

PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

# **Lézerimpulzusok vivőhullám-burkoló- fáziscsúszásának mérése lineáris optikai módszerrel**

Szerző:  
**JÓJÁRT Péter**

Témavezető:  
**DR. OSVAY Károly**



Fizika Doktori Iskola  
Szegedi Tudományegyetem  
Természettudományi és Informatikai Kar  
Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék  
Szeged, 2014



## I. Bevezetés

A látható és közeli infravörös tartományban előállítható legrövidebb lézerpulzusok időbeli hossza mára elérte a fényhullám egy optikai periódusnyi időtartamát. Egy ilyen, úgynevezett egy ciklusú, mindössze néhány femtoszekundumos fényimpulzussal végzett kísérlet eredménye erősen függ az elektromos térerősség időbeli lefutásától, melynek kvantitatív jellemzésére a vivőburkoló fázis (CEP) fogalmát vezették be. Mivel a vivőhullám a fázissebességgel, a burkológörbe a csoportsebességgel terjed, egy lézeroszcillátor által kibocsátott impulzussorozat vivő-burkoló fázisa időben változik, „csúszik”.

A minél rövidebb időtartamú, és egyre nagyobb pontossággal beállítható paraméterekkel (pl. CEP, spektrum, impulzusalak, nyaláb-profil, ...stb.) rendelkező fényimpulzusok előállítása nem pusztán önmagáért való alapkutatási kihívás, hanem egyúttal számos tudományterületen kivételes kutatóeszközt eredményezett. Ezek közül is kiemelendő az attoszekundumos fizika és a precíziós lézer-spektroszkópia, melyek különösen érzékenyek a CEP változására.

Az attoszekundumos impulzusok keltésekor az ultrarövid lézerpulzus nagy intenzitása által biztosított többfotonos abszorpció leszakítja az elektront az atomtörzsről, majd az időközben megváltozó előjelű elektromos tér felgyorsítja azt és visszacsapja az atomtörzsbe. A rekombináció során rövid impulzussorozatokról álló ultraibolya és röntgensugárzás keletkezik. Ha a keltő fényimpulzus csak egyetlen periódusból áll, a vivő-burkoló fázis dönti el, hogy egyes attoszekundumos impulzust kapunk, vagy sem. Ha a keltő impulzus több ciklusból áll, akkor alapesetben nem egyes attoszekundumos impulzust kapunk, hanem egy impulzussorozatot. A közelmúltban több eljárást fejlesztettek ki, melyek segítségével több ciklusú lézerpulzussal is lehet egyes attoszekundumos impulzusokat előállítani. Természetesen, az így előállított egyes attoszekundumos impulzusok is érzékenyek a keltő fényimpulzus CEP-jére.

Precíziós lézer-spektroszkópai méréseknél minél keskenyebb sávzélességű, nagy pontossággal ismert hullámhosszú fényforrások szükségesek. Ehhez a hagyományos módszer szerint atomórához szinkronizálnak különböző mikrohullámú eszközöket és infravörös fényforrásokat, bonyolult konverziós láncot alkotva.

Ugyanakkor a másik fejlesztési irányban, az egyre rövidebb impulzusok keltéséhez egyre nagyobb spektrális sávzélességű lézereket készítettek, illetve megoldásokat dolgoztak ki a spektrum további szélesítésére. Paradox módon ezek a megoldások tették lehetővé a keskenysávú precíziós lézer-spektroszkópiában a tudományos áttörést.

Az ultrarövid impulzusokat előállító lézerek ugyanis oszcillátorok, szabályosan ismétlődő impulzussorozatot előállító berendezések, vagyis a Fourier-transzformáció értelmében a spektrográfokon megfigyelt széles spektrum milliónyi, nagyon keskeny sávzélességű, szabályosan elhelyezkedő spektrumvonalból (lézer- módus) áll. A vonalak távolsága az ismétlési frekvencia. A „frekvenciafésű” (vivő-burkoló fáziscsúszástól függő) abszolút helyzetét megmérve rendelkezésre áll milliónyi pontosan ismert optikai frekvencia. Sőt, a lézeroszcillátor paraméterein változtatva - például egy egyszerű kvarc ék betolásával – elérhető, hogy a frekvenciafésű hangolható legyen. A frekvenciafésű nemlineáris optikai folyamatokon keresztül bármilyen hullámhosszra konvertálható a közeli infravöröstől az XUV-ig, illetve elméletben a gammasugár-frekvenciafésű sem lehetetlen.

