség értéknél hasonlított a rétegek infravörös spektruma legjobban a

kiindulási anyagához. PGA esetében a céltárgy és rétegek infravörös spektruma között tapasztalt eltérésről kimutattuk, hogy azt nem kémiai, hanem kristályszerkezeti változás okozza: a polikristályos céltárgyból amorf vékonyréteget választottunk le. [12].

Különböző lézeres kémiai, strukturálási, rétegleválástási eljárásokkal sikerült olyan felületeket kialakítanunk, melyeken irányított sejtmegtapadás, növekedés volt megvalósítható. Elsőként teflon adhéziós tulajdonságait változtattuk meg ArF excimer lézeres besugárzással folyékony aminos, trietilén-tetramin vegyület jelenlétében, majd poliimiden KrF excimer lézeres besugárzással szén vékonyréteget alakítottunk ki. Mindkét esetben csökkent a sejtek letapadása. Ezután polietilén-tereftalát fólián ArF excimer lézerrel alakítottunk ki mikrostruktúrákat, melyek kis érdesség ( $R_a < 100$  nm) esetén elősegítették, nagy érdesség ( $R_a > 100$  nm) esetén pedig gátolták sejtek megtapadását. Végül PLD-vel fs-os KrF excimer lézer alkalmazásával szilíciumra vittünk fel biológiai vékonyrétegeket, melyeken a vizsgált sejtek nagy hatékonysággal tapadtak meg, növekedtek. Az elért eredmények az élő sejt-alapú bioszenzor technikában rendelkezhetnek potenciális alkalmazási lehetőséggel [13].

## 2. 6. Biológiai funkcionalitású anyagok vékonyrétegeinek előállítására lézerindukált előre irányuló átvitel és mátrixszal elősegített lézerdeszorpciós ionizációval

A lézerindukált előre irányuló átvitel (Laser Induced Forward Transfer LIFT) során egy lézerimpulzus segítségével lerepítenek és átmásolnak egy átlátszó hordozón elhelyezett abszorbeáló vékonyréteget a vele szemben elhelyezett hordozóra. A LIFT technika módosításával lehetővé tettük biológiai objektumok kontrollált átvitelét. Egy kvarclapra jól abszorbeáló, 50-100 nm vastag ezüstréteget párologtattunk, majd erre vittük fel a biológiai célanyagokat. Az ezüstréteg elnyeli és mozgási energiává alakítja a megmunkáló KrF excimer impulzus energiáját, elhagyja a hordozó felületét, s elindul a szubsztrát felé, maga előtt tolván a biológiai objektumokat, amelyeket egyúttal meg is véd az elnyelt energia okozta hő károsító hatásától. Modellszámításokkal meghatároztuk az ezüst vékonyréteg hőmérsékletét az átmásolási folyamat közben. A számítási eredmények szerint a teljes ezüst réteg elpárologtatható  $\sim 400$  mJ/cm<sup>2</sup> energiasűrűségű lézerimpulzussal. A számítási eredményt kísérleteink igazolták. Az optikai mikroszkópos képeken lézerrel átmásolt élő patkány Schwann- (A) astroglia (B) és sertés epithélium(C) sejtek és 20 óra elteltével kicsírázott Trichoderma gomba spórái (D), láthatók [14].



Megépítettünk egy mátrix anyaggal elősegített lézeres párologtató (MAPLE) elrendezést, melynek segítségével sikerült olyan, bomlékony biológiai anyagból álló vékonyréteget készíteniük, mint pl. az ureáz. Desztillált vízben oldottunk ureázt különböző koncentrációkban (1, 2, 3, 5, 10 v%), majd az oldatokat  $-30^\circ\text{C}$ -on lefagyasztottuk, s az így kapott céltárgyakat abláltuk KrF excimer lézerrel. Az alkalmazott energiasűrűséget 300-2500 mJ/cm<sup>2</sup> között változtattuk. Vizsgáltuk a leválasztott rétegek kémiai összetételét, morfológiáját, biológiai aktivitását, és kidolgoztunk egy új modellt a leválasztási folyamatok leírására [15, 16].

