

Ph.D. téziszfüzet

# Néhány ciklusú közép-infravörös impulzusok haladó metrológiája

SZERZŐ

**Kurucz Máté**

TÉMAVEZETŐ

**Dr. Kiss Bálint**

Tudományos munkatárs

ELI-ALPS Lézeres Kutatóintézet

TANÁCSADÓ

**Prof. Eric Cormier**

Professor

Laboratoire Photonique, Numérique et Nanosciences

Université de Bordeaux



Fizika Doktori Iskola

Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Természettudományi és Informatikai Kar

Szegedi Tudományegyetem

Szeged

2021

# I. Bevezetés

A közép-infravörös lézerforrások jelentős fejlődésen mentek keresztül az elmúlt évtizedekben. E technológiai forradalmat a közép-infravörös források számos felhasználási lehetősége tüzelte, mint például erős-terek fizikája szilárd állapotú anyagokban, időbontott spektroszkópia vagy éppen a távérzékelés, hogy csak néhányat említsünk. Az egyik legígéretesebb alkalmazási terület az attoszekundumos folyamatok vizsgálata. Az attoszekundumos impulzusok keltése a néhány ciklusú lézerimpulzusokkal történő magasharmonikus-keltésen alapul. A keltés folyamata erősen nemlineáris, a maximális keltett fotonenergia a ponderomotoros erőtől függ, ami a lézer hullámhosszával négyzetesen skálázódik. Ennek köszönhetően nagy hullámhosszú lézerek szélesebb magasharmonikus spektrumot eredményeznek, ami még rövidebb, attoszekundumos impulzusok előállítását teszi elviekben lehetővé. Ugyanakkor a keltés hatásfoka drasztikusan csökken a növekvő hullámhosszal. Széles spektrumú, elegendően nagy teljesítményű magasharmonikusok keltéséhez néhány ciklusú, nagy energiájú, fázisstabil, közép-infravörös lézerrendszerekre van szükség.

Manapság a leggyakoribb szilárdtest-lézerek neodímium ( $\text{Nb}^{3+}$ ), itterbium ( $\text{Yb}^{3+}$ ) vagy titán ( $\text{Ti}^{3+}$ ) dópoló anyagot használnak, és a közeli infravörös tartományban sugároznak. Femtoszekundumos közép-infravörös lézerek csak a századforduló környékén kezdtek megjelenni. A gyakran használt lézerkomponensek, mint a diszperzív tükrök, nagy reflexiójú bevonatok, akusztóoptikai fénymodulátorok, stb., rosszabb paraméterekkel rendelkeznek a közeli infravörösben elérhető társaikhoz képest, jelentősen drágábbak, és csupán

néhány cég gyártja őket világszerte. Továbbá, a közeli infravörös lézerek szilícium alapú detektorokat alkalmaznak, ami a felvezetőipar leggyakoribb alapanyaga. A szilícium viszont alkalmatlan közép-infravörös sugárzás detektálására, így helyette pl. InAsSb, vagy HgCdTe vegyes félvezetőből készült detektorokat szoktak használni. Ám ezek rosszabb paraméterekkel rendelkeznek és előállítási költségük is magasabb. Mivel a közép-infravörös detektorsoroknál vagy kameráknál az árkülönbség még jelentősebb, sok közép-infravörös lézerciagnosztikai eszköz alternatív megoldásokat alkalmaz. A kutatásom célja a közép-infravörös diagnosztikai eszközök palettájának bővítése volt új, kevésbé költséges és egyszerű módszerek kifejlesztésével.

A disszertációmban három új, ultragyors közép-infravörös lézerekhez kifejlesztett módszert mutatok be. A kísérletek túlnyomó részénél az ELI-ALPS MIR lézerrendszerét használtam. E lézerrendszer közel 4 ciklusú lézerimpulzusokat generál  $3,2 \mu\text{m}$  központi hullámhossznál  $100 \text{ kHz}$  ismétlési frekvenciával. A lézer átlagteljesítménye  $14 \text{ W}$  ( $140 \mu\text{J}/\text{impulzus}$ ), ami azt jelenti, hogy egy-egy impulzus csúcsteljesítménye  $3,3 \text{ GW}$ .

