

Ultrarövid lézerimpulzusok fázisának mérése és szabályozása

PhD értekezés tézisei

Görbe Mihály

Témavezetők:

Dr. Osvay Károly egyetemi docens

Dr. Kovács Attila egyetemi adjunktus

Szegedi Tudományegyetem

Természettudományi és Informatikai Kar

Fizika Doktori Iskola

Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

2008

1. Tudományos előzmények, célkitűzések

Az ultrarövid (azaz időtartamban 10 fs nagyságrendű) lézerimpulzusok megjelenésével két alapvető tudományterületen is új távlatok nyíltak. A *gyors folyamatok kutatásában* általuk sikerült áttörni azt a (néhányszor tíz pikoszekundumos) korlátot, amelyet az elektronikus eszközök feloldóképességének elvi határa szabott meg. A *fény-anyag kölcsönhatás* kutatása terén az addig soha nem tapasztalt intenzitások (10^{10} W/cm²) a gyakorlatban is tanulmányozhatóvá tették a korábban már megjósolt nemlineáris effektusokat. Új rész-diszciplínák és alkalmazások egész sora jött létre.

A 10 fs illetve rövidebb impulzusok legújabb alkalmazásai által támasztott igények kielégítése nem mindennapi nehézségű feladat. Az ultrarövid impulzusok erősítésének, mely például a távoli ultraibolya, illetve a lágy röntgenimpulzusok keltéséhez szükséges, egyik jól bevált technikája ma a *fázismodulált-impulzus erősítés*. Ezek az erősítőrendszerek a *diszperzió* jelenségén alapulnak, az impulzusokat nagy negatív és pozitív *csoportkésleltetés-diszperzióval* (CsKD) rendelkező optikai elrendezéseken vezetik át, mely diszperzióknak nagy pontossággal kompenzálniuk kell egymást a jó impulzusminőség eléréséhez.

A fázismodulált lézerrendszerek építésekor, fejlesztésekor nehézséget okoz, hogy *nem létezik olyan mérési módszer, amely egymagában alkalmas lenne a diszperzió-kompenzálás beállítása során a maradék diszperzió több nagyságrenden keresztüli figyelemmel kísérésére*. Jelenleg a beállítás kezdetén, 10–500 ps-os impulzushosszak között sávkamerák használhatók a becslésre, a finomhangoláshoz, 100 fs alatt pedig pl. autokorrelátorok, melyek azonban egymástól gyökeresen eltérő eszközök.

Célul tűzöm ki új beállítási eljárás kidolgozását a fázismodulált-impulzus erősítőrendszerekben található nyújtó-összenyomó egység eredő diszperziója eliminálásához, mely közös, valós idejű diszperziómérést lehetővé tevő felépítést használ a maradék diszperzióknak mind a kezdeti durva, mind a végső finom beállításához.

A *spektrálisan és térben bontott interferometria* (STBI) egy kétsugaras interferométer és egy leképező spektrográf kombinációján alapul. Sikerrel használták már optikai elemek, anyagok (üvegek, sőt gázok) diszperziójának mérésére. Az STBI egyik változata az *állandó fázispont módszere* (ÁFP-módszer), mely különösen a nagy diszperzióval rendelkező tárgyak pl. fényvezető szálak vizsgálatánál bizonyult hasznosnak. Az *ÁFP-módszer* az STBI csíkrendszer középpontja spektrális helyének leolvasásán alapul, a *csíkok kétdimenziós formájába foglalt információt azonban kihasználatlanul hagyja*.

Megvizsgálom, hogy az állandó fázispont módszerével előállított interferencia-csíkok alakja felhasználható-e a tárgy diszperziójának gyors becslésére. Az eljárást felhasználok az impulzusnyújtó-összenyomó egységek előző célkitűzésben megfogalmazott beállítási eljárásának gyors, valós idejű nyomon követésére is.

Az ultrarövid lézerympulzusok legújabb alkalmazásainak némelyike alig néhány optikai ciklus hosszúságú impulzusokra épül. Ilyenek a küszöb feletti ionizációs kísérletek, vagy az optikai frekvencia-metrológia. Ezen kísérletek stabil végrehajtásához alapvetően fontos, hogy az impulzus kezdőfázisa, vagy más oldalról megközelítve a vivőhullám elhelyezkedése az impulzusburkolón belül, az ún. *hordozó-burkoló fázis* (HBF) mindvégig ugyanazt az értéket vegye fel.

