

PHD-ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Spektrálisan és térben bontott interferometria vizsgálata és alkalmazásai

Szerző:

BÖRZSÖNYI Ádám

Témavezető:

DR. OSVAY Károly

egyetemi docens



Fizikai Doktori Iskola
Szegedi Tudományegyetem
Természettudományi és Informatikai Kar
Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék
Szeged, 2012

I. Bevezetés

A nagyintenzitású, ultrarövid impulzusokkal végzett kísérletek napjainkban a tudomány egyik legizgalmasabb területéhez tartoznak. Az ezekkel kapcsolatos kutatásoknak számtalan alkalmazása lehet a biológiától az orvostudományokon át, egészen a részecskestruktúrák és a magfúzió vizsgálatáig. Az ilyen impulzusokat előállító lézerrendszerek sokrétű felhasználhatóságuknak köszönhetően egyre szélesebb körben terjednek el, fejlődésük is egyre gyorsul a lehető legnagyobb intenzitások és a legrövidebb impulzusidők elérése felé. Ennek hatása a *Szegedi Tudományegyetemen* is közvetlenül érezhető, hiszen nemrégiben döntöttek az *Extreme Light Infrastructure (ELI)* szegedi megvalósításáról. Az *ELI-ALPS (Attosecond Light Pulse Source)* célja a femtoszekundumos (10^{-15} s), illetve annál rövidebb jelenségek megfigyeléséhez szükséges attoszekundumos (10^{-18} s) fényjelek előállításához elengedhetetlen, a TW-os szintet meghaladó csúcsteljesítménnyel rendelkező, de csupán néhány ciklusból álló, fázisstabilizált lézerimpulzusok előállítása. Ezek keltése és paramétereinek terjedés során történő megőrzése kihívásokkal teli feladat és precíz diagnosztikai eszközöket igényel. Erre a célra az egyik leghatékonyabb eljárás a Spektrálisan és Térben Bontott Interferometria (*Spectrally and Spatially Resolved Interferometry – SSRI*), amely a szélessávú fényforrások spektrális fázisának nagy pontosságú relatív mérésére alkalmas.

Értekezésem célja az *SSRI* módszer előnyeinek és korlátainak vizsgálata modellszámításokon és kísérleti tanulmányokon keresztül, melyeket a *Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékének* (Szeged, Magyarország), a *Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie* (Berlin, Németország) és az *École Polytechnique Laboratoire d'Optique Appliquée* (Palaiseau, Franciaország) kutatóintézetek lézerlaboratóriumaiban végeztem el.

II. Előzmények és célkitűzések

Az ultrarövid impulzusok időbeli alakja terjedés közben jelentősen változhat. A Fourier-analízis szerint minél rövidebb az impulzus, annál szélesebb spektrummal rendelkezik. Az átlátszó anyagok többségében a spektrális összetevők eltérő sebességgel terjednek; ennél fogva a rövidebb hullámhosszúságú komponensek lemaradnak, a hosszabb hullámhosszal rendelkezők előresietnek az impulzus közepéhez képest. Ennek eredményeképpen az impulzusidő növekszik, míg a csúcshintenzitás csökken. A térbeli és időbeli paraméterek nyomon követésére számos diagnosztikai eszközt fejlesztettek ki, melyek közül némelyek

önreferenciás eljárásokon alapulnak (például autokorreláció, *FROG*, *SPIDER*) és abszolút mérésre képesek. Mivel működésük nemlineáris jelenségekre, például másodharmonikus-keltésre épül, így megfelelő nagyságú intenzitást igényelnek, továbbá precizitásuk igen érzékeny a beállítás pontosságára. Ezzel szemben a lineáris vizsgálati módszerek, mint például a *spektrálisan bontott interferometria (Spectrally Resolved Interferometry – SRI)*, és az *SSRI*, könnyen megvalósítható és egyszerűen használható kísérleti összeállítással rendelkeznek, nagyobb pontosság érhető el velük, így igen hatékonyak a spektrális fázis relatív mérésére. Miután a kollineáris *SRI*-vel kapcsolatos vizsgálatokat már kimerítően körüljárták, időszzerűvé vált az *SSRI* alapos tanulmányozása is.

