

Ph.D. értekezés tézisei

Ultrarövid impulzusok erősítése következő generációs titán-zafír lézerrendszerekben

SZERZŐ

Nagymihály Roland Sándor

TÉMAVEZETŐ

Dr. Börzsönyi Ádám

tudományos munkatárs

SZTE, Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

TUDOMÁNYOS TANÁCSADÓ

Dr. Osvay Károly

egyetemi docens

SZTE, Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék



Fizika Doktori Iskola

Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Természettudományi és Informatikai Kar

Szegedi Tudományegyetem

Szeged

2018

I. Bevezetés

Az ultragyors fizikai, biológiai, illetve kémiai folyamatok időbeli vizsgálatát azok a rövid fényfelvillanások tették lehetővé, amelyeket lézerek segítségével állíthatunk elő. Ezek az ún. ultrarövid fényimpulzusok, amelyekben tárolt energia megnövelésével rendkívül nagy csúcsteljesítmény érhető el, akár a petawatt ($1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$) nagyságrendben is. A nagyintenzitású lézerek segítségével az anyag korábban elérhetetlen, nemlineáris tartományba eső válaszát tudták tanulmányozni. Ezáltal a lézerekkel elérhető femtoszekundumos ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) hosszúságú impulzusoknál rövidebb, attoszekundumos ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$) felvillanásokat állítottak elő. Az utóbbiak az elektromágneses spektrum extrém ultraibolya, illetve röntgen tartományában hozhatóak létre, amely az impulzusok tér- és időbeli lokalizációjának egészen új szintjét hozta el a kutatók számára.

Az ultrarövid lézerimpulzusokkal végzett kísérletek, valamint a másodlagos sugárzások keltése során az impulzusok elektromos terének amplitúdója mellett a fázisa is kiemelt szerephez jut. A néhány, illetve az egyetlen optikai ciklust tartalmazó fényjelek esetén a vivőhullám és az elektromos tér burkolójának egymáshoz viszonyított fázisa, az ún. *vivő-burkoló fázis* (*carrier-envelope phase, CEP*) alapvetően befolyásolja a fény-anyag kölcsönhatást. Az adott lézer által előállított impulzusok fázisának, továbbá időbeli hosszának, és így a csúcshintenzitásának ingadozásai jelentős hatást gyakorolnak egy kísérlet eredményére. A lézer működése függ a környezeti tényezőktől, így azok befolyásolják az impulzusparaméterek stabilitását.

A nagyintenzitású femtoszekundumos impulzusok előállítására a titán ionokkal adalékolt zafír kristályokon (*Ti:Sapphire, Ti:Sa*) alapuló lézerrendszerek alkalmazása vált igen elterjedtté. A Ti:Sa kiváló fizikai tulajdonságainak, illetve emissziós spektrumának

köszönhetően lehetővé teszi a nagy csúcs- és átlagteljesítményű lézerrendszerek létrehozását.

Értekezésem célja a Ti:Sa erősítés során fellépő fázisinstabilitások, valamint a nagy csúcs- és átlagteljesítményű erősítők vizsgálata, amely során a kísérleti munkát a *Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékének TeWaTi Femtoszekundumos Lézer Laboratóriumában*, valamint a Berlinben található *Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie im Forschungsverbund Berlin e.V.* intézetben végeztem el. Numerikus szimulációimat az ELI-ALPS Kutatóközpont (ELI-HU Nonprofit Kft.) számítástechnikai infrastruktúrájának felhasználásával valósítottam meg.

II. Tudományos előzmények és célkitűzések

Kutatási eredményeim az ELI-ALPS Nagyintenzitású Lézerének második, HF-100 elnevezésű, nagy ismétlési frekvenciájú és nagy energiájú karjának megvalósításához szükséges kutatás-fejlesztés részét képezik. A tervek szerint a HF-100 lézer nagyobb, mint 50 TW csúcsteljesítményű CEP-stabilizált impulzusokat fog biztosítani 100 Hz ismétlési frekvencián, 10 fs impulzushossz mellett. A disszertációm alapjául szolgáló tudományos munkám célkitűzéseit az alábbi pontokban foglalom össze.

A Ti:Sa alapú *fázismodulált impulzuserősítő (chirped pulse amplification, CPA)* rendszerekben a CEP-stabilitás aegységekben bekövetkező romlásának vizsgálata eddig az oszcillátorokra, valamint az impulzusnyújtókra és kompresszorokra terjedt ki. Azonban, az erősítés során, a Ti:Sa kristályokban bekövetkező CEP-csúszás, és annak változásainak részletes vizsgálatára eddig nem került sor.

C1. Vizsgálatokat végzek a vízhűtéses Ti:Sa erősítők kristályában kialakuló CEP-csúszásra. Kísérletileg megvizsgálom a CEP

impulzusról impulzusra vett stabilitását befolyásoló tényezőket a lézerezősítés során. Meghatározom továbbá, hogy az erősítő kristály hűtésének instabilitásai milyen hatással lehetnek az erősített impulzusok CEP-jére.

Nagy átlagteljesítményű Ti:Sa erősítőkben az erősítő közeg jelentős hőterhelésnek van kitéve a magas abszorbeált pumpateljesítmény révén. A kristály hőmérsékletének emelkedése a pumpált térfogatban az erősítendő nyaláb torzulásaihoz fog vezetni, ami a törésmutató-változás, a termikus eredetű mechanikai feszültség, illetve a depolarizációs effektusok eredménye. Ha a Ti:Sa kristály hőmérsékletét kriogenikus értékre csökkentjük (< 80 K), annak hővezetési együtthatója ugrásszerűen megnő, amely a termikus effektusok jelentős mérséklését eredményezi. A kriogenikus hűtés azonban a kristály vákuumban való elhelyezését teszi szükségessé, amely mechanikai instabilitást eredményezhet az optikai elrendezésben.

C2.a. Megvizsgálom egy kriogenikus hűtésű Ti:Sa erősítőben fellépő spektrális fáziszaj értékét befolyásoló hatásokat. Továbbá meghatározom, hogy a vákuum rendszerek, illetve a kriogenikus hűtőfej mekkora fáziszaj járulékot eredményeznek az erősített impulzusok esetén. Megállapítom, hogy az erősítő működésének különböző szakaszaiban a mechanikai eredetű zajkomponensek milyen forrásokból származnak.

C2.b. Meghatározom a termikus és mechanikai eredetű CEP-zaj értékét a Ti:Sa erősítő működése során. Megvizsgálom az erősített impulzusok CEP-zajának statisztikai eloszlását az ismétlési frekvencia függvényében.

Az ultranagy csúcsteljesítményű Ti:Sa erősítő rendszerek esetén az abszorbeált pumpateljesítmény az erősítő közegben jelentősen

limitálja az elérhető ismétlési frekvenciát, és így az erősített impulzusok átlagteljesítményét. Korszerű 100 TW osztályú erősítő rendszerek 10 Hz, míg a PW osztályú erősítők 1-3 Hz ismétlési frekvenciájú impulzusokat állítanak elő. Az ismétlési frekvencia növelése számos alkalmazás szempontjából előnyös lenne, lerövidítve az egyes kísérletek elvégzéséhez szükséges időtartamot, valamint javítva az impulzusok paramétereinek stabilitását. Emiatt hatékony hűtési eljárásra van szükség, amely az átlagteljesítmény felskálázására itterbiummal adalékolt lézerek esetén nagy sikerrel alkalmazott *koronglézer (thin disk, TD)* geometria segítségével potenciálisan elérhető lehet. Egy ilyen elrendezés a Ti:Sa kristályban kialakult hőmérséklet-gradienst, illetve az erősített impulzusok térbeli torzulásait jelentősen csökkentheti.

C3.a. Megvizsgálom az ultranagy csúcsteljesítményű TD Ti:Sa erősítő fokozatok megvalósításának lehetőségeit. Ehhez szimulációkat végzek a konvencionális és TD geometriájú erősítőkben kialakuló hőmérséklet-eloszlásokra.

C3.b. Kísérletileg megvizsgálom az erősítést egy vízhűtéses Ti:Sa TD lézerfej segítségével. Megmérem a korongerősítő kristályában pumpálás mellett kialakuló hőmérséklet-változást, valamint az egyensúlyi állapotban kialakuló hőmérsékletprofil. Továbbá megvizsgálom az Ti:Sa kristályban pumpálás esetén kialakult termikus hatások által eredményezett hullámfront-torzulás mértékét.

A TD koncepció Ti:Sa erősítő közeggel a jelenleg elérhetőnél jóval magasabb ismétlési frekvenciák, azaz nagyobb átlagteljesítményű impulzusok erősítését is lehetővé teheti. Ahhoz, hogy a felskálázás határait megállapítsuk, részletes modellszámítások elvégzése szükséges a lehetséges geometriák és lézerparaméterek mentén.

C4.a. Numerikus modellt építék a HF-100 lézerrendszer Ti:Sa végerősítőjének TD módszerrel való megvalósíthatóságának vizsgálatára. Megállapítom a vízűtés hatását a kristálybéli hőmérséklet-eloszlásra egy- és kétcsatornás elrendezések segítségével.

C4.b. Megvizsgálom a kétoldali hűtésű Ti:Sa korongerősítők további felskálázási lehetőségeit. Nagyobb kimeneti energiájú erősítők termikus működését fogom megvizsgálni különböző ismétlési frekvenciákon, egy- és kétkristályos lézerfejekben.

III. Vizsgálati módszerek

Kutatómunkám során számos kísérleti módszert, eszközt, illetve szoftvert használtam fel. Ezeket az alábbi pontokban mutatom be.

M1. A Ti:Sa alapú erősítés során kialakuló CEP-csúszás, és a CEP-zaj meghatározására a *spektrálisan bontott interferometria (spectrally resolved interferometry, SRI)* módszerét használtam fel. Ehhez egy aszimmetrikusan osztott *Mach-Zehnder interferométert (MZI)* építettem. Az MZI tárgykarjában egy hárompasszos Ti:Sa erősítőt valósítottam meg. Egy CPA rendszer nyújtott, erősített impulzusait küldtem az erősítőbe, amelyekre nagyjából tízszeres erősítést hoztam létre. A minta erősítőt egy 0,2% *négyzetes középértékű (root mean square, RMS)* hosszútávú energiastabilitással rendelkező Nd:YLF lézer pumpálta. Az MZI kimenetén egy nagyfelbontású leképező spektrográfot helyeztem el, amely által felvett kétdimenziós interferogramokat a térbeli koordináta mentén átlagolva spektrálisan bontott interferenciát kaptam. A nyers adatok kiértékeléséhez saját kódot írtam MATLAB környezetben, amely a Fourier-transzformációs módszeren alapult. Az interferogramokból kinyert spektrális fázisból illesztéssel meghatároztam a fázisderiváltakat, majd a CEP-csúszást. A hűtés és a pumpaimpulzusok hatását egy

másik, nagyobb energiával pumpált, kisebb vastagságú Ti:Sa kristályt tartalmazó erősítőben is megvizsgáltam. A kristály törésmutatójának hőmérséklet- és frekvenciafüggését felhasználva egy egyszerű modellt építettem, amit összehasonlítottam a hűtés hatásának vizsgálata során a CEP csúszására kapott eredményekkel.

M2.a. Az SRI módszert felhasználva megvizsgáltam egy kriogenikus hűtésű Ti:Sa erősítő spektrális fáziszaját. A kétpasszos erősítőt egy kompakt, Michelson-típusú interferométer tárgykarjában építettem fel a mérési zaj csökkentésének érdekében. A Ti:Sa kristályt egy réz befogatásban rögzítve, egy kisméretű vákuumkamrában helyeztem el, és egy folyékony héliummal működő kriogenikus hűtőegységgel 30 K hőmérsékletre hűtöttem. A kamrában 10^{-6} mbar-t meghaladó vákuumot hoztam létre a hűtés üzemelése esetén. A spektrális interferencia rögzítésére gyors vonalkamera felhasználásával egy nagyfelbontású spektrométert építettem és kalibráltam. Az interferogramok kiértékelését Fourier-transzformációs módszerrel végeztem. A Ti:Sa kristály pumpálása nélkül megmértem az egyes üzemi fázisokban az erősítetlen impulzusok fáziszaját. Az erősítés hatását egy CPA rendszer nyújtott és előerősített impulzusainak felhasználásával mértem. Az erősítő fáziszaj spektrumának meghatározásához a CPA rendszer Ti:Sa oszcillátorának impulzusait felhasználva 10 kHz frekvencián vettem fel az interferogramokat. Továbbá megmértem mechanikai vibrációk spektrumát egy, az optikai asztalhoz rögzített rezgésmérővel.

M2.b. Az erősítőben kialakuló CEP-csúszás meghatározásához megmértem a nullad- és az elsőrendű fázisderivált függését az interferométer referencia karhosszának, valamint a Ti:Sa kristály hőmérsékletének változtatása esetén. Az erősítés vizsgálatához a Ti:Sa kristályt minden esetben 10 mJ energiájú pumpaimpulzusokkal gerjesztettem, amellyel az interferométer osztását kompenzálva

tízszeres erősítést állítottam be. Az erősítő pumpálását a vízhűtéses mérések esetén használt pumpalézer végezte. A kriogenikus hűtő kikapcsolásával lecsökkentve a mérési zajt, a minimális hőmérséklet közelében vizsgáltam az erősítés hatását a spektrális fázis zajára vonatkozóan.

M3.a. Numerikus modellt építettem *végeselem módszerrel (finite element method, FEM)* a COMSOL Multiphysics szoftverben a TD és konvencionális Ti:Sa végerősítők hűtésére vonatkozóan. Konstans hőmérsékleti peremfeltételt alkalmazva a hűtött felületen, ideális hűtést szimulálva vizsgáltam a két típusú erősítést, stacionárius esetre.

M3.b. A kísérleti elrendezés építésével és diagnosztikájával hozzájárultam az első *pumpálás közbeni energiakicsatolás (extraction during pumping, EDP)* módszerét használó TD Ti:Sa végerősítő kísérleti demonstrációjához. Az EDP-TD elrendezést egy 100 TW csúcsteljesítményű lézerrendszer kriogenikus hűtésű végerősítőjének mag- és pumpaipulzusait használva valósítottuk meg. Az aktív tükör elrendezésű TD erősítőben három passzt alakítottunk ki az erősítendő, míg két passzt a pumpaipulzusokra. A pumpaipulzusokat három, egyenként 2 J energiájú pumpalézer biztosította maximálisan 10 Hz ismétlési frekvencián. A kristály elülső felületéhez közel elhelyezett fotodióda segítségével mérve a szórt fluoreszcenciát vizsgáltam a transzverzális lézeraktivitást. Egy hőkamerát felhasználva vizsgáltam a Ti:Sa kristályban pumpálás esetén kialakuló hőmérsékletprofil. Egy Shack-Hartmann hullámfront szenzor segítségével mértem pumpálás által eredményezett hullámfront torzulást. Ehhez a kivilágító He-Ne lézer nyalábjának a Ti:Sa korong hátsó felületéről való egyszeri visszaverődését használtam fel.

M4.a. Kétdimenziós, numerikus FEM modellt építettem, amivel a Ti:Sa kristály hűtését szimuláltam egy 100 TW osztályú végerősítő esetén. Közvetlen vízhűtéses, egy- és kétoldali hűtésű koncepciókat

vizsgáltam meg. A hűtőfolyadék áramlását, valamint a folyadékban és erősítő közegben kialakuló hőterjedést leíró egyenleteket az ELI-ALPS mérnökei által tervezett lézerfej geometrián oldottam meg. A hűtővíz áramlási sebességének változtatásával optimalizáltam a hűtés hatásfokát.

M4.b. További szimulációkat végeztem nagyobb pumpaimpulzus energiák, és így nagyobb csúcsteljesítményű erősítők esetére. A Ti:Sa korong méreteit és a pumpanyaláb átmérőjét egy konstans pumpaenergia-sűrűségnek megfelelően állítottam be minden esetben. Megvizsgáltam, hogy a hűtőcsatornában ellentétes irányú folyadékáramlást, több kristályt, valamint hűtőcsatornát alkalmazva hogyan változik a hőmérséklet-eloszlás a lézerfejben.

IV. Új tudományos eredmények

Tudományos eredményeimet az alábbi tézispontokban foglalom össze:

T1. Megvizsgáltam a vízhűtéses Ti:Sa erősítés CEP-stabilitását a lézerparaméterek függvényében. A CEP csúszására egységnyi hőmérséklet-változásra, a kristály hosszára normalizálva 11 mrad/°C/mm értéket mutattam ki. Megállapítottam, hogy az erősített impulzusok CEP-zaja a pumpaenergiával lineárisan növekszik, míg az ismétlési frekvenciával exponenciális jelleggel csökken. A magimpulzusok energiája a CEP csúszására és zajára a mérés érzékenységén belül nem volt hatással [TP1].

T2.a. Meghatároztam egy kriogenikus hűtésű Ti:Sa erősítő spektrális fáziszaját a vákuum-, illetve a hűtőrendszerek működési szakaszainak függvényében. A vákuum-, és a kriogenikus rendszerek spektrális fáziszaj járuléka is 50 mrad RMS körüli értéket kaptam [TP2]. A spektrális fázis zajspektrumát összehasonlítottam az optikai

elrendezés mechanikai rezgéseinek frekvenciaeloszlásával, amely alapján azonosítottam a főbb zajforrásokat.

T2.b. Megmértem az erősített impulzusok spektrális fáziszaját az ismétlési frekvencia függvényében. Meghatároztam a CEP termikus és mechanikai eredetű zajának statisztikai eloszlásait. A termikus eredetű CEP-zajra 12 mrad RMS alatti, addig a mechanikai eredetű fáziszajra 1 mrad alatti értékeket kaptam [TP2].

T3.a. TD geometria alkalmazását javasoltam az EDP módszerrel kombinálva nagyenergiájú Ti:Sa végerősítők átlagteljesítményének felskálázásához. Numerikus szimulációkkal összehasonlítottam egy konvencionális és egy EDP-TD technikával működtetett 2 PW csúcsteljesítményű erősítő termikus hatásait. Az EDP-TD erősítő esetén jelentős javulást mutattam ki a hőmérséklet eloszlásában [TP3].

T3.b. Kísérletileg demonstráltam egy 100 TW osztályú EDP-TD Ti:Sa végerősítő fokozat működését. Eglyövéses kísérletekkel 5 J abszorbeált pumpaenergia és 0,5 J magimpulzus energia mellett 2,6 J erősített impulzusenergiát értem el [TP4]. A Ti:Sa kristályban kialakuló hőmérsékletet 4 J energiájú impulzusokkal 10 Hz ismétlési frekvencián vizsgálva egyenletes térbeli eloszlást tapasztaltam, és a hőmérséklet maximumára 30,3 °C-ot kaptam. Megmértem a kristályban pumpálás esetén fellépő hullámfront torzulást a kristályon való kétszeri áthaladásra.

T4.a. Kétdimenziós numerikus modellezést végeztem a HF-100 lézer egy lehetséges, 100 TW osztályú EDP-TD Ti:Sa végerősítőjének hűtésére vonatkozóan. Egy- és kétcsatornás hűtési elrendezéseket megvizsgálva azt kaptam, hogy kétcsatornás hűtés esetén 4 mm vastag kristállyal a hőmérséklet maximális emelkedése 35 °C értékre csökkenthető [TP5].

T4.b. Nagyobb csúcsteljesítményű EDP-TD erősítőket vizsgáltam meg 8,5 PW szintig, különböző ismétlési frekvenciákon.

Kétkristályos és három hűtőcsatornás elrendezést alkalmazva tovább növeltem a hűtés hatásfokát, amely több kW átlag-, és több PW csúcsteljesítményű rendszerek végerősítőinek megvalósítását teheti lehetővé [TP5].

V. Publikációk

Tézispontok alapjául szolgáló referált folyóiratcikkek

- TP1.** A. Borzsonyi, R. S. Nagymihaly, K. Osvay, “Drift and noise of the carrier-envelope phase in a Ti:Sapphire amplifier,” *Laser Phys. Lett.* **13**, 015301 (2016).
- TP2.** R. S. Nagymihaly, P. Jojart, A. Borzsonyi, K. Osvay, “Spectral Phase Noise Analysis of a Cryogenically Cooled Ti:Sapphire Amplifier”, *Opt. Express* **25**, 6690-6699 (2017).
- TP3.** V. Chvykov, R. S. Nagymihaly, H. Cao, M. Kalashnikov, K. Osvay, “Design of a thin disk amplifier with extraction during pumping for high peak and average power Ti:Sa systems (EDP-TD),” *Opt. Exp.* **24**, 3721-3733 (2016).
- TP4.** V. Chvykov, H. Cao, R. Nagymihaly, M. P. Kalashnikov, N. Khodakovskiy, R. Glassock, L. Ehrentraut, M. Schnuerer, and K. Osvay, „High peak and average power Ti:sapphire thin disk amplifier with extraction during pumping,” *Opt. Letters* **41**, 3017-3020 (2016).
- TP5.** R. S. Nagymihaly, H. Cao, D. Papp, G. Hajas, M. Kalashnikov, K. Osvay, and V. Chvykov, “Liquid-cooled Ti:Sapphire Thin Disk amplifiers for high average power 100 TW systems,” *Opt. Express* **25**, 6664-6677 (2017).

További referált folyóiratcikkek

- P1.** R. S. Nagymihaly, H. Cao, P. Jojart, M. Kalashnikov, A. Borzsonyi, V. Chvykov, R. Flender, M. Kovacs, and K. Osvay, “Carrier-envelope phase stability of a polarization-encoded chirped pulse Ti:Sapphire amplifier,” *J. of the Opt. Soc. of Am. B*, megjelenés alatt

(2018).

- P2.** H. Cao, M. Kalashnikov, K. Osvay, N. Khodakovskiy, R. S. Nagymihaly, and V. Chvykov, "Active spectral shaping with polarization encoded Ti:Sapphire amplifiers for sub 20-fs multi-TW systems," *Laser Phys. Lett.*, megjelenés alatt (2018).

Fontosabb konferencia prezentációk

KE – szóbeli előadás, * – előadó

- KE.1.** R. Nagymihaly, P. Jojart, A. Borzsonyi*, and K. Osvay, "Increase of Carrier-Envelope Phase Noise in Water and Cryogenically Cooled Ti:Sapphire Amplifiers," in *High-Brightness Sources and Light-Driven Interactions*, 20-22 March 2016, Long Beach, California, USA, paper HS3B.4.
- KE.2.** M. P. Kalashnikov*, H. Cao, K. Osvay, V. Chvykov, N. Khodakovskiy, and R. Nagymihaly, "Polarization Encoded Chirped Pulse Amplification in Ti:sapphire - a Way Towards Few Cycle PW Lasers," in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 5-10 June 2016, San Jose, USA, paper SM1M.2.
- KE.3.** V. Chvykov*, H. Cao, R. Nagymihaly, M. Kalashnikov, N. Khodakovskiy, K. Osvay, "New Generation of Ultra-High Peak and Average Power Laser Systems," in *25th Annual International Laser Physics Workshop*, 11-15 July 2016, Yerevan, Armenia, invited talk, paper S4.1.1.
- KE.4.** V. Chvykov*, H. Cao, R. Nagymihaly, M. Kalashnikov, N. Khodakovskiy, K. Osvay, "Extraction During Pumping for Thin Disc Ti:Sapphire Amplifiers (EDP-TD)," in *25th Annual International Laser Physics Workshop*, 11-15 July 2016, Yerevan, Armenia, paper S4.1.2.
- KE.5.** R. S. Nagymihaly