A legalább egy oktáv sáv szélességű lézerympulzusok HBF-ének impulzussorozaton belüli változását, *HBF-csúszását* napjainkban többnyire az *f-to-2f*-interferometriával mérik. Ha nem áll rendelkezésre oktávnyi sáv szélesség, akkor egy további nemlineáris lépésben ki kell szélesíteni a bemenő spektrumot. Mindezek *komoly sáv szélességbeli és intenzitásbeli követelményeket jelentenek*, amelyek következtében a *lézerek egy széles körénél az f-to-2f módszerrel nem lehet HBF-információhoz jutni*.

Spektrálisan és térben bontott interferometrián alapuló mérési elrendezést és eljárást dolgozok ki a hordozó-burkoló fáziscsúszás mérésére, mely nagymértékben független az impulzusok sáv szélességétől és csúcsteljesítményétől. Numerikus modellezéssel megvizsgálom az új eljárás

karakterisztikáit a számításba jövő összes kísérleti körülmény változtatása mellett, majd kísérleteket végzek a kidolgozott mérőmódszer használhatóságának igazolására.

A mérésen túl kívánatos, hogy a HBF-csúszás hangolásához olyan eszköz álljon rendelkezésünkre, melynek működtetése lehetőség szerint „mellékhatásoktól” mentes, azaz nem változtatja meg az impulzusok csoportképletetését és csoportképletetés-diszperzióját. *A jelenleg e célra elterjedt ömlesztett kvarc ékpár, melynek egyik tagja a nyalábra merőlegesen mozgatható, használata közben a rajta áthaladó impulzusoknak mind a csoportképletetését, mind a CsKD-jét változtatja.* Ezáltal rezonátoron belüli használatkor mellékhatásként elhangolja a lézer ismétlési frekvenciáját, ami további diagnosztikai és kompenzációs eszközök használatát teheti szükségessé.

Új kísérleti elrendezést tervezek és valósítok meg a hordozó–burkoló fázis hangolására, melynek működtetése mellékhatásként nem befolyásolja a rajta áthaladó impulzusok csoportképletetését, ill. csoportképletetés-diszperzióját.

Az optikai alkalmazások — közülük is különösen a nemlineáris jelenségeket kihasználók, a pontos kezdőfázis beállítást igénylők, valamint az erősítők előerősítő fokozatai — nagyon szigorú követelményeket támasztanak a fénynyalábok iránytartására, melyeket gyakran csak aktív stabilizálással lehet kielégíteni. Napjainkban a lézernyalábok irányának aktív stabilizálását legtöbbször a *távoli zóna kvadránsdetektorral* automatizált megfigyelése alapján végzik.

A kvadránsdetektor fő hátránya a merevség: ha a lézerrendszer egyes elemeinek az adott kísérlethez való adaptálása következtében az általa megfigyelt nyaláb iránya kissé módosul, akkor az erre való átálláskor vagy magát a kvadráns detektort, vagy a ráeső mérőfényt kell úgy elmozgatni, hogy az érzékelő közepe a fókuszált fényfolt új pozíciójával essen egybe.

Olyan aktív nyalábirány-stabilizáló rendszert dolgozok ki és valósítok meg a TeWaTi erősített lézerrendszer jel- és pumpanyalábjai irányának stabilan tartására, mely flexibilis, a rendszer fejlesztése közben előforduló nyalábirány-módosításokhoz átépítés nélkül igazítható, és kellő pontosságú

ahhoz, hogy az erősített impulzusok hosszú távú energiastabilitása 3 %-on belül legyen, valamint az erősítés során a hordozó-burkoló fázist a nyalábok iránycsúszásai ne befolyásolják.