A disszertációmban bemutatott kísérletek az ELI-ALPS laboratóriumaiban (ELI-HU Non-profit Ltd.) végrehajtott kísérleteken alapulnak. A TOUCAN módszerhez az előzetes kísérletre a Bordeaux-i Egyetemen került sor, Eric Cormier felügyelete alatt. A Gwangju Institute of Science and Technology nevű intézményben fejlesztették ki a TIPTOE módszert, amely hasznos referenciamérést biztosított a posztkompresszált (utólagosan összenyomott) impulzusok időbeli karakterizációjához.

## II. Tudományos előzmények

### Közép-infravörös sugárzás

A fény leírható transzverzális elektromágneses hullámonként, amelynek tulajdonságai a hullámegyenlet megoldásából számolhatók. Elsősorban a hullámhosszával vagy frekvenciájával jellemezhető, ami alapján több kategóriába csoportosítható. Az emberi szem nagyjából a 400–700 nm-es hullámhossztartományon érzékeny, amelyet ezért látható fénynek hívunk. Az ennél hosszabb hullámhosszú sugárzást nevezzük infravörösnek, amit tovább csoportosíthatunk közeli, rövid, közép, és hosszú hullámhosszú infravörösre. A fenti csoportosítás alapja a fény-anyag kölcsönhatás mikroszkopikus mechanizmusainak hullámhosszfüggése. Ebből az elemi különbségből következik, hogy a közeli infravörösben működő optikák és detektorok a közép-infravörösben nem, illetve csak részben használhatók.

### Vivő-burkoló fázis

Egy lézerrimpulzus térerősségének időbeli alakja az impulzus burkolójának és a periodikusan oszcilláló vivőhullámnak a szorzataként írható le. A burkoló és a vivőhullám közötti fáziskülönbséget, ami impulzusról impulzusra változhat, vivő-burkoló fázisnak, röviden CEP-nek (carrier-envelope phase) nevezzük. Ha a lézerrimpulzus kellően rövid (néhány optikai ciklus hosszúságú), akkor a CEP-érték drasztikusan befolyásolja az impulzus térerősségének időbeli eloszlását, következésképpen az extrém nemlineáris optikai folyamatok (ionizáció, visszaszóródás) kimenetelét. Emiatt e kísérleteknél nélkülözhetetlen a CEP-érték változásának nyomon követése,

illetve az impulzusok CEP-stabilizálása. A CEP-érték változásának egylovéses mérésére számos módszert fejlesztettek ki az elmúlt két évtizedben. Az egylovéses CEP-mérések két csoportba sorolhatók aszerint, hogy az alkalmazott módszer nemlineáris interferometrián vagy ionizáción alapul. Az interferometrián alapuló módszerek előnye, hogy alacsony csúcsteljesítménynél is működnek, míg az ionizációs módszerek előnye, hogy nagy ismétlési frekvencián ( $> 10$  kHz) is lehet egylovéses méréseket végrehajtani velük. A disszertációmban bemutatott TOUCAN módszer a két csoport előnyeit egyesíti: alacsony csúcsteljesítményű lézerezimpulzusok egylovéses CEP mérésére képes nagy ismétlési frekvenciákon.

### **Spektrális fázistolás mérése**

Polikromatikus fény esetében a hullámegyenlet megoldása megadható különböző frekvenciájú monokromatikus hullámok szuperpozíciójaként. Az impulzusüzemű lézereknél a szállított energia időben rövid impulzusokba tömörül össze, így nagyobb csúcsintenzitás érhető el, mint a folytonos üzemű lézereknél. Ezen impulzusok is hasonlóan felbonthatók spektrális komponensekre, amelyek együttesen az impulzus spektrumát alkotják. A diszperzió jelensége az optikai impulzust alkotó monokromatikus hullámok sebessége közötti különbségből fakad, ami miatt e hullámok különböző fázistolást szenvednek el. Ennek következtében az impulzus időben megnyúlik, illetve megrövidül. Optikai elemek (tükörök, ablakok, optikai szálak, rácspárok stb.) spektrális fázistolásának mérésére több módszert is kifejlesztettek, amelyek közül az egyik legegyszerűbb és legmegbízhatóbb módszer a spektrálisan bontott interferometria, röviden SRI (spectrally resolved interferometry). Egy SRI interferogram felvételéhez spektrális

mérés szükséges, ahol a kinyert információ a koherens fényforrás spektrális tartományára korlátozódik. A disszertációmban bemutatott dual-band SRI az SRI módszer egy olyan változata, amely a lézerimpulzusok fundamentális és SH (másodharmonikus, second harmonic) frekvenciatartományain párhuzamosan méri az optikai elemek spektrális fázistolását, kizárólag az SH frekvencia tartományon felvett interferogramokból.

### **Posztkompresszió**

Ultragyors CEP-stabil, közép-infravörös lézerimpulzusok előállítására jelenleg az OPCPA (optical parametric chirped pulse amplification) technológia a legalkalmasabb. A módszer során a keletkező impulzusok hosszát többek között az optikai erősítésre használt nemlineáris kristályok spektrális sáv szélessége korlátozza. Az így keletkező lézerimpulzusoknak a hossza tovább csökkenthető a posztkompressziós módszerekkel. A posztkompresszió alapja az önfázis moduláció nemlineáris optikai folyamata során bekövetkező spektrális szélesedés. Ez több különböző közegben is létrehozható: hullámvezetőkben, gázzal töltött kamrákban vagy vékony átlátszó lemezekben. Ezután a szélesített spektrumhoz tartozó legrövidebb impulzusidő (transzformáció-limitált impulzushossz) úgy érhető el, ha a teljes diszperzió kompenzálásra kerül. A disszertációmban bemutattam az ELI-ALPS MIR lézerrendszerével előállított impulzusok spektrális kiszélesítését és időbeli kompresszióját a vékonylemez posztkompresszió módszerével. Ennek segítségével a közép-infravörös impulzusok hossza az eredetinek közel felére csökkent, amit két egymástól független méréssel is bizonyítottam.

### III. Új tudományos eredmények

A következő tézispontokban összefoglalom a legfontosabb tudományos eredményeimet:

I. Kifejlesztettem egy interferometrikus módszert a delokalizált CEP mérésére, amit TOUCAN módszernek neveztem el. A módszer nagyobb ismétlési frekvenciával képes néhány  $\mu\text{J}$  energiájú impulzusok egylovéses mérésére mint bármely korábbi módszer. Az eszköz prototípusának tesztelése a 100 kHz ismétlési frekvencián üzemelő MIR lézerrel történt. Megvizsgáltam az impulzusok energiaváltozását és az optikai szál hőmérséklet-ingadozásait, mint lehetséges hibaforrásokat. Arra a következtetésre jutottam, hogy az adott lézer esetében ezek az effektusok minimális hatással vannak a CEP mérés pontosságára. Megmutattam, hogy a trigger jel és a fotodetektor által érzékelt jel között megfigyelhető időbeli jitter jelentősen csökkenti a mérés pontosságát. Ezt a problémát úgy küszöböltem ki, hogy egy újabb interferenciajelet generáltam a detektált jelben, amelynek segítségével a jitter hatását a jelfeldolgozás után korrigáltam. A CEP zaj analízise megmutatta, hogy a zaj túlnyomórészt nagyfrekvenciás komponensekből áll. Megállapítottam, hogy a MIR lézerrendszer CEP zajának további csökkentéséhez egy, a teljes ismétlési frekvencián működő, egylovéses CEP detektáló és stabilizáló rendszerre van szükség. [T1]

II. Kifejlesztettem az optikai elemek spektrális fázistolásának mérésére szolgáló, dual-band SRI-re keresztelt módszert, ami az ultragyors lézerforrás fundamentális és SH frekvenciatartományain párhuzamosan nyer ki fázisinformációt, kizárólag az SH frekvencia tartományon felvett interferogramokból. A módszert először egy

hullámoptikai elméleti modellel és az ezen alapuló numerikus szimulációval vizsgáltam meg. Ezután a módszert kísérletileg demonstráltam egy dual-band SRI elrendezés építésével, ahol a fényforrás a MIR lézerrendszerből származó  $9 \mu\text{J}$  energiájú impulzusok voltak. Megmértem ismert optikai anyagok spektrális fázistolását, amivel igazoltam a módszert és az eszköz megfelelő működését. Továbbá bebizonyítottam, hogy egyetlen mért interferogram kétszer annyi információt hordoz, mint amennyi a spektrális fázistolás teljes rekonstrukciójához szükséges mindkét frekvenciatartományon. Ezt különböző kiértékelési módszerek alkalmazásával és a kapott eredmények összehasonlításával igazoltam. A hullámoptikai modell alapján megvizsgáltam a dual-band SRI továbbfejlesztési lehetőségeit, hogy több mint két frekvenciatartományt mérhessünk párhuzamosan. [T2]

III. Megterveztem és megépítettem egy vékonylemezes posztkompressziós elrendezést, hogy spektrálisan kiszélesítem és időben kompresszáljam a MIR lézer impulzusait. Az 50 fs-os, 100 kHz-es közép-infravörös lézerimpulzusokat 23 fs impulzusidőre sikerült időben összenyomni. Arra jutottam, hogy a YAG és a Si anyagból készült lemezek kombinációja ideális a spektrum szélesítésére a lineáris és nemlineáris optikai tulajdonságaiknak köszönhetően. Ezt kísérletileg is bizonyítottam 2 mm vastag YAG és 1 mm vastag Si lemezzel, ahol az anyagokban lévő optikai intenzitást a lemezek fókuszáló tükörtől vett távolságának a változtatásával állítottam be. Az impulzusok összenyomása 23 fs-ra egy 3,3 mm vastag  $\text{CaF}_2$  tömbben történt, amit két külön mérőeszközzel is bizonyítottam: az SH FROG-gal és a TIPTOE-val. Az impulzusok hosszútávú energia-, teljesítmény-, spektrum-, és CEP-stabilitását mértem 8 órán keresztül, ami bizonyította,



hogy a rendszer kiválóan alkalmas felhasználói kísérletekre.  
[T3]

## IV. Alkalmazott módszerek

Kutatómunkám során számos kísérleti módszert és eszközt használtam fel. Ezeket az alábbi pontokban mutatom be.

I. A TOUCAN módszer nemlineáris interferometrián és diszperzív Fourier-transzformáción alapszik. A diszperzív Fourier-transzformációhoz szükséges optikai szál diszperziós paramétereinek meghatározásához 2f-to-f interferométerrel keltett, spektrálisan modulált jelet használtam. A spektrális intenzitáseloszlást egy optikai spektrum analizátorral határoztam meg az optikai szál előtt. Az időben kinyújtott jelet a szálban való terjedés után fotodetektorral alakítottam át elektromos jellé, amit azután oszcilloszkóppal rögzítettem. Ugyanezt az oszcilloszkópot és fotodetektort használtam a TOUCAN mérés során is. Különböző beállított CEP értékeknél felvett spektrumok és időbeli görbék alapján a szál diszperzióját iteratív algoritmussal határoztam meg. A delokalizált CEP összehasonlításához referenciamérést végeztem egy kommerciális CEP mérőeszközzel (Fringeazz, Fastlite) 10 kHz ismétlési frekvencián. A CEP adatok összehasonlítása során a TOUCAN módszerrel 100 kHz-en mért CEP adatokat decimáltam (minden tizedik adatot tartottam csak meg). Az egyező CEP adatokat kétdimenziós pontgrafikonon ábrázoltam és e pontokra egyenest illesztettem. Továbbá kiszámoltam az egyező adatok között a cirkuláris korrelációt, és összevettem a mért adatok ingadozását. A TOUCAN módszer időbeli jitterének méréséhez egy Fabry-Perot etalonnal keltett stacionárius interferenciát használtam fel. A CEP érzékeny és

nem CEP érzékeny interferenciák szétválasztásához gyors Fourier-transzformáció (Fast Fourier Transform, FFT) numerikus módszert alkalmaztam. A mért delokalizált CEP értékek időbeli jitterjéből származó hibát ezután numerikusan korrigáltam. Az intenzitás-fázis csatolás mértékét egy közép-infravörös fotodetektor jel maximumai és a mért delokalizált CEP értékek közötti lineáris-cirkuláris korreláció alapján számítottam ki. A diszperziót meghatározó iteratív algoritmus, a mért CEP adatok kiértékelése és összehasonlítása, valamint az FFT algoritmus implementálása MATLAB környezetben készített programmal történt.

II. Az általam kifejlesztett dual-band SRI módszer a SRI és a másodharmonikus-keltéssel segített spektrálisan bontott interferometria (second harmonic assisted spectrally resolved interferometry, SH-SRI) módszereken alapszik. A dual-band SRI megvalósításához Mach–Zehnder és Michelson típusú interferométereket is használtam. A spektrogramok mérése optikai spektrumanalizátorral történt. A különböző frekvenciájú interferenciák szétválasztását és a fázis kiértékelését FFT numerikus módszerrel hajtottam végre. A módszer numerikus szimulációját és az adatok kiértékeléséhez szükséges programot MATLAB környezetben készítettem.

III. A MIR lézer impulzusainak időbeli kompresszálásához vékonylemezes poszkompressziós módszert és tömbkompresszort alkalmaztam. A spektrális szélesedést egy közép-infravörös spektrométerrel mértem meg. Az impulzusok időbeli alakját két mérőműszerrel is meghatároztam: egy házilag épített SH-FROG-gal és egy TIPTOE készülékkel. Az energia és az átlagteljesítmény hosszú távú stabilitását egy közép-infravörös fotodetektorral és egy teljesítménymérővel mértem meg. A hosszú távú CEP stabilitást a Fringeazz

mérőeszközzel vizsgáltam meg. A Strehl-arányt hullámfrontszenzor által mért közeltér-eloszlásból határoztam meg. A vékonylemezeken bekövetkező hőmérsékletváltozást hőkamerával követtem nyomon.

## V. Publikációk

### A tézispontokhoz kapcsolódó folyóiratcikkek

[T1] M. Kurucz, S. Toth, R. Flender, L. Haizer, B. Kiss, B. Persielle, E. Cormier, “Single-shot CEP drift measurement at arbitrary repetition rate based on dispersive Fourier transform”, *Optics Express* 27(9), 13387-13399 (2019) DOI: 10.1364/OE.27.013387

[T2] M. Kurucz, R. Flender, T. Grosz, A. Borzsonyi, B. Kiss, “Simultaneous spectral phase shift characterization in two frequency bands”, *Optics Communication* 500 127332 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127332>

[T3] M. Kurucz, R. Flender, L. Haizer, R. S. Nagymihaly, W. Cho, K. T. Kim, S. Toth, E. Cormier, B. Kiss, “2.3-cycle mid-infrared pulses from hybrid thin-plate post-compression at 7 W average power”, *Optics Communication* 472 126035 (2020) DOI: 10.1016/j.optcom.2020.126035

### További tudományos publikációk

[F1] S. Tóth, R. Flender, B. Kiss, M. Kurucz, A. Andrianov, L. Haizer, E. Cormier, K. Osvay, “Comparative study of an ultrafast, CEP-stable dual-channel mid-IR OPCPA system”, *Journal of the Optical Society of America B* 36(12) 3538-3546 (2019). DOI: 10.1364/JOSAB.36.003538

[F2] R. Hollinger, D. Hoff, P. Wustelt, S. Skruszewicz, Y. Zhang, H. Kang, D. Würzler, T. Jungnickel, M. Dumergue, A. Nayak, R. Flender, L. Haizer, M. Kurucz, B. Kiss, S. Kühn, E. Cormier, C. Spielmann, G. G. Paulus, P. Tzallas, M. Kübel, “Carrier-envelope-phase measurement of few-cycle mid-infrared laser pulses using High Harmonic Generation in ZnO”, *Optics Express* 28(5) 7314-7322 (2020). DOI: 10.1364/OE.383484

[F3] Y. Deng, Z. Zeng, P. Komm, Y. Zheng, W. Helml, X. Xie, Z. Filus, M. Dumergue, R. Flender, M. Kurucz, L. Haizer, B. Kiss, S. Kahaly, R. Li, G. Marcus, “Laser-induced inner-shell excitations through direct electron re-collision versus indirect collision”, *Optics Express* 28(16) 23251-23265 (2020). DOI: 10.1364/OE.395927

[F4] C.T. Holló, K. Miháلتz, M. Kurucz, A. Csorba, K. Kránitz, I. Kovács, Z.Z. Nagy, and G. Erdei. “Objective quantification and spatial mapping of cataract with a Shack-Hartmann wavefront sensor”, *Scientific Reports* 10(1), 1-10 (2020). DOI: 10.1038/s41598-020-69321-3

[F5] C. Medina, D. Schomas, N. Rendler, M. Debatin, L. Ben Ltaief, Z. Filus, B. Farkas, R. Flender, L. Haizer, B. Kiss, M. Kurucz, B. Major, S. Toth, F. Stienkemeier, R. Moshhammer, T. Pfeifer, S. R. Krishnan, A. Heidenreich, and M. Mudrich “Single-shot electron imaging of dopant-induced nanoplasmas”, *New Journal of Physics* 23(5), 053011 (2021). DOI: 10.1088/1367-2630/abf7f9

[F6] F. Haniel, H. Schroeder, S. Kahaly, A. Nayak, M. Dumergue, S. Mondal, Z. Filus, R. Flender, M. Kurucz, L. Haizer, B. Kiss, D. Charalambidis, M. F Kling, P. Tzallas, and

B. Bergues “Saturating Multiple Ionization in Intense Mid-Infrared Laser Fields”, *New Journal of Physics*. 23 (2021) DOI: 10.1088/1367-2630/abf583

[F7] R. Flender, M. Kurucz, T. Grosz, A. Borzsonyi, U. Gimzevskis, A. Samalius, D. Hoff, and B. Kiss, “Dispersive mirror characterization and application for mid-infrared post-compression”, *Journal of Optics* 23(6), 065501 (2021). DOI: 10.1088/2040-8986/abf88e

[F8] M. Kübel, P. Wustelt, Y. Zhang, S. Skruszewicz, D. Hoff, D. Würzler, H. Kang, D. Zille, D. Adolph, G. G. Paulus, A. M. Saylor, M. Dumergue, A. Nayak, R. Flender, L. Haizer, M. Kurucz, B. Kiss, S. Kühn, B. Fetić, and D. B. Milošević, “High-Order Phase-Dependent Asymmetry in the Above-Threshold Ionization Plateau”, *Phys. Rev. Lett.* 126(11), 113201 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.113201

### **Konferencia-előadások**

(O) – szóbeli előadás, (P) - poszterelőadás, Félkövér\* - előadó szerző.

[O1] **M. Kurucz**\*, Sz. Toth, R. Flender, L. Haizer, B. Kiss, B. Perseille, E. Cormier, “Dispersive Fourier transform based single-shot CEP drift measurement at arbitrary repetition rate”, *CLEO/Europe 2019, Munich, Germany, 23–27 June 2019*. DOI: 10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8871557

[O2] **Sz. Tóth**\*, R. S. Nagymihály, A. Andrianov, B. Kiss, R. Flender, M. Kurucz, L. Haizer, E. Cormier, K. Osvay, “Conceptual study of a 1 kHz 10 mJ-class mid-IR OPCPA system with thermal aspects”, *UFO, Bol, Croatia, 6–11 October*

2019. URL: <https://ultrafastoptics2019.engin.umich.edu/schedule/full-program/>

[O3] **K. Osvay\***, A. Borzsonyi, H. Cao, V. Chvykov, E. Cormier, R. Flender, P. Jojart, M. Kalashnikov, B. Kiss, M. Kurucz, N. Khodakovskiy, R. Lopez-Martens, R. S. Nagymihaly, V. Pajer, S. Toth, “Few cycle, phase controlled laser developments for ELI-ALPS”, CLEO 2020, San Jose, California, USA, 11–15 May 2020. URL: [www.cleoconference.org/](http://www.cleoconference.org/)

[O4] **A. Borzsonyi\***, E. Cormier, R. Lopez-Martens, M. Kalashnikov, B. Kiss, P. Jojart, J. Csontos, S. Toth, N. Khodakovskiy, R. Nagymihaly, R. Flender, M. Kurucz, I. Seres, Z. Varallyay, K. Varju, G. Szabo, “Operation experiences and further developments of the few-cycle, high average power lasers of ELI-ALPS”, ASSL, OSA Virtual Event, 13-16 October 2020. URL: <https://www.osapublishing.org/conference.cfm?meetingid=1&yr=2020>

[O5] **M. Kurucz\***, R. Flender, L. Haizer, R. S. Nagymihaly, E. Cormier, B. Kiss, “Sub-two-cycle pulses in the mid-IR based on thin plate compression at high average power”, HILAS, OSA Virtual Event, 16–20 November 2020. URL: <https://www.osapublishing.org/conference.cfm?meetingid=119&yr=2020>

[O6] **M. Kurucz\***, S. Tóth, J. Csontos, B. Kiss, E. Cormier, “Every single-shot CEP drift detection for near-infrared lasers with modified TOUCAN method”, HILAS, OSA Virtual Event, 16-20 November 2020. URL: <https://www.osapublishing.org/conference.cfm?meetingid=119&yr=2020>

[O7] **M. Kurucz**\*, R. Flender, T. Grosz, A. Borzsonyi, U. Gimzevskis, A. Samalius, D. Hoff, and B. Kiss “High resolution mid-IR spectrally resolved interferometry”, SPIE Virtual Event, 17–23 April 2021. URL: <https://spie.org/conferences-and-exhibitions/optics-and-optoelectronics/programme>

[O8] **M. Kurucz**\*, S. Toth, J. Csontos, B. Kiss, and E. Cormier. “Every single-shot CEP drift detection for near-infrared lasers with a modified TOUCAN method”, CLEO/Europe-EQEC, 21–25 June 2021. URL: [https://www.cleoeurope.org/wp-content/uploads/2021/06/cleo\\_2021\\_advance\\_programme.pdf](https://www.cleoeurope.org/wp-content/uploads/2021/06/cleo_2021_advance_programme.pdf)

[P1] **M. Kurucz**\*, Á. Börzsönyi, M. Kovács, R. Nagymihály, K. Osvay, “Az SZTE TeWaTi femtoszekundumos lézerrendszer vivő-burkoló fáziscsúszásának mérése és stabilizálása,” Magyar Fizikus Vándorgyűlés, Szeged, Hungary, 24–27 August 2016. URL: [http://titan.physx.u-szeged.hu/fizikus\\_vandorgyules\\_2016/node/6#poszterek](http://titan.physx.u-szeged.hu/fizikus_vandorgyules_2016/node/6#poszterek)

[P2] **M. Kurucz**\*, Sz. Tóth, R. Flender, L. Haizer, B. Kiss, B. Perseille, E. Cormier, “High-accuracy single-shot CEP noise measurement at arbitrary repetition rate”, UFO, Bol, Croatia, 6–11 October 2019. URL: <https://ultrafastoptics2019.engin.umich.edu/schedule/full-program/>

[P3] **M. Kurucz**\*, R. Flender, L. Haizer, B. Kiss, R. S. Nagymihály, Sz. Tóth, E. Cormier, “Two-cycle pulses in the mid-IR based on hybrid thin plate compression at high average power”, ICEL, Prague, Czech Republic, 21–25 October 2019. URL: <https://indico.eli-beams.eu/event/334/page/142-welcome>

[P4] **M. Kurucz\***, Sz. Tóth, R. Flender, L. Haizer, B. Kiss, B. Perseille, E. Cormier, “High-accuracy single-shot CEP noise measurement at arbitrary repetition rate”, ICEL, Prague, Czech Republic, 21–25 October 2019. URL: <https://indico.eli-beams.eu/event/334/page/142-welcome>

[P5] **M. Kurucz\***, R. Flender, T. Grosz, A. Borzsonyi, U. Gimzevskis, A. Samalius, D. Hoff, and B. Kiss, “High resolution spectrally resolved interferometry in the mid-IR”, CLEO/Europe-EQEC, 21–25 June 2021. URL: [https://www.cleoeurope.org/wp-content/uploads/2021/06/cleo\\_2021\\_advance\\_programme.pdf](https://www.cleoeurope.org/wp-content/uploads/2021/06/cleo_2021_advance_programme.pdf)