A vivő-burkoló fáziscsúszás mérésére elterjedt módszerek szigorú követelményeket támasztanak a mérendő lézerimpulzussal szemben, mint a legalább oktávnyi sávzélesség, illetve a nemlineáris optikai folyamatokhoz elegendő intenzitás. Ezek a követelmények azt vonják maguk után, hogy a frekvenciafésű-technológián alapuló precíziós spektroszkópiai méréseket többnyire egy-két ciklusú titán-zafir alapú lézerekkel lehetett megvalósítani. Egy titán-zafir oszcillátor elég komplex, a legapróbb hőmérséklet-változásra is érzékeny, és karbantartás-igényes berendezés. Az esetleges hullámhossz-konverziós lépések ezt a komplexitást tovább növelik.

Láthatjuk, mind az attoszekundumos fizika, mind pedig a precíziós lézer spektroszkópia területén szükség van egy olyan mérőberendezésre, mely képes az akár több tucat ciklusú, akár több pikoszekundumos impulzusok CEP változásának mérésére is.

## II. Célkitűzések

A dolgozat célja egy olyan vivő-burkoló fáziscsúszást mérő módszer kidolgozása, amely mérési elve lehetőség szerint sávzsélességtől független, azaz amivel sok optikai ciklusú impulzusok vivő-burkoló fáziscsúszását is megbízhatóan mérhetjük. Ezen felül ha sikerül biztosítanom, hogy csak lineáris optikai elemeket és folyamatokat alkalmazzak, akkor a módszer jelentősen kevesebb bemenő teljesítményt igényelhetne.

Korábban Osvay Károly és társai alkottak egy lineáris optikai módszert, amelynek részletes modellezése és minőségi továbbfejlesztése képezte jelen doktori munkám tárgyát.

Részletesebben, a munkám alapjául az akkor frissen megalkotott első lineáris mérési eljárást részletes elemzése szolgált. Ez a módszer egy spektrálisan és térben bontott Mach-Zehnder interferométer tárgykarjába tett rezonáns körből állt, és a fáziscsúszás értékére az interferogram láthatóságából lehetett következtetni. Jóllehet kísérletileg bizonyították, hogy ez a módszer működik, ugyanakkor a mérés önmaga nehéz volt, a kiértékelés hosszadalmas, és gyakorta kellett kalibrálni.

1. Célul tűztem ki egy, tisztán lineáris optikai elven alapuló, relatív fáziscsúszás-mérő módszer kifejlesztését. További célom a kísérlet és a körülmények hatásának számítógépes modellezése, és a kísérleti elrendezés megtervezése.
2. Második célom a kísérleti elrendezés megépítése, tesztelése, mérési eredményeinek összevetése a modellezés eredményeivel. Ezen kívül, a módszer működőképességét bizonyítandó, célom összehasonlító méréseket végezni egy sztenderd módszerrel.
3. Végül, a lineáris optikai módszer sávzsélesség-függetlenségének bizonyítására célul tűztem ki, hogy fáziscsúszás-mérést végzek egy olyan lézerrendszeren, amelyen a sztenderd módszerekkel ez nem lehetséges.