2. Vizsgálati módszerek

A TeWaTi lézerrendszer nyújtójának és nyújtó–összenyomó egységének jellemzésére a házilag megépített titán-zafír oszcillátor erősítetlen nyalábját használtam. Központi hullámhossza 800 nm, ismétlési frekvenciája 71 MHz. Az impulzusok időbeli hossza 15 fs volt. Mind a nyújtó, mind a kompresszor két-két 1200 mm^{-1} sűrűségű rácsból van felépítve. A nyújtó még egy 500 mm fókusztávolságú gömbtükört is tartalmaz. A nyújtó diszperziójának ÁFP-módszerrel való mérésekor egy módosított Jobin–Yvon H-20 monokromátort használtam egy Electrim EDC–2000N CCD kamerával (felbontás: $652 \text{ pixel} \times 494 \text{ pixel}$) a képsíkjában. Ennek a felépítésnek a spektrális feloldóképessége 0.1 nm volt. A teljes rendszer CsKD-jének beállításához egy házilag épített spektrográfot ($f_{koll}=50 \text{ mm}$, $f_{obj}=100 \text{ mm}$, rács: 650 mm^{-1}) használtam, melynek spektrális felbontása 1 nm volt.

A HBF-csúszás mérésére megalkotott új lineáris eljárás elméleti vizsgálatára MathCAD-ben megírt numerikus kódot alkalmaztam. A kísérleti demonstrálás során fényforrásom egy FemtoPower Compact Pro oszcillátor volt, melynek központi hullámhossza 803 nm, ismétlési frekvenciája 87.4 MHz. Az impulzushossz 10 fs volt. A HBF-csúszásnak az új eljárástól független mérésére egy házilag épített f -to- $2f$ interferométert és egy Rohde & Schwarz FSP7 spektrum-analizátort használtam, ami a *hordozó-burkoló offszetfrekvencia* (HBO frekvencia) 0.2 MHz pontosságú mérését tette lehetővé. A HBF-csúszást a HBO- és az ismétlési frekvenciából számítottam ki. Ez utóbbit egy gyors fotodióda és egy Agilent 53131A univerzális frekvenciaszámláló segítségével, 1 Hz-es pontossággal mértem.

Az izokronikus HBF-hangoló ékpár tervezésekor a Schott optikai üvegek katalógusában kerestem meg azt az üveg-kombinációt, mely egyszerre tesz lehetővé izokronikus és CsKD-re semleges HBF hangolást. Az ékek törőszögeinek meghatározására egy MathCAD-ben írt sugárkövető programot használtam, mely a

nyaláb közel Brewster-szögű beesését és a levegő diszperzióját is számításba vette. A demonstráláshoz újra a HBO- és az ismétlési frekvenciát mértem az előző kísérlethez hasonlóan.

A TeWaTi lézerrendszer jel- és pumpanyalábjának iránystabilizálásához két Electrim EDC–2000N CCD kamerát használtam a fókuszált távoli zóna fényfoltok megfigyelésére. A fókuszáláshoz rendre 300 mm-es és 500 mm-es fókusz távolságú lencsákat alkalmazok. A nyalábirány korrigálását egy-egy Newport Picomotor aktuátorokkal ellátott tükörtartó végzi közvetlenül a lézerek kimenete után. Az iránystabilizálás algoritmusát a TeWaTi vezérlőprogramjába integráltam, mely LabVIEW nyelven készült. A pumpanyalábok energiáját félhullámlemezek és polarizációs nyalábosztókockák kombinációjával lehet változtatni. A pumpaenergia nagy pontosságú szabályozása céljából a félhullámlemezeket Owis DRT 40 elforgatókkal mozgatom 0.2° pontossággal. Az elforgatókat vezérlő programrészt szintén a lézerrendszerbe építettem.

3. Új tudományos eredmények

1. Új eljárást adtam fázismodulált-impulzus erősítőrendszerek diszperziójának beállítására [1,10]: Részt vettem az állandó fázispont módszer kétdimenziós kiterjesztésének kidolgozásában. Közös optikai elrendezést használó, spektrálisan bontott interferometriai eljárásokat javasoltam a diszperzió kvantitatív mérésére, valamint az impulzusnyújtó–összenyomó rendszer csoportképletelés-diszperziója durva és finom beállításának kvalitatív, valós idejű ellenőrzésére, mely feladatokra korábban alapvetően eltérő mérőmódszerek szolgáltak. Végül a kidolgozott beállítási és mérési eljárást kísérletileg alkalmaztam a TeWaTi lézerrendszeren.