## 2. 7. A rétegek minősítése

A kísérletek során előálló rétegeinket elsősorban optikai, atomi erő és elektronmikroszkópiával, illetve spektroszkópiai ellipszometriával vizsgáltuk. A rétegek kémiai szerkezetét infravörös spektroszkópiával, összetételét és kötőanyag szerkezetét a KFKI

RMKI és a KFKI-SZFKI munkatársainak segítségével, ionsugaras analitikával és Raman spektroszkópiai mérésekkel vizsgáltuk.

Nagyszámú a-C, illetve a-C:H réteg optikai tulajdonságainak spektroszkópiai ellipszometriai vizsgálatával felállítottuk ezen rétegek „optikai” fázis diagramját, mely jól használható a rétegek jellegének meghatározására. A rétegek optikai tulajdonságát három paraméterrel jellemeztük: a törésmutató által a vizsgált fotonenergia-tartományban felvett maximális értékkel ( $n_{max}$ ), illetve az ehhez tartozó fotonenergia ( $E_{max}$ ) értékkel és az optikai tiltottsáv-szélességgel ( $E_{04}$ ). Ha a rétegek paramétereit közül  $E_{max}$ -ot  $n_{max}$  függvényében ábrázoljuk, akkor egy görbült összefüggő sáv rajzolódik ki. Ha  $E_{04}$ -et  $E_{max}$  függvényében ábrázoljuk, akkor egy monoton növekvő, keskeny, egyenes sávot kapunk. Mindkét esetben az azonos típusú rétegek adatai azonos tartományokban helyezkednek el, bár az utóbbit tekintve abban átfedések figyelhetők meg, melyek feloldhatók, ha a két ábrázolási módot egyesítjük egy háromdimenziós „optikai” fázis diagramban. Ezen felül megadtuk a különböző tartományok elhelyezkedésének kötészerezeti magyarázatát [17].

### 3. A pályázathoz kapcsolódó nemzetközi együttműködés

2004-ben és 2005-ben Görögországban Heraklionban a (FORTH Institute of Electronic Structure and Laser) intézet ultranagy intenzitású lézer laboratóriumában kaptunk 3-3 hét kutatási időt az EU Access for Large Infrastructures program keretében. Részben itt végeztük el az ultrarövid impulzusokkal kapcsolatos kísérleteinket. A Francia Nagykövetség és az EU FP6 Marie Curie ösztöndíjainak támogatásával a pályázatban résztvevő PhD hallgatók tudományos együttműködések keretei között folytattak az OTKA pályázatunk témájához kötődő kutatást.

### 4. A kutatási téma további lehetséges irányai

Az OTKA pályázat támogatásával megvalósult kutatás tapasztalatait felhasználva a közeljövőben tervezzük egy módosított elrendezésű PLD technikával homogén laterális vastagságú rétegek előállítását. Az új, lézeres felületi fűtést is alkalmazó eljárás során félvezető és szerves anyagú rétegek és rétegrendszerek kialakítását szeretnénk megvalósítani.