### III. Alkalmazott módszerek, eszközök

1. A fejlesztés első lépéseként számítógépes szimulációt készítettem *MathCad* környezetben. Arra a következtetésre jutottam, hogy a mérési eljárás nagy mértékben egyszerűsíthető. Szimulációkat végeztem a bejövő impulzussorozat tulajdonságainak és a kísérleti környezet változásainak vizsgálatára. A modellben figyelembe vettem többek között a rezonáns kör és a lézeroszcillátor körjárási úthosszainak különbségét, a levegő törésmutatóját, az alkalmazott optikai elemek diszperzióját, és a nyalábosztók reflexióját is. Kiszámítottam a bejövő impulzussorozat ismétlési frekvencia változásának, illetve a hőmérséklet kis mértékű ( $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) lokális változásának várható hatásait is.
2. A *rezonáns körből*, egy (CE-Optics CEO-2D-800 típusú) leképező *spektrográfból*, és egy Berkeley Nucleonics BNC1105 típusú *frekvenciamérőből* álló kísérleti elrendezésben a mérésadatgyűjtést a National Instruments *Labview* programcsomagjának segítségével automatizáltam. Az elmélet első teszteléséhez az SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék TeWaTi laboratóriumának házi készítésű *Ti:S lézerét* használtam fel. (A lézer sávszélessége 60 nm, az ismétlési frekvenciája 70,5 MHz volt.) A kísérletben a rezonáns kör saját vivő-burkoló fázistolását módosítottam a bele helyezett *izokronikus ékpár* mozgatásával. A sikeres szegedi kísérletek után a berendezést a berlini Max Born Institut -ban teszteltük, ahol rendelkezésre állt mind egy 84 MHz ismétlési frekvenciájú, Femtolasers Rainbow típusú *fáziscsúszás-stabilizált lézeroszcillátor*, mind a sztenderdek tekintett *f-2f interferométer*. A kísérletek során a lézer rezonátorába helyezett *ömlesztett kvarc* ékpár egyik tagjának mozgatásával állítottam be különböző fáziscsúszás értékeket, és minden pozícióban megmértem a lineáris optikai módszer és az  $f-2f$  által mért értékek változásait.
3. A sávszélesség-függetlenség bizonyítására a Párizs melletti LAL-ban található, *2 ps transzformáció-limitált impulzushosszú Ti:S lézert* (módosított Coherent Mira) használtam. A lézer meglehetősen keskeny spektrumának felvételéhez egy *házi készítésű spektrográft* készítettem egy 1200 vonal / mm-es reflexiós rácsból, 15-szörös nagyítással. A fáziscsúszás változtatására a *kristály*

*hőmérsékletét, a pumpalézer teljesítményét, illetve a lézer rezonátorába helyezett izokronikus ékpárat* használtam.

#### IV. Új tudományos eredmények

1. Modelleztem egy, csak lineáris optikai elemeken alapuló vivőhullám-burkoló-fáziscsúszást relatív módon mérő eljárást. Egy impulzus-sorozatban az egymás utáni impulzusok egy rezonáns kör segítségével időben közel átfedésbe hozhatóak. Az így létrehozott spektrális interferogramból és az oszcillátor ismétlési frekvenciájából ki lehet számolni a vivő-burkoló fáziscsúszás kezdeti értékétől való eltérését [T1-T4].
2. Megépítettem a kísérleti elrendezést, melyhez egy aktív optikai úthossz-stabilizáló rendszert fejlesztettem ki. A 10 nm pontossággal 3,546 m hosszúságon tartott rezonáns visszacsatoló kör segítségével végrehajtott, a sztenderd f-to-2f eljárással ellenőrzött pilot kísérletben néhány ciklusú lézerimpulzusok a vivő-burkoló fáziscsúszását 149 mrad pontossággal mértem meg [T3-T8].
3. Demonstráltam, hogy a kifejlesztett lineáris optikai módszer alkalmas a lassú, termikus eredetű vivő-burkoló fáziscsúszás-változás stabilizálásának vezérlésére is. Egy szabadon működő lézeroszcillátorba épített izokronikus ékpárat egy visszacsatoló rendszeren keresztül a kifejlesztett mérési eszköz segítségével vezérelve a lassú vivő-burkoló fáziscsúszást változást  $\pm 47$  mrad-ra stabilizáltam [T3, T4, T9-T11].
4. A világon először mértem meg sok ciklusú, 2 pikoszekundum időtartamú fényimpulzusok CEP-csúszásának változásait [T3, T4, T12-T14]. A fáziscsúszás módosítására három különböző módszert használva egyértelműen kimutattam, hogy a kifejlesztett módszer valóban a vivő-burkoló hullám csúszásának változását méri hosszú impulzusok esetén is, azaz a módszer valóban független a sávzélességtől. A fáziscsúszás méréséhez kifejlesztett berendezés segítségével kimutattam, hogy egy nagy jósági tényezőjű ( $F=28000$ ), keskenysávú lézerimpulzusok passzív erősítésére szolgáló

rezonátor működése a lézerimpulzusok vivő-burkoló fázisától is függ [T15, T16].