2. Új optikai elrendezést és eljárást adtam meg a hordozó-burkoló fázis csúszásának mérésére [2–4,7,8,11–17]: Numerikus modellt alkottam egy kétsugaras és egy sokugaras interferométer kombinációjából származó spektrálisan és térben bontott interferencia-csíkrendszer láthatósága és a hordozó-burkoló fáziscsúszás közötti összefüggésre. A modell segítségével megvizsgáltam a sokugaras

interferométer jóságának, a detektor véges integrációs idejének, a soksugaras interferométer hossza rezonanciától való elhangolásának és fluktuációjának, a levegő diszperziójának és más kísérleti körülmények hatását a láthatóság-fáziscsúszás függvényre.

3. Kísérletileg megvalósítottam az előző pontban kidolgozott mérési eljárást egy lézeroszcillátor impulzussorozatára. A modellszámításokkal kiváló egyezésben kimutattam, hogy a spektrálisan bontott interferenciacsík-rendszer láthatósága egyértelműen függ a HBF-csúszástól. Ez az eljárás a világon az első és mostanáig az egyetlen olyan, a HBF-csúszás mérésére szolgáló technika, mely teljes egészében lineáris optikán alapul. Ennek következtében alkalmazhatósága nagymértékben független az impulzusok sáv szélességétől és intenzitásától, így akár pikoszekundumos lézerek, vagy a telekommunikációban használatos nagyon kis csúcsteljesítménnyel rendelkező impulzuszérezetek jellemzésére is alkalmas.

4. Új kísérleti elrendezést és eljárást fejlesztettem ki a hordozó-burkoló offszetfrekvencia izokronikus hangolására, mely működése során jó közelítéssel változatlanul hagyja a rajta áthaladó lézerimpulzusok csoportképletetését és csoportképletetés-diszperzióját [5,9]. Az eljárást kísérletileg is demonstráltam: megépítettem a két különböző üvegből készült ékpáron alapuló eszközt. Az ékpárt egy eredetileg azonos anyagú ékpárral stabilizált femtoszekundumos oszcillátorba építettem be. A kimeneti sáv szélesség és a teljesítmény elhanyagolható változása mellett közel két nagyságrenddel sikerült csökkentenem a HBO frekvencia hangolásának az ismétlési frekvenciára gyakorolt mellékhatását a gyárilag beépített ömlesztett kvarc HBO-hangoló ékekhez képest.

5. Képfeldolgozáson alapuló aktív nyalábirány-stabilizáló rendszert fejlesztettem ki és építettem meg, mely a TeWaTi lézerrendszerben mind az erősítetlen jel-nyaláb mind az erősítőt pumpáló lézernyaláb irányát képes stabilizálni [18]. Ezáltal az erősített impulzusok hordozó-burkoló fázisát függetleníteni lehet a jel és a pumpa

nyalábok iránycsúszásaitól, másrészt így a pumpáló lézert önmagában is nagy pontosságú anyagmegmunkálásra vehettük igénybe [6]. A fénynyalábok irányának stabilan tartásával, valamint a vezérlés további tökéletesítésével a lézerrendszer fejlesztése könnyebbé, üzemeltetése egyszerűbbé és jobban betaníthatóvá vált.

4. Az értekezéssel kapcsolatos közlemények

Referált folyóiratokban

- [1] A. P. Kovács, K. Osvay, G. Kurdi, M. Görbe, J. Klebniczki, Zs. Bor, *Dispersion control of a pulse stretcher-compressor system with two-dimensional spectral interferometry*, Applied Physics **B 80** (2005) 165–170
- [2] K. Osvay, M. Görbe, Ch. Grebing, G. Steinmeyer, *A bandwidth-independent linear method for detection of the carrier envelope offset phase*, Optics Letters **32** (2007) 3095–3097
- [3] K. Osvay, M. Görbe, Ch. Grebing, G. Steinmeyer, *A bandwidth-independent linear method for detection of the carrier envelope offset phase*, Virtual Journal of Ultrafast Science **6** (2007)
- [4] M. Görbe, Ch. Grebing, G. Steinmeier, K. Osvay, *A linear optical method for measuring the carrier-envelope phase drift*, Applied Physics **B**, bírálólat alatt
- [5] M. Görbe, K. Osvay, Ch. Grebing, G. Steinmeyer, *An isochronic carrier-envelope phase-shift compensator*, Optics Letters **33** (2008), megjelenés alatt
- [6] Á. Sipos, H. Tóháti, A. Szalai, A. Mathesz, M. Görbe, T. Szabó, M. Szekeres, B. Hopp, M. Csete, I. Dékány, *Plasmonic structure generation by laser illumination of silica colloid spheres deposited onto prepatterned polymer-bimetal films*, Applied Surface Science (2008), elfogadva