1. Doktori értekezésem első céljának az *SSRI* részletes elemzését tűztem ki, melyen keresztül megvizsgálom a módszer mérési pontosságát befolyásoló tényezőket. Modellszámításokkal meghatározom a fényforrás és a kísérleti elrendezés optimális paramétereit, amelyek mellett a csoportkésleltetés-diszperzió (*Group Delay Dispersion – GDD*) és a harmadrendű diszperzió (*Third Order Dispersion – TOD*) mérési eredményeinek szórására minimális; továbbá sorra veszem az egyes hibaforrások hatását az elérhető legnagyobb pontosságra.

A fázismodulált impulzuserősítő (*Chirped Pulse Amplification – CPA*) rendszerek számára létfontosságú az időbeli és térbeli diagnosztika, mivel az erősített impulzusok csak transzformációlimithez közeli impulzusidővel alkalmazhatóak hatékonyan. Számos esetben előfordul, hogy a kompresszor és a céltárgy között jelentős útkülönbség van. Amennyiben ezt a távolságot az impulzusok légköri nyomású levegőben teszik meg, figyelembe kell venni annak lineáris és nemlineáris tulajdonságait. Fejlettebb lézerrendszerekben gyakran használnak vákuumkamrákat és -csöveket a fázistorzulások csökkentésére. A csövekben visszamaradó gázkeverék diszperziós tulajdonságait, azaz a fajlagos csoportkésleltetés (*Specific Group Delay – SGD*), a fajlagos csoportkésleltetés-diszperzió (*SGDD*) és a fajlagos harmadrendű diszperzió (*STOD*) értékeit még ebben az esetben is szem előtt kell tartani a nyalábutak tervezésekor.

2.a *SSRI* segítségével megmértem a levegő *SGDD*- és *STOD*-értékeit a nyomás függvényében a 0,1 mbar és 1 bar közötti tartományon. Megállapítom azokat az adott terjedési úthosszhoz tartozó nyomásokat, melyek esetén az impulzusidő kiszélesedése 2% illetve 20% alatt marad.

2.b Elvégzem néhány gázkeverék fajlagos diszperziójának mérését különböző koncentrációk mellett. Eredményeimet összehasonlítom a Lorentz–Lorenz-elmélet alapján várt értékekkel.

2.c Új együtthatókat állapítok meg nemesgázok és nitrogén törésmutatójának Sellmeier-formuláihoz azok *SGD*, *SGDD* és *STOD* méréseinek eredményeit felhasználva.

CPA-rendszerrel előállított lézerpulzusok intenzitása könnyen meghaladja azt az értéket, ahol a nemlineáris folyamatok számottevővé válnak, amely önfokuszálódás és önfázismoduláció formájában jelenik meg és gyakran az optikai elemek roncsolódásához vezet. Másrészt érdekes jelenségek, például magasharmonikusok, attoszekundumos impulzusok, fehérkontinuum vagy ultrastabil filamentációk állíthatók elő. Ezeket a kísérleteket gyakran végzik nemesgáz-közegben sajátos elektronszerkezetük miatt. Számos irodalmi forrás közöl értékeket atomszférikus nyomású nemesgázok nemlineáris törésmutatójára, de összefüggő adatsorozat ezek nyomásfüggésére jelenleg nem áll rendelkezésre.

3. Mérési elrendezést dolgozok ki gázok nyomásfüggő nemlineáris törésmutatójának *SSRI*-módszerrel történő meghatározására. Megmérem az argon, levegő, neon, nitrogén és xenon nemlineáris törésmutatóját 0,1 mbar és 1 bar között. Végezetül az 1 bar nyomásra vonatkozó mérési eredményeimet összehasonlítom más forrásokban található értékekkel.