## V. Publikációk

### *A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos publikációk:*

- [T1] Jórárt Péter, Osvay Károly: *Vivő-burkoló fázis csúszás mérése lineáris optikai módszerrel*, Fizika OTDK III. helyezett dolgozat és előadás, 2009 Április 7-9
- [T2] P. Jórárt, K. Osvay: *A simple linear optical measurement of carrier-envelope phase shift*, International School of Quantum Electronics, Erice, Italy, 10-16 July, 2009
- [T3] Jórárt Péter, Börzsönyi Ádám, Osvay Károly: *Vivőhullám-burkoló-fáziscsúszás mérése és stabilizálása lineáris optikai módszerrel*, Fizikus vándorgyűlés (2013), 20.12. poszter
- [T4] Jórárt Péter, Börzsönyi Ádám, Osvay Károly : *Lineáris optikai módszer vivő-burkoló fázis csúszásának mérésére*, Fizikai Szemle, 2014 / 7
- [T5] P. Jórárt, Á. Börzsönyi, B. Borchers, G. Steinmeyer, K. Osvay: *Agile linear interferometric method for carrier-envelope phase drift measurement*, Optics Letters, **37** (2012) 836-838
- [T6] Á. Börzsönyi, P. Jórárt, S. Koke, M. Görbe, K. Osvay: *A simple linear optical measurement of carrier envelope phase shift*, High-Intensity Lasers and High-Field Phenomena (HILAS) 16-18 February, 2011, Istanbul, Turkey, Pres. number: HTHD5
- [T7] P. Jórárt, Á. Börzsönyi, S. Koke, M. Görbe, K. Osvay: *A Simple Linear Technique for Measuring the Carrier-Envelope Offset Phase of Ultrashort Pulses*, CLEO Science and Innovations, USA, Baltimore, Maryland, 1-6 May, 2011, paper CWI6
- [T8] P. Jórárt, Á. Börzsönyi, B. Borchers, G. Steinmeyer, K. Osvay: *General Linear Method for Carrier-Envelope Offset Phase Measurements*, Ultrafast Optics, Monterey, California, September 26-30, 2011, paper Mo12
- [T9] P. Jórárt, Á. Börzsönyi, M. Merő, B. Borchers, G. Steinmeyer, K. Osvay: *An all-linear-optical technique for intracavity stabilization of CEP drift*, ISTC-GSI YOUNG SCIENTISTS SCHOOL 2011, Darmstadt, Germany, 10-15 Oct, 2011
- [T10] P. Jórárt, A. Börzsönyi, M. Merő, K. Osvay: *An all-linear-optical technique for intracavity stabilization of CEP drift*, Light at Extreme Intensities (LEI) 2011 Conference, Szeged, Hungary 14-18 Nov. 2011, paper L2.9