Szabadalmi bejelentések

- [7] K. Osvay, M. Görbe, *Bandwidth-independent method and setup for detecting and stabilizing carrier-envelope phase drift of laser pulses by means of spectrally and spatially resolved interferometry*, PCT szabadalmi bejelentés, WO 2008/029187 A2, 09.05.2007
- [8] K. Osvay, M. Görbe, *Bandwidth-independent method and setup for measuring and stabilizing the carrier-envelope phase drift of laser pulses*, európai szabadalmi bejelentés, 01136EP-1998E, 13.03.2008

- [9] M. Görbe, K. Osvay, G. Steinmeyer,
Optical assembly for tuning the carrier-envelope phase of laser pulses,
európai szabadalmi bejelentés, 01145EP-1998E, 16.10.2008

Konferenciákon

- [10] A. P. Kovács, K. Osvay, G. Kurdi, Zs. Bor, M. Görbe, J. Klebniczki,
Measurement of the group-delay dispersion of a pulse stretcher-compressor system with two dimensional spectral interferometry,
CLEO/Europe-EQEC, 2005, München, paper CF-13-TUE
- [11] M. Görbe, K. Osvay,
A bandwidth-independent linear method for detection of carrier-envelope phase drift,
International School of Quantum Electronics, 2006, Erice
- [12] K. Osvay, M. Görbe,
A linear method for detection of carrier envelope phase fluctuations,
ICO Topical Meeting on Optoinformatics/Information Photonics, 2006, Szentpétervár,
paper FL-O-171
- [13] M. Görbe, K. Osvay,
A bandwidth independent linear method for detection of carrier envelope phase drift,
IAMPI, 2006, Szeged, paper MO14
- [14] K. Osvay, M. Görbe,
A bandwidth independent linear method for detection of carrier envelope phase drift,
CLEO/Europe-EQEC, 2007, München, paper CF-11-MON
- [15] K. Osvay, M. Görbe, Ch. Grebing, G. Steinmeyer,
A linear optical method for measuring the carrier-envelope offset phase,
CLEO/QELS, 2008, San José, paper CThU6
- [16] Ch. Grebing, K. Osvay, M. Görbe, G. Steinmeyer,
Ein lineares optisches Verfahren zur Messung der Carrier-Envelope Phase modengekoppelter Laser,
Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, 2008, Darmstadt
- [17] M. Görbe, K. Osvay, Ch. Grebing, G. Steinmeyer,
Lézerimpulzusok hordozó-burkoló fázisának lineáris mérése,
Fizikus Vándorgyűlés 2007, Eger
- [18] Görbe M., Jójárt P., Kopasz K., Osvay K.,
Impulzusüzemű és frekvenciakétszerezett Nd:YAG lézer vezérlőprogramjának fejlesztése,
Felsőfokú alapképzésben matematikát, fizikát és informatikát oktatók XXXII. Konferenciája 2008, Kecskemét

5. Egyéb közlemények

Referált folyóiratokban

- [19] 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 to 0.1 mbar,
Appl. Phys. B **87** (2007) 457–461

- [20] Á. Börzsönyi, A. P. Kovács, M. Görbe, K. Osvay
Advances and limitations of phase dispersion measurement by spectrally and spatially resolved interferometry,
Opt. Commun. **281** (2008) 3051–3061

Konferenciákon

- [21] K. Varjú, M. Görbe, A. P. Kovács, G. Kurdi, K. Osvay,
Increased precision angular dispersion measurement for ultrashort laser pulses,
Ultrafast Processes in Spectroscopy 2001, Firenze, paper P34
- [22] K. Osvay, A. P. Kovács, Zs. Heiner, M. Csatári, Zs. Bor, G. Kurdi, M. Görbe, J. Klebniczki, I. E. Ferincz,
A table-top high contrast TW laser system,
CLEO/Europe-EQEC, 2005, München, paper CG-13-TUE