A *CPA*-lézerek további igen fontos problémaköre az impulzusok időbeli kontrasztja, ugyanis a parazita elő- és utóimpulzusok bizonyos kísérletek kimenetelét alapvetően befolyásolhatják. A kontraszt növelésére az egyik legígéretesebb megoldás az ún. keresztpolarizációs hullámok (*XPW*) keltésében rejlik, amely egy olyan harmadrendű nemlineáris folyamat, melyben a beeső fény intenzitásának harmadik hatványával arányosan, arra merőleges polarizációval rendelkező elektromágneses hullámok keletkeznek, így a kontraszt nagyságrendekkel növelhető. Az *XPW*-keltés számos további hasznos tulajdonsággal rendelkezik, például spektrális kiszélesítéssel, időbeli simítással és könnyű kísérleti megvalósíthatósággal. A konverziós hatások azonban igen érzékeny az impulzusok spektrális fázisán keresztül azok időbeli összenyomására, így beérkező impulzusoknak gyakorlatilag transzformációlimitálnak kell lenniük. Számos kísérlet esetében egy másik probléma is felmerülhet, amennyiben az *XPW*-folyamat hatással van az impulzusok *CEP*-jére. Elméleti számolások a *CEP* megmaradását jósolják, de erre kísérleti bizonyítékot még nem mutattak be.

4. Két, egymástól független, az *SSRI*-módszerre alapuló mérési elrendezés használatával kísérletileg igazolom, hogy a keltett *XPW*-impulzusok *CEP*-értéke csak a keltő impulzusok *CEP*-értékétől függ, magától a keltés folyamatától azonban nem.

A CPA-rendszerek által keltett impulzusok térbeli és időbeli alakjának torzulása nagyban hátráltatja a legnagyobb impulzusteljesítmény elérését. Ennek kompenzálására az *AOPDF*-típusú eszközök bizonyultak az egyik legjobban használhatónak, amelyek a fény és kristályban terjedő, megfelelően alakított akusztikus hullámok közti nemlineáris kölcsönhatáson alapulnak. A hanghullámot rádiófrekvenciás jel állítja elő, amely így lehetőséget ad a diszperziós együtthatók széles tartományon belüli tetszőleges beállítására, amikkel közvetve az impulzus térbeli és időbeli lefutása is alakítható. Annak ellenére, hogy az *AOPDF*-ek használata széles körben elterjedt, – egy konferenciaanyagtól eltekintve – nem áll rendelkezésre olyan átfogó tanulmány, amely az eszköz által bevezetett diszperzió pontosságát, valamint az esetleges mellékeffektusokat vizsgálja. Mivel az *AOPDF*-ekben található kristály elő- és hátlapja szöget zár be, felmerülhet annak gyanúja, hogy a nyaláb szögdiszperzióssá válhat; sőt a nemlineáris kölcsönhatás során előfordulhat az is, hogy a nyaláb szögdiszperziója a rádiófrekvenciás jel fázistulajdonságaitól függ.

5. Mérésekkel megállapítom egy programozható *AOPDF* eszköz beállítási pontosságát, valamint a visszamaradó szögdiszperzióját, majd a kapott eredményeket összehasonlítom modellszámításaim alapján várt értékekkel.

III. Vizsgálati módszerek

Kutatásaim során különböző módszereket, anyagokat és eszközöket használtam, melyek részletesen az alábbi felsorolásban mutatok be.

1. Az *SSRI* felvételek kiértékelésére alkotott algoritmus megvalósításához a legkisebb négyzetek módszerére alapuló nemlineáris függvényillesztést alkalmaztam. A forráskódot a platform-függetlenség érdekében C++ nyelven írtam. Doktori tanulmányaim során méréseim kiértékeléséhez mindvégig ezt a szoftvert alkalmaztam.

Az *SSRI*-eljárás modellezés során felételeztem, majd a későbbiekben kísérletileg alkalmazott összeállítása egy Mach–Zehnder-interferométer és egy kétdimenziós leképző spektrográf kombinációján alapult. Fényforrásként 800 nm központi hullámhosszal és legalább 70 nm sávszélességgel rendelkező femtoszekundumos lézernyalábot alkalmaztam. A kísérleti körülmények és paraméterek optimalizálását Monte–Carlo-szimulációk segítségével hajtottam végre. Az általam írt kiértékelő szoftver pontosságát és hatékonyságát összehasonlítottam a széles körben alkalmazott Fourier-módszerre épülő algoritmusokkal.

2.a A levegő diszperziós tulajdonságainak mérését két lépésben végeztem el. Először *SSRI*-módszer alkalmazásával meghatároztam a laborbeli levegő *SGDD*- és *STOD*-értékét oly

módon, hogy a Mach–Zehnder-interferométer karhosszainak különbségét pontosan az impulzusok követési távolságának többszöröseire állítottam be. A második lépésben egy zárt, szabályozható nyomású gázcsövet helyeztem a mérőkarba, amelyet levegővel töltöttem fel, és nyomását 0,01 mbar és 1 bar között változtattam. Mivel ebből a mérésből csak a diszperzió relatív változására lehet következtetni, az első mérés eredményeit használtam referenciaértéknek.

2.b A 2.a pont második kísérletében leírt összeállítást alkalmazva, a gázcsövet ismert koncentrációjú gázkeverékekkel töltöttem meg. Demonstrációs célból kicsiny (He és Ne), illetve nagy (Xe) diszperzióval rendelkező gázt kevertem közepesen diszperzív molekuláris nitrogénnel.

2.c Olyan regressziós algoritmust hoztam létre, amely törésmutatóértékek és fázisdiszperzió együttes figyelembevételével állapítja meg Sellmeier-típusú törésmutató-függvények együtthatóit. Ezt az eljárást alkalmaztam nemesgázok és nitrogén új Sellmeier-együtthatóinak kiszámításához, melyhez nemrégiben megállapított diszperziós tulajdonságaikat és független közleményekben található törésmutatóértékeiket használtam fel.

3. Különböző gázok nemlineáris törésmutatójának méréséhez olyan Mach–Zehnder-interferométert építettem, melynek mindkét karja ugyanabban a gázcsőben halad, de intenzitásukat részlegesen áteresztő tükrök segítségével 10:1 arányban osztottam fel. Kiértékelő algoritmust állítottam össze, amely az eltérő intenzitások miatt fellépő spektrális fáziskülönbségből állapítja meg az adott nyomáshoz tartozó nemlineáris törésmutató értékét.

4. Két különböző kísérletet végeztem el annak bizonyítására, hogy az *XPW*-folyamat nem befolyásolja az impulzusok *CEP*-értékét. A Mach–Zehnder-interferométer karjait polarizációs osztóval hoztam létre, így a mérőkarban az *XPW*-impulzusok haladtak, míg a referenciakarban a fundamentális nyaláb terjedt. Az első kísérletben különböző nagyságrendű expozíciós idők alatt összeintegrált interferenciamintázatok láthatóságát vizsgáltam. A második mérés során üvegékek mozgatásával ismert módon hangoltam az *XPW*-nyaláb *CEP*-értékét, amit interferometrikus módszerrel ellenőriztem.

5. Egy *AOPDF* eszköz anyagi és szögdiszperziójának teljes bemérését végeztem el egy *CPA* lézerrendszer különböző fokozataiból kicsatolt nyalábokkal. Az anyagi diszperzió mérése szokásos *SSRI*-módszerrel történt. A fázisfront szögdiszperzió megállapításához invertált Mach–Zehnder-interferométert alkalmaztam, míg egy kétdimenziós leképző spektrográf részére fókuszált nyalábbal a terjedési irány szögdiszperziót is megállapítottam. A nyaláb

vízszintes és függőleges irányú metszeteinek vizsgálatához mechanikus nyalábforgatót használtam.

IV. Új tudományos eredmények

Tudományos eredményeimet az alábbi tézispontokban foglalom össze:

1. Kiértékelési eljárást fejlesztettem ki *SSRI* segítségével rögzített kétdimenziós interferogramok feldolgozásához. Monte–Carlo-szimulációk alapján megállapítottam a leggyakrabban előforduló hibaforrások fázisderiváltak pontosságára kifejtett hatását [T1]. Legkritikusabbnak a kamera zajából eredő hiba bizonyult. A modellezés során figyelembe vettem továbbá a kerekítési hibák, a láthatóság változásának, a fényforrás sávszélességének, a hullámhossz-kalibráció pontosságának, a hordozó-burkoló fázis csúszásának, Gauss-nyalábok görbült fázisfelületeinek és az optikai zajok (pl. diffrakciók) hatását a fázisderiváltak mérési hibáira. Az elérhető pontosság határa a csoportkésleltetés-diszperzió esetén $0,1 \text{ fs}^2$ -et, míg a harmadrendű diszperzió esetén pedig 3 fs^3 -öt kaptam.

2.a Az *SSRI*-módszer alkalmazásával megmértem a levegő *SGD*-, *SGDD*- és *STOD*-értékeit a nyomás függvényében $0,1 \text{ mbar}$ és 1 bar között. Számolásokat végeztem arra vonatkozóan, hogy mekkora nyomásértékre érdemes a nagyobb lézerrendszerek nyalábvezető vákuumrendszereit optimalizálni ahhoz, hogy az impulzusidő kiszélesedése 2% illetve 20% alatt maradjon [T2].

2.b Elvégeztem néhány gázkeverék fajlagos fázisdiszperzióra vonatkozó mérését a nyomás függvényében $0,1 \text{ mbar}$ és 1 bar között *SSRI* segítségével [T3]. Hélium, neon és xenon nitrogénnel képzett különböző koncentrációjú keverékeit vizsgáltam. Eredményeim kiváló egyezést mutattak a Lorentz–Lorenz-modellből számolt értékekkel.

2.c Új együtthatókat állapítottam meg hélium, neon, argon, kripton, xenon valamint nitrogén gázok Sellmeier-egyenleteihez nemrégiben mért fázisdiszperziós adatok és független szerzők által korábban publikált törésmutatóértékek alapján [T3].

3. Megmértem az argon, a levegő, a neon, a nitrogén és a xenon nemlineáris törésmutatóját a nyomás függvényében $0,05 \text{ mbar}$ és 1 bar között, *CPA*-rendszerrel keltett nagyintenzitású impulzusok *SSRI*-módszerrel létrehozott interferenciájából. [T4]. Eredményeim az irodalom alapján várt értékekkel összhangban vannak.

4. Két, egymástól független, *SSRI*-re alapuló kísérlettel igazoltam, hogy az *XPW*-keltés során létrejött impulzusok *CEP*-értéke megmaradó mennyiség [T5]. Az első kísérletben az

interferenciamintázat láthatóságának expozíciós időtől való függetlenségével bizonyítottam állításomat. A második kísérletben egy ék mozgásával ismert módon hangoltam az interferométer mérőkarjában haladó *XPW*-impulzusok *CEP*-értékét. Az *XPW*-folyamat során előállított impulzusok *CEP*-jének értékét a keltőimpulzusok *CEP*-je és az ékek pozíciója egyértelműen meghatározta.

5. *SSRI* segítségével elvégeztem egy *AOPDF* eszköz anyagi és szögdiszperziójának teljes karakterizálását [T6]. A különböző nagyságrendű *GDD* és *TOD* a készüléken beállított és általam mért értékei mérési hibán belül azonos értéket mutattak. A szögdiszperzió vizsgálatát is elvégeztem két különböző eljárás alkalmazásával mind vízszintes, mind horizontális irányban. Mindkét módszerrel kimutattam, hogy a szögdiszperzió függ a beállításoktól és a kristály üzemi hőmérsékletétől, de mértéke azonban az *AOPDF*-et alkalmazó kísérletek többségében elhanyagolható.

V. Publikációk

A tézispontokhoz kapcsolódó, referált folyóiratokban megjelent közlemények:

[T1] Á. Börzsönyi, A.P. Kovács, M. Görbe, K. Osvay, “*Advances and limitations of phase dispersion measurement by spectrally and spatially resolved interferometry*,” *Optics Communications* **281** (2008) 3051-3061.

[T2] K. Osvay, Á. Börzsönyi, A.P. Kovács, M. Görbe, G. Kurdi, M.P. Kalashnikov, “*Dispersion of femtosecond laser pulses in beam pipelines from ambient pressure down to 0.1 mbar*,” *Applied Physics B* **87** (2007) 457-461.

[T3] Á. Börzsönyi, Z. Heiner, M.P. Kalashnikov, A.P. Kovács, K. Osvay, “*Dispersion measurement of inert gases and gas mixtures at 800 nm*,” *Applied Optics* **47** (2008) 4856-4863.

[T4] Á. Börzsönyi, Z. Heiner, A.P. Kovács, M.P. Kalashnikov, K. Osvay, “*Measurement of pressure dependent nonlinear refractive index of inert gases*,” *Optics Express* **18** (2010) 25847-25854.

[T5] K. Osvay, L. Canova, C. Durfee, A. P. Kovács, Á. Börzsönyi, O. Albert, R. Lopez Martens, “*Preservation of the carrier envelope phase during cross-polarized wave generation*,” *Optics Express* **17** (2009) 22358-22365.

[T6] K. Osvay, M. Mero, Á. Börzsönyi, A.P. Kovács, M.P. Kalashnikov, “*Spectral phase shift and residual angular dispersion of an acousto-optic programmable dispersive filter*,” *Applied Physics B* (2012) DOI 10.1007/s00340-011-4867-7, nyomtatásban.

További, referált folyóiratban megjelent közlemény:

- [1] P. Jójárt, Á. Börzsönyi, B. Borchers, G. Steinmeyer, K. Osvay, "Agile linear interferometric method for carrier-envelope phase drift," *Optics Letters* **37** (2012) 836-838.

Szabadalmi bejelentés:

- [2] Á. Börzsönyi, L. Mangin-Thro, K. Osvay, "Eljárás és berendezés fényaláb szögdiszperziójának mérésére," Magyar Szabadalmi Bejelentés, P1100626 (2011.11.14.).

Fontosabb konferenciaanyagok:

- [3] Á. Börzsönyi, K. Osvay, A.P. Kovács, M. Görbe, R. Balogh, M.P. Kalashnikov, "Measurement of pressure dependent dispersion of femtosecond pulses in air down to 0.01 mbar," Ultrafast Phenomena 2006, Pacific Grove, California, USA, azonosító: MH21.
- [4] Á. Börzsönyi, K. Osvay, A.P. Kovács, Zs. Heiner, M.P. Kalashnikov, "Measurement of pressure dependent dispersion of inert gases," ECAMP 2007, azonosító: Th2-27.
- [5] Á. Börzsönyi, K. Osvay, A.P. Kovács, Zs. Heiner, M.P. Kalashnikov, "Pressure dependent dispersion of inert gases at 800 nm," CLEO Europe 2007, azonosító: CF-15-MON.
- [6] K. Osvay, Á. Börzsönyi, Z. Heiner, A.P. Kovács, M. Kalashnikov, "Pressure dependent nonlinear refractive index of inert gases," XXX ECLIM, 2008, Darmstadt, Németország, WE-0401 (szóbeli előadás).
- [7] K. Osvay, Á. Börzsönyi, Z. Heiner, A.P. Kovács, M. Kalashnikov, "Measurement of Pressure Dependent Nonlinear Refractive Index of Inert Gases," CLEO 2009, Baltimore, USA, azonosító: CMU7 (szóbeli előadás).
- [8] K. Osvay, L. Canova, C. Durfee, A.P. Kovács, Á. Börzsönyi, O. Albert, R. Lopez Martens, "Preservation of the carrier-envelope phase in generation of cross polarized wave," CLEO 2009, Baltimore, USA, azonosító: JTuD39.
- [9] K. Osvay, L. Canova, C. Durfee, A.P. Kovács, Á. Börzsönyi, O. Albert, R. Lopez Martens, "Preservation of CEP upon Generation of XPW Pulses," CLEO Europe 2009, Munich, Németország, azonosító: CG1.5 MON (szóbeli előadás).
- [10] Á. Börzsönyi, A.P. Kovács, M. P. Kalashnikov, M. Merő, K. Osvay, "Measurement of the spectral phase shift and the residual angular dispersion of an AOPDF," First International Conference Light at Extreme Intensities LEI' 09, Brassó, Románia, AIP Conference Proceedings 1228 (2010) 138.

- [11] K. Osvay, Á. Börzsönyi, A.P. Kovács, M. P. Kalashnikov, M. Merő, “*Spectral phase shift and residual angular dispersion of an acousto-optic programmable dispersive filter*,” Ultrafast Optics 2009 (UFO VII), Arcachon, Franciaország.
- [12] Á. Börzsönyi, Z. Heiner, M.P. Kalashnikov, A.P. Kovács, K. Osvay, “*Interferometric measurement of nonlinear refractive index of inert gases at various pressures*,” Nonlinear Photonics 2010, Karlsruhe, Németország, azonosító: 10-C-868-NP.
- [13] Á. Börzsönyi, M. Merő, A. P. Kovács, M.P. Kalashnikov, K. Osvay, “*Spectral phase shift and residual angular dispersion of an acousto-optic programmable dispersive filter*,” XXXI ECLIM 2010, Budapest, Magyarország, azonosító: P21.
- [14] Á. Börzsönyi, M. Görbe, P. Jójárt, M. Kovács, K. Osvay, “*Independent control of arbitrary high order dispersion of high intensity laser pulses*,” ICUIL 2010, Watkins Glen, USA.
- [15] Á. Börzsönyi, P. Jójárt, M. Kovács, M. Görbe, K. Osvay “*Independent control of arbitrary dispersion order of high intensity laser pulses*,” High-Intensity Lasers and High-Field Phenomena (HILAS 2011), Isztambul, Törökország, azonosító: HWC9.
- [16] P. Jójárt, Á. Börzsönyi, S. Koke, M. Görbe, K. Osvay, “*A simple linear optical measurement of carrier envelope phase shift*,” High-Intensity Lasers and High-Field Phenomena (HILAS 2011), Isztambul, Törökország, azonosító: HThD5 (szóbeli előadás).
- [17] P. Jójárt, Á. Börzsönyi, S. Koke, M. Görbe, K. Osvay, “*A simple linear technique for measurement the carrier envelope offset phase of ultrashort pulses*,” CLEO 2011, Baltimore, USA, azonosító: CWI6 (szóbeli előadás).
- [18] P. Jójárt, Á. Börzsönyi, B. Borchers, G. Steinmeyer, K. Osvay, “*General linear method for carrier-envelope offset phase measurements*,” Ultrafast Optics 2011, Monterey, CA, USA, azonosító: Mo12 (szóbeli előadás).
- [19] L. Nagy, Á. Börzsönyi, K. Osvay, K. Nagy, Gy. Varo, P. Maroti, M. Terazima, “*Conformation changes after primary charge separation in photosynthetic reaction centers*,” EBSA European Biophysics Congress, Budapest, Mo., azonosító: P-529.
- [20] M. Kovács, Á. Börzsönyi, P. Jójárt, K. Osvay, “*Independent control of arbitrary dispersion order of high power ultrashort pulses*,” Light at Extreme Intensities 2011, Szeged, Magyarország.
- [21] L. Mangin-Thro, Á. Börzsönyi, K. Osvay, “*Real time two-dimensional measurement of angular dispersion of broadband laser pulses*,” Light at Extreme Intensities 2011, Szeged, Magyarország.