### 5. A pályázat támogatásával elkészített releváns közlemények

1. M. Bereznaï, Z. Tóth, A.P. Caricato, M. Fernández, A. Luches, G. Majni, P. Mengucci, P.M. Nagy, A. Juhász and L. Nánai: Reactive pulsed laser deposition of thin molybdenum- and tungsten-nitride films, *Thin Solid Films*, 473 (2005) 16-23
2. J. Budai, Z. Tóth, A. Juhász, G. Szakács, E. Szilágyi, M. Veres, M. Koós: Reactive pulsed laser deposition of hydrogenated carbon thin films, the effect of hydrogen pressure *Journal of Applied Physics* 100 (2006) 043501
3. J. Budai, S. Tóth, Z. Tóth, M. Koós: Diamond like carbon films prepared by reactive pulsed laser deposition in hydrogen and methane ambient, *Applied Surface Science* 253 (2007). 8220-8225.
4. I. Hanyecz, J. Budai, E. Szilágyi, Z. Tóth Room temperature pulsed laser deposition of SixC thin films in different compositions *Thin solid films*, közlésre beküldve, bírálat alatt.
5. J. Budai, M. Bereznaï, G. Szakács, E. Szilágyi, Z. Tóth: Preparation of hydrogenated amorphous carbon films from polymers by nano- and femtosecond pulsed laser deposition *Applied Surface Science* 253 (2007) 8235-8241.

6. Nikoletta Jegenyés, Zsolt Tóth, Béla Hopp, József Klebniczki, Zsolt Bor, Costas Fotakis: Femtosecond pulsed laser deposition of diamond-like carbon films: The effect of double laser pulses *Applied Surface Science* 252 (2006) 4667–4671
7. M. Bereznaï, P. Heszler, Z. Tóth, O. Wilhelmsson, M. Boman: Measurements of nanoparticle size distribution produced by laser ablation of tungsten and boron-carbide in N<sub>2</sub> ambient, *Applied Surface Science* vol. 252 (2006) 4368-4372.
8. N. Jegenyés, J. Etchepare, B. Reynier, D. Scuderi, A. Dos-Santos, Z. Toth: Time-resolved dynamics analysis of nanoparticles applying dual femtosecond laser pulses, *Applied Physics A: közlésre elfogadva, nyomdában*
9. G. Kecskeméti, T. Smausz, N. Kresz, Zs. Tóth, B. Hopp, D. Chrisey and O. Berkesi: “Pulsed laser deposition of polyhydroxybutyrate biodegradable polymer thin films using ArF excimer laser”, *Appl. Surf. Sci.*, 253 (2006) 1185–1189
10. Kecskemeti G, Kresz N, Smausz T, Hopp B, Nogradi A Pulsed laser deposition of pepsin thin films *Appl. Surf. Sci.* 247 (2005) 83-88
11. N. Kresz, T. Smausz and B. Hopp: „Growth modeling of pulsed laser deposited Teflon thin layers based on the size distribution of the constituting particulates”, *Applied Surface Science* 253 (2007) 8160–8164
12. B. Hopp, T. Smausz, G. Kecskeméti, A. Klini and Zs. Bor: “Femtosecond pulsed laser deposition of biological and biocompatible thin layers”, *Appl. Surf. Sci.* 253 (2007) 7806-7809
13. B. Hopp, T. Smausz, N. Kresz, C. Vass, Z. Bor, A. Szabó, L. Kolozsvári, A. Nógrádi: „Laser based techniques for living cell pattern formation” *Applied Physics A: közlésre elfogadva, nyomdában*
14. Hopp Béla, Smausz Tamás, Csete Mária, Tóth Zsolt, Kresz Norbert, Kecskeméti Gabriella, Bor Zsolt: Lézerek speciális orvosi és biológiai alkalmazási lehetőségei, *Magyar Tudomány* 12 (2005) 1530-1534
15. T. Smausz, G. Megyeri, R. Kékesi, C. Vass, B. Hopp, E. György, I.N. Mihailescu: „Laser deposition of active ureas thin films” 9th International Conference on Laser Ablation September 24-28 2007 Tenerife, Spain
16. T. Smausz, G. Megyeri, R. Kékesi, C. Vass, B. Hopp, E. György, I.N. Mihailescu: Comparative study on Pulsed Laser Deposition and Matrix Assisted Pulsed Laser Evaporation of urease thin film *Thin Solid Films*, közlésre beküldve, bírálat alatt.
17. J. Budai, Zs. Tóth, Optical phase diagram of amorphous carbon films determined by spectroscopic ellipsometry *Physica Status Solidi C* közlésre elfogadva, nyomdában