- [T11] P. Jójárt, A. Börzsönyi, M. Merő, K. Osvay : All-linear-optical technique for *intracavity stabilization of CEP drift* CLEO 2012 San Jose, USA 6-8 May 2012 CW1D.5
- [T12] P. Jójárt, Á. Börzsönyi, K. Osvay, R. Chiche, E. Cormier, R. Flaminio, C. Michel, L. Pinard, V. Soskov, A. Variola, F. Zomer: *An all-linear-optical technique for relative CEP-shift measurement of picosecond pulses*, Lézer Tea (2014), poszter
- [T13] P. Jójárt, Á. Börzsönyi, V. Soskov, F. Zomer, R. Chiche, E. Cormier, K. Osvay: *Carrier-envelope phase drift measurement of picosecond pulses by an all-linear-optical means*, Optics Letters **39** (2014) 5913-5916
- [T14] Á. Börzsönyi, P. Jójárt, R. Chiche, V. Soskov, F. Zomer, E. Cormier, K. Osvay: *Carrier-envelope Phase Drift Detection of Picosecond Pulses*, XVIIIth International Conference on Ultrafast Phenomena, 8 - 13 July 2012, Lausanne, Switzerland
- [T15] P. Jójárt, A. Börzsönyi, R. Chiche, V. Soskov, A. Variola, F. Zomer, E. Cormier, K. Osvay: *Carrier-envelope Phase Drift of Picosecond Frequency Combs from an Ultrahigh Finesse Fabry-Perot Cavity*, Conference on Lasers and Electro-Optics 2013. jun. 9-14, San Jose, USA
- [T16] Á. Börzsönyi, R. Chiche, E. Cormier, R. Flaminio, P. Jójárt, C. Michel, K. Osvay, L. Pinard, V. Soskov, A. Variola, F. Zomer: *External cavity enhancement of ps pulses with 28000 cavity finesse*, Appl. Optics. **52** (2013) 8376-8380

***További, referált folyóiratban megjelent közlemény:***

- [A] H. Tóháti, Á. Sipos, G. Szekeres, A. Mathesz, A. Szalai, P. Jójárt, J. Budai, Cs. Vass, A. Köházi-Kis, M. Csete, Zs. Bor, *Surface plasmon scattering on polymer-bimetal layer covered fused silica gratings generated by laser induced backside wet etching*, Applied Surface Science **255** (2009) 5130-5137

***További konferenciaanyagok:***

- [B] Jójárt Péter, Kopasz Katalin, Görbe Mihály, Osvay Károly: *Impulzusüzemű és frekvenciakétszerezett Nd:YAG lézer vezérlőprogramjának fejlesztése*, Informatika OTDK II helyezett dolgozat és előadás, 2007 Április 25-27.
- [C] H. Tóháti, Á. Sipos, G. Szekeres, A. Mathesz, A. Szalai, P. Jójárt, J. Budai, Cs. Vass, A. Köházi-Kis, M. Csete, Zs. Bor, *Surface plasmon coupling on polymer - bimetal layer covered fused silica gratings generated by laser induced backside wet etching*, EMRS 2008, Strasbourg, France, paper B/PI/56



- [D] 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) 16-18 February, 2011, Istanbul, Turkey, Pres. number: HWC9
- [E] M.Görbe, Á. Börzsönyi, P. Jójárt, M. Kovács, K. Osvay, *Independent control of arbitrary orders of dispersion at the high power end of CPA lasers* ,XXXI ECLIM 2010, Budapest, Hungary, paper: P13.
- [F] Á. Börzsönyi, M. Görbe, P. Jójárt, M. Kovács, K. Osvay: *Independent control of arbitrary high order dispersion of high intensity laser pulses*, ICUIL, 26 Sept - 01 Oct, 2010, Watkins Glen, USA
- [G] M. Kovács, Á. Börzsönyi, P. Jójárt, K. Osvay *Independent control of arbitrary dispersion order of high power ultrashort pulses*, Light at Extreme Intensities (LEI) 2011 Conference, Szeged, Hungary 14-18 Nov. 2011, paper L2.11
- [H] Á. Börzsönyi, R.S. Nagymihály, P. Jójárt, K. Osvay: *Carrier-Envelope Phase Noise of Ultrashort Pulses in a Ti:Sapphire Amplifier*, Conference on Lasers and Electro-Optics 2013. jun. 9-14, San Jose, USA
- [I] Börzsönyi Ádám, Nagymihály Roland Sándor, Jójárt Péter, Osvay Károly: *Ultrarövid fényimpulzusok Ti:S erősítőben fellépő vivő-burkoló fázis zaja* Fizikus vándorgyűlés (2013), 20.4. poszter
- [J] Á. Börzsönyi, R.S. Nagymihály, P. Jójárt, K. Osvay: *Carrier-Envelope Phase Noise Increment Due to Thermal Issues of a Ti:Sapphire-Based Amplifier*, Advanced Solid-State Lasers 2013, Oct. 27- Nov. 1., Paris, France