

**Plazma tükrök teljes karakterizálása valamint
egylövéses hordozó-burkoló fázis detektor
kifejlesztése**

PhD értekezés tézisei

Wittmann Tibor

Témavezetők:

Prof. Dr. Rácz Béla

Dr. Patrick Audebert

Szegedi Tudományegyetem
Természettudományi és Informatikai Kar
Fizika Doktori Iskola
Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék
2009

1. Tudományos előzmények

A csörpölt impulzuserősítés (CPA) felfedezésével lehetővé vált ultrarövid lézerimpulzusok akár petawattos csúcsteljesítményig való erősítése. Ezen extrém nagy teljesítményű lézerimpulzusok új távlatokat nyitottak meg a lézer-anyag kölcsönhatás kutatásában. Az impulzusokat egy céltárgy felületére fókuszálva akár 10^{22} W/cm²-es csúcshintenzitás is elérhetővé vált, ami bármilyen szilárd anyag felületét szinte pillanatszerűen nagy hőmérsékletű és sűrűségű plazmává változtatja. Ilyen extrém intenzitások és céltárgy hőmérsékletek mellett a kölcsönhatás során relativisztikus effektusok lépnek fel, és ezáltal számos új jelenség kísérleti tanulmányozása válik lehetővé. A rendkívül magas csúcshintenzitásnak köszönhetően olyan, numerikus szimulációkkal már jó ideje megjósolt kísérleteket, mint pl. magasrendű harmonikus keltést oszcilláló plazmafelület-rétegen, vagy proton gyorsítást vékony fóliákról, ma már szinte rutinszerűen hajtanak végre számos lézerlaboratóriumban. Az ilyen típusú lézer-anyag kölcsönhatást kutató kísérletek egyik legfontosabb előfeltétele, hogy a szilárd céltárgy és a lézerimpulzus közötti kölcsönhatás zavartalan legyen. Ez azt jelenti, hogy a lézerimpulzus megérkezése előtt semmilyen nagy intenzitású sugárzás nem érheti a céltárgyat, hiszen az jelentősen befolyásolhatja a kölcsönhatást. Sajnos különböző technikai okokból az erősítési folyamat során egy hosszú ún. piederstál-impulzus és különálló előimpulzusok keletkeznek. Ezeknek a fókuszált intenzitása általában csupán néhány nagyságrenddel kisebb a főimpulzusénál, ami már bármilyen céltárgynál jóval meghaladja az optikai sérülési küszöbértéket. Ennek következtében az előimpulzusok és a piederstál-impulzus alacsony sűrűségű előplazmát hoznak létre, ami a céltárgy felületén kitágul és így a főimpulzus a meredek gradiensű szilárd céltárgy helyett az alacsony sűrűségű előplazmával találkozik. Ez a nem kívánatos jelenség gyakorlatilag egyidős a nagy teljesítményű CPA rendszerekkel és mind a mai napig a legfőbb akadálya lézer-szilárd anyag közötti kölcsönhatás relativisztikus intenzitáson való tanulmányozásának.

Az impulzusok időbeli tisztaságának karakterizálására szolgáló mennyiség az intenzitás kontraszt, ami a főimpulzus és az piedesztál intenzitásainak arányát adja meg. Az elmúlt több mint két évtizedben számos sikeres és sikertelen próbálkozás történt az intenzitás kontraszt javítására különböző optikai módszerekkel. Ezek közül a hatásosnak bizonyulókat a lézerbe implementálva a kontraszt ma már a 10^8 -os értéket is elérheti. Még azonban ez is több nagyságrenddel alacsonyabb a kívánatos értéknél, mivel az előimpulzusok és a piedesztál-impulzus 10^7 W/cm²-es intenzitás felett már alapvetően befolyásolhatja a kölcsönhatást, ugyanakkor nagy teljesítményű lézerek 10^{20} W/cm²-es fókuszált intenzitással ma már több laboratóriumban is megtalálhatóak. Ráadásul a folyamatos fejlesztéseknek köszönhetően az elérhető csúcspont intenzitás folyamatosan növekszik, míg az elérhető legnagyobb kontraszt gyakorlatilag egy évtizede változatlan. Ez mutatja, hogy a lézer kontrasztjának javítása jelenleg a nagy intenzitású lézerfizika egyik legnagyobb kihívása.

A plazma tükör (angol rövidítés után: PM), ami nem más mint egy ultragyors optikai zár, amit maga a lézerimpulzus hoz létre, már a kilencvenes évek elején felmerült potenciális kontraszt javító módszerként. Működése a nagy intenzitásokon lejátszódó ultragyors ionizáción alapul: a lézerimpulzust egy átlátszó céltárgyra fókuszálva, amíg az alacsony intenzitású piedesztál-impulzus és különálló előimpulzusok áthaladnak a céltárgyon, illetve csak az alacsony Fresnel-reflexióval verődnek vissza, addig a főimpulzus eleje a nagy intenzitásával egy nagy reflexiójú sima plazma réteget hoz létre a céltárgy felületén. A főimpulzus megtisztítva a piedesztál-impulzustól és előimpulzusoktól tükörszerűen reflektálódik a plazma rétegen, s ezáltal a visszavert nyaláb kontrasztja jelentősen javul.

Habár a PM-et már jó ideje javasolták a kontraszt javítására, eddig jóformán csak a működési elvet demonstráló kísérletek történtek, de sem a PM kiterjedő karakterizálása sem gyakorlati alkalmazása még nem történt meg. A tézisem első részében a fő célkitűzéseim éppen ezek voltak, vagyis: annak demonstrálása, hogy a

PM hathatósan meg tudja növelni egy nagy teljesítményű lézer kontrasztját, továbbá a PM teljes kísérleti karakterizálása, valamint egy 100 TW-os lézer kontrasztjának javítása egy dupla plazma tükör (angol rövidítés után: DPM) implementálásával és annak teljes karakterizálása.

Ahogy az a fenti bevezetőből kiderült, a téziséms első része a szub-pikoszekundumos lézerimpulzusok intenzitás kontrasztjának javításával foglalkozik. A téziséms második részében egy ettől némileg eltérő területtel foglalkozom, egy egylövéses hordozó-burkoló fázis detektor kifejlesztését mutatom be.

Az ultragyors lézertechnológia rendkívül nagy fejlődésének köszönhetően az ezredfordulóra lehetővé vált olyan erősített lézerimpulzusok létrehozása, amelyek időben annyira rövidek, hogy bennük az elektromágneses hullám már csak néhány oszcillációt végez. Ezek az ún. néhány ciklusos impulzusok egyik legfontosabb tulajdonsága a több ciklusosokhoz képest, hogy az elektromágneses hullám időbeli lefutása a lézerimpulzusban hozzáférhető. Mivel jóformán minden nagy intenzitású lézer-anyag kölcsönhatást közvetlenül az elektromágneses mező irányít, ezért a néhány ciklusos impulzusok ezen tulajdonságuknak köszönhetően az utóbbi időben a tudományos érdeklődés középpontjába kerültek.

Az elektromágneses tér lézerimpulzuson belüli időbeli lefutását az ún. hordozó-burkoló fázis (angol rövidítés után: CEP) adja meg, amit az elektromos tér csúcsa és a burkológörbe csúcsa közötti offset fázisként definiálnak. Nagy ismétlési frekvenciájú néhány ciklusos lézereknél ezt a paramétert pár éve sikerült stabilizálni f-to-2f interferométer segítségével, ami rendkívül nagy hatással volt az időfelbontású lézersektroszkópiára azáltal, hogy lehetővé tette attoszekundumos felbontású pumpa-próba kísérletek kivitelezését. Azonban a fázisstabilizálás jelentős fogyatékosága, hogy technikailag rendkívül összetett, és eddig csupán 0.2 TW-nál kisebb teljesítményű lézereken sikerült alkalmazni, holott ma már több 10 TW-os csúcsintenzitású néhány ciklusos lézerek is léteznek. Ezekkel a maga nemükben

egyedülálló lézerrendszerekkel várhatóan nagy energiájú izolált attoszekundumos impulzusokat lehet majd szilárd céltárgyon való harmonikuskeltséssel létrehozni, ilyen impulzusok pedig várhatóan megnyitják majd az utat az attoszekundumos metrológia és spektroszkópia kísérletek attoszekundumos kontrollá váló továbbfejlesztése felé. Nagy energiájú attoszekundumos impulzusokkal ugyanis olyan pumpa-próba kísérleteket lehet majd végezni, amikben az egyik attoszekundumos impulzus ionizálja az elektront míg a másik kontrollálja a további pályáját. Habár az ehhez szükséges lézerimpulzusok, a burkológörbe különböző paramétereit tekintve (úgy mint impulzushossz és fókuszált csúcsintenzitás) már léteznek, fázisstabilizálás hiányában elektromágneses hullámformától függő kísérletek relativisztikus intenzitásokon továbbra sem végezhetőek. Ezért egy olyan egylovéses mérőműszer kifejlesztése, amelyik egymást követő lézerimpulzusok hordozó-burkoló fázisát tudja detektálni, és ezáltal a „fázis-címkézését” mint új mérési módszert teszi lehetővé fázisstabilizálatlan lézerekkel, az ultragyors optika egyik legnagyobb kihívásává vált.

2. Célitűzések

Az *első célkitűzésem* a PM teljes kísérleti karakterizálása. Korábban a PM működését alapszinten demonstráló kísérletekben csak az időben és térben integrált reflexiót mérték, ami az adott lézernyaláb profiljától is függ, ezért ezek a mérések nem szolgálhattak referenciaként plazmatükrök felállításánál. Az elsődleges céloim a PM teljes tér és időfelbontású kísérleti karakterizálása, s ezáltal a szükséges paraméterek megmérése a Laboratoire d'Optique Appliquée-ben (LOA) található 100 TW-os lézeren egy PM-rendszer felállításához.

A karakterizálás célja: időben és térben felbontott, időben integrált térben felbontott (csúcs) és térben és időben integrált (átlagolt) reflexió mérése a beeső energiasűrűség függvényében különböző impulzushosszakon. Továbbá céloim volt a plazma triggerelési küszöbérték megmérése szintén különböző impulzushosszakon

és demonstrálni, hogy plazma tükrön az optimális energiasűrűséget alkalmazva a nagy-teljesítményű lézerek kontrasztja jelentősen javítható, úgy hogy emellett a visszavert nyaláb fókuszálhatósága és térbeli profilja is javul.

A második célkitűzésem a LOA 100 TW-os lézeréhez egy dupla plazma tükrök felállítása és annak teljes karakterizálása. A célom hogy az energiasűrűséget mindkét PM-en optimalizálva a lézer intenzitás kontrasztját több nagyságrenddel megnöveljem. Továbbá célom volt a rendszer teljes kísérleti és numerikus karakterizálása. Legfontosabb célom annak demonstrálása volt, hogy az első PM-et a közeli mezőbe helyezve – ami a tervezés szempontjából kritikus, de elkerülhetetlen lépés volt a nagy impulzusenergiák miatt (2.5 J) – nem rontja, sőt kis mértékben javítja a nyaláb fókuszálhatóságát, s emellett az impulzus csúcsintenzitásának több mint 40-50%-a megmarad visszaverődés után.

A harmadik célkitűzésem egy egylövéses hordozó-burkoló fázis detektor kifejlesztése. Az f -to- $2f$ interferométerek amelyeket rendszeresen alkalmaznak a néhány ciklusos lézerek fázisának stabilizálására, csupán a fázis változásának mértékét tudják detektálni, de a fázis valós értékét nem. A fázis mérése tehát az interferométerekétől teljesen eltérő megközelítést igényel. Az elmúlt években jó néhány, különböző fázis szenzitív jelenségeken alapuló nem optikai módszert mutattak be, amelyek képesek ugyan a mérésekből kinyerni a fázis mértékét, de ezek a módszerek meglehetősen kezdetlegesek, és egyetlen mérési ponthoz több ezer egymás utáni lövésre van szükségük. Következésképpen ezeket a módszereket csak a jelenleg széles körben használt kis impulzusenergiájú, nagy ismétlési frekvenciájú néhány ciklusos lézereken lehet alkalmazni, mivel jelenleg csak azok fázisstabilizálhatóak. Ezért célul tűztem ki az első egy lövéses hordozó-burkoló fázis detektor kifejlesztését, amely egymás utáni nem-fázisstabilizált lövések fázisának mérésére is képes lesz, s így alkalmazható lesz nagy energiájú néhány ciklusos lézereken is, amelyek nem fázisstabilizáltak.

3. Vizsgálati módszerek

1. A PM teljes kísérleti karakterizálása a Saclay Laser Interaction Center (SLIC)-ben történt a LUCA lézerrel. A teljes karakterizáláshoz egy rendkívül komplex kísérleti elrendezésre volt szükség. Részt vettem a kísérlet tervezésében és felállításában valamint a mérésekben és én végeztem a kísérleti adatok kiértékelését. Lézerimpulzusokat (impulzushossz 60 fs, központi hullámhossz 800 nm, impulzusenergia 100 mJ) fókuszáltunk átlátszó kvarc valamint anti-reflexiós (AR) réteggel bevont kvarc lemezekre. A plazma tükrök reflexiójának méréséhez az energiasűrűséget széles tartományban változtattuk (1-100 J/cm² között). Térben és időben integrált (átlagolt) reflexiót energiamérővel mértünk, az időben integrált térben felbontott (csúcs) reflexiójának méréséhez a PM felszínét egy nagy dinamikájú CCD kamerára képeztük le. Időben és térben felbontott reflexió méréséhez csöppöltük az impulzusokat, amelyek így 1.1 ps hosszúak lettek. A visszavert nyaláb spektrumából a plazma keletkezésének kezdetére lehetett következtetni különböző lézer energiasűrűségértékeknél. A nyalábprofil torzulása a visszavert nyaláb leképezésével történt: a távoli mező vizsgálatához a PM felszíne, a közeli mezőhöz egy attól távolabbi sík került leképezésre.

2. Részt vettem a dupla plazma tükrök rendszer tervezésében valamint átfogóan karakterizáltam a rendszert. A lézer 780 nm központi hullámhosszon 25 fs hosszú 2.5 J energiájú impulzusokat bocsátott ki 10 Hz-es ismétlési frekvenciával. A nagy impulzusenergia miatt a plazma tükrökön az optimális energiasűrűség biztosításához nagyon hosszú fókuszáló tükröt használtunk. Egy f=10 m hosszú null-teleszkóp hozta létre a köztes fókuszot majd kollimálta újra a nyalábot. A köztes fókusz körül helyezkedett el a két PM, mindkettő 45°-os beesési szöggel. Az első PM a közeli mezőben volt a fókuszról 14 cm-re, a második pedig a fókuszban. Az első PM után már nagyobb volt a kontraszt így a másodikon magasabb lehetett az energiasűrűség. A nyaláb S polarizált volt, a céltárgy AR réteggel bevont kvarc. Az energiasűrűséget

a deformálható tükör görbületi sugarának változtatásával optimalizáltam. A nyaláb profilokat a PM-eken egyszerű webkamerákkal, a végső fókuszban pedig nagy dinamikájú CCD kamerákkal figyeltem meg. Egy optikai sugár követő szoftvert használtam a DPM modellezésére. Emellett részt vettem egy rövid kísérletben, amiben magasrendű harmonikus keltését hasonlítottuk össze a DMP rendszerrel valamint nélküle. A harmonikusokat egy XUV spektrográf detektálta.

3. A kísérleteket a Max-Planck-Institut für Quantenoptik-ban végeztem egy néhány ciklusos lézert használva, amely szub-4 fs-os impulzusokat bocsált ki 800 nm-es központi hullámhosszal és 3 kHz-es ismétlési frekvenciával. Az egylövéses fázisdetektor a nagy energiájú küszöb feletti ionizációs elektronok polarizációs tengely menti ionizációjánál fellépő bal/jobbszimmetriát használja fel a fázis mérésére. Ahhoz, hogy a bal és jobb oldali elektron spektrumokat egyetlen lövésből detektálni lehessen, a korábbi multishot fázisméterhez képest a műszer érzékenységének több mint négy nagyságrendes növelésére volt szükség. Ezért az egylövéses detektor tervezésekor a következő alapvető változtatásokat végeztem el: a mágneses árnyékolást és a teljes vákuumkamrát újraterveztem, hogy ezáltal növeljem a detektorokba érkező elektronok számát; megváltoztattam az adatrögzítési technikát az elektronok számlálása helyett az MCP-k erősített feszültségének digitalizálására, és ezáltal lehetővé tettem egy lézerpulzus által kiváltott nagy számú közel egyidejűleg érkező elektron detektálását, akár egymás utáni nagy ismétlési frekvenciával kibocsátott lézerpulzusoknál is; egy leképező rendszert állítottam fel, ami lehetővé teszi a lézer nyalábnak a kölcsönhatási zónában való pontos pozícionálását és intenzitásának optimalizálását.

4. Új tudományos eredmények

1. Plazma tükör teljes kísérleti karakterizálását végeztem el. Megmértem a csúcs, az átlagolt, valamint az időben és térben felbontott reflexiót a beeső nyaláb

energiasűrűségének függvényében különböző impulzushosszakon. 60 J/cm^2 -es beeső lézerintenzitásnál kvarc esetén 74%-os, AR bevonatú kvarc esetén 60%-os csúcsexreflexiót mértem. Mivel a kontraszt javulás egyenlő a plazma keletkezése utáni és előtti (0.3% AR céltárgynál) reflexiók hányadosával, ez közel 200-szoros kontraszt javulást jelent [1].

Időfelbontású mérésekkel megmutattam, hogy a plazmakeltés valamint a reflexió emelkedése a beeső lézernyaláb energiasűrűségének növelésével egyre korábban történik meg, és még a legmagasabb alkalmazott energiasűrűségnél is az impulzus eleje triggereli a PM-et, és nem az előimpulzus vagy a piederstál-impulzus. Megmutattam, hogy a PM térbeli szűrőként működik s így a visszavert nyaláb profilját javítja. Megmértem a plazma triggerelési küszöb-energiasűrűséget, és azt találtam, hogy a lézer impulzushosszával kis mértékben emelkedik.

2. Egy dupla plazma tükör rendszer átfogó kísérleti és numerikus karakterizálását végeztem el [2]. A beeső lézernyaláb energiasűrűségét mindkét PM-en optimalizálva 47%-57%-os csúcsex és 31%-os átlag reflexiót mértem. A 100 TW-os lézer kontrasztját $5 \cdot 10^4$ -el megnövelve rekord nagyságú $5 \cdot 10^{11}$ -es kontrasztot értem el.

Egy optikai terjedést szimuláló program segítségével modelleztem a nyaláb terjedését és jó egyezést találtam a kísérleti eredményekkel, beleértve a nyalábprofilokat a PM-eken és a fókuszot a végső céltárgy síkjában. Alaposan megvizsgáltam az energiasűrűség eloszlását az első PM-en, ami a közeli mezőben van és azt találtam, hogy a nyaláb profilja ahogyan az várható volt, némileg inhomogén. Habár ez elkerülhetetlenül a visszavert nyaláb torzulását okozza, ezt nagyban kompenzálja a második PM, ami a köztes fókuszban helyezkedett el, s így térbeli szűrőként funkcionált. Ennek köszönhetően a DPM rendszer a nyalábprofil minőségét és fókuszálhatóságát nem rontja, sőt éppen ellenkezőleg, a végső fókusz profilja még valamelyest jobb is az eredetnél. Mivel a nagy teljesítményű lézerek fejlesztésének legfőbb célja a céltárgy felszínén minél nagyobb intenzitás elérése,

ezért a fókuszálhatóság megőrzése illetve javítása a DPM rendszer legfontosabb tulajdonsága.

A DPM rendszer a 100 TW-os titán-zafír lézerrendszer integráns része, ami egyszerűen egy eltolható tükörtartó állvány elmozdításával a rendszerből kicsatolható, illetve hozzáadható. Az AR-rel bevont kvarc lemezeket számítógéppel kontrollált léptetőmotorokkal lehet lövésről-lövésre mozgatni, így minden egyes lövés friss még sérületlen felszínre esik a plazma tükrökön.

Összehasonlítottam a harmonikuseltést a DPM rendszer használatával valamint nélküle [4,5]. Az impulzusokat „időben tisztítva” a DPM rendszerrel egy vékony harmonikus nyalábot sikerült létrehozni, valamint a céltárgy tükörszerűen reflektálta a lézernyalábot. A DPM nélkül nem sikerült magasrendű harmonikust keltetni, valamint a visszavert nyaláb diffúz és inhomogén volt. Ezzel demonstráltam, hogy a DPM-el keltett nagy kontrasztú impulzusok megőrzik a szilárd céltárgy meredek elektronikus gradiensét, ami tiszta lézer-szilárd anyag kölcsönhatások kivitelezéséhez elengedhetetlen.

3. Kifejlesztettem egy egylövéses hordozó-burkoló fázis detektort, ami egymás utáni néhány ciklusos lézerimpulzusok fázisát képes mérni [3,6]. Ezt úgy értem el, hogy a műszer érzékenységét a korábbi több lövéses detektorhoz képest több mint négy nagyságrenddel növeltem meg. Az egylövéses hordozó-burkoló fázis detektorral elsőként sikerült felvennem egymás utáni fázisstabilizálatlan lövések fázisát, ami jól mutatja, hogy az általam kifejlesztett mérőműszernek a korábbi több lövéses módszerektől eltérően a méréshez nincs szüksége fázisstabilizálásra. Ezáltal egy új mérési módszert a fázis címkézést tettem lehetővé, amivel hullámformától függő jelenségek tanulmányozása vált lehetővé bármilyen néhány ciklusos lézerrendszeren, függetlenül attól, hogy adott lézer fázisstabilizálható-e vagy sem. Ennek rendkívüli jelentőségét az adja, hogy a jelenleg a technika csúcsát képviselő több-10-TW-os néhány ciklusos lézerek fázisstabilizálatlanok. Várhatóan tehát ez a

mérési módszer [7] lehetővé fogja tenni relativisztikus intenzitásokon végzett lézerszilárd anyag kölcsönhatás elektromágneses hullámformától való függésének tanulmányozását.

A mérőműszerrel egy 3 kHz ismétlési frekvenciájú lézer minden egyes lövésének fázisát detektáltam mindössze 40 μJ -os impulzusenergiát használva a méréshez. Miatán ez csupán 10%-a a széles körben elterjedt több-kHz-es ismétlési frekvenciájú lézerek energiájának, ezért fázis címkézés végezhető ezeken a rendszereken is. A lézert fázisstabilizálás nélkül járátva a lézer fázisának lövésről lövésre való véletlenszerű fluktuációja fázis címkézésnél egyfajta „ultragyors fázis szkennelésként” fog funkcionálni, ami a korábbi fázisstabilizált impulzusokkal végzett fázis szkennelésekhez képest nagyságrendekkel gyorsabb kísérleteket eredményez. Tehát olyan kísérleteknél, amelyekben a fázis függést a teljes 2π tartományban szeretnénk vizsgálni, ez az új mérési módszer számtalan előnnyel rendelkezik majd a technikailag nehezen kivitelezhető fázis szkennelésekhez képest.

Ezek az eredmények [3]-ban kerültek publikálásra, valamint az ismertetésükre az MPQ és a Münchener Műszaki Egyetem egy-egy sajtóközleményt bocsátottak ki [8,9], valamint beszámolt róluk a Laser Focused World [10] és számos ismeretterjesztő weblap [11]. Továbbá a fázis mérési módszer Prof. Rick Trebino jól ismert Ultragyors Optika előadásjegyzetében is ismertetésére fog kerülni. [12]

5. Az értekezéssel kapcsolatos közlemények

Referált folyóiratokban

- [1] G. Doumy, F. Quéré, O. Gobert, M. Perdrix, Ph. Martin, P. Audebert, J. C. Gauthier, J. P. Geindre, T. Wittmann, *Complete characterization of a plasma mirror for the production of high-contrast ultraintense laser pulses* Phys. Rev. E **69**, 026402 (2004)

- [2] T. Wittmann, J. P. Geindre, P. Audebert, R. S. Marjoribanks, J. P. Rousseau, F. Burgy, D. Douillet, T. Lefrou, K. Ta Phuoc, J. P. Chambaret, *Towards ultrahigh-contrast ultraintense laser pulses – complete characterization of a double plasma mirror pulse cleaner* Rev. Sci. Instrum. **77**, 083109. (2006)
- [3] T. Wittmann, B. Horvath, W. Helml, M. G. Schätzel, X. Gu, A. L. Cavalieri, G. G. Paulus, R. Kienberger, *Single-shot carrier-envelope phase measurement of few-cycle laser pulses* Nature Physics **5**, 357 (2009)

Konferenciák

- [4] R. S. Marjoribanks, J. P. Geindre, P. Audebert, T. Wittmann, G. Doumy, P. Martin, M. Perdrix, F. Quere, P. Monot, D. Douillet, T. Lefrou, K. T. Phuoc, S. Sebban, J. P. Rousseau, F. Burgy, B. Cross, *Practical Double Plasma-Mirror Pulse Cleaner for High-Intensity Femtosecond Laser-Plasma Harmonics*, 2005 CLEO/ QELS refereed conference paper **3**, 2021 (2005)
- [5] R. S. Marjoribanks, P. Audebert, J. P. Geindre, T. Wittmann, J. C. Gauthier, Ph. Martin, O. Gobert, M. Perdrix, F. Quere, G. Doumy, P. Monot, P. D'Oliveira, D. Douillet, K. T. Phuoc, S. Sebban, J. P. Rousseau, F. Burgy, B. Cross, *Femtosecond high-intensity laser-plasma harmonics, using practical double-plasma-mirror pulse cleaner* American Physical Society, 46th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, 2004APS DPPCO2015M
- [6] T. Wittmann, B. Horvath, W. Helml, M. G. Schätzel, X. Gu, A. L. Cavalieri, G. G. Paulus, R. Kienberger, *Single-shot carrier-envelope phase measurement of few-cycle laser pulses* Conference on Ultrafast Phenomena, 2008, THU2P.1
- [7] T. Wittmann, M.G.Schätzel, F. Lindner, G.G.Paulus, A Baltuska, M. Lezius, A. Marcinkevicius, F. Tavela, F.Krausz *Carrier-envelope phase measurement of multiterawatt laser pulses* IAMPI, 2006, Szeged, poster P23

Az értekezésben bemutatott egylövéses fázisdetektorról megjelent sajtóközlemények, ismeretterjesztő cikkek:

- [8] http://www.mpg.de/cms/mpq/en/news/press/09_04_19.html

- [9] http://portal.mytum.de/pressestelle/pressemitteilungen/news_article.2009-04-18.8174740109/newsarticle_view
- [10] Ultrafast-pulse Diagnostics: Single-shot technique measures CEP for few-cycle pulses, *Laser Focus World*, June 2009
- [11] <http://www.world-of-photonics.net/link/en/21644171>
<http://www.laseropto.de/index.php?id=5&artid=3261&np=2&L=1>
<http://www.analytica-world.com/news/d/99906/>
<http://idw-online.de/pages/de/news310446>
<http://www.chemie.de/news/d/99906/>
- [12] <http://www.physics.gatech.edu/frog/lectures/index.html>

6. Egyéb közlemények

Referált folyóiratokban

- [13] B. Hopp, T. Smausz, T. Wittmann, F. Ignacz,
Comparative time-resolved study of solid-state and liquid ablation of polyethylene-glycol 1000: temperature, viscosity and surface tension dependence
Appl. Phys. B **71**, 315 (2000)
- [14] B. Hopp, T. Smausz, E. Tombacz, T. Wittmann, F. Ignacz,
Solid state and liquid ablation of polyethylene-glycol 1000: temperature dependence
Opt. Commun. B **181**, 337 (2000)
- [15] Y. Nomura, L. Veisz, K. Schmid, T. Wittmann, J. Wild, F. Krausz,
Time-resolved reflectivity measurements on a plasma mirror with few-cycle laser pulses
New J. Phys. **9**, 9 (2007)

Konferenciákon

- [16] P. Martin, P. Monot, G. Doumy, S. Dobosz, M. Perdrix, F. Reau, P. D'Oliveira, F. Quéré, P. Audebert, J. P. Geindre, J. C. Gauthier, T. Wittmann,
Utilization of a plasma mirror for the production of high-order harmonics from a planar surface
Laser Optics 2003: Superintense Light Fields and Ultrafast Processes; Proceedings of the SPIE **5482**, 55. (2004)
- [17] L. Veisz, Y. Nomura, K. Schmid, F. Krausz, T. Wittmann,
Plasma mirror with few-cycle laser pulses

2005. CLEO/Europe page:422 (2005)

- [18] F. Tavella, T. Wittmann, K. Schmid, B. Horvath, A. Cavalieri, L. Veisz, A. Marcinkevicius, F. Krausz,
Stronger seed for a multiterawatt few-cycle pulse OPCPA
2007. CLEO/Europe page:422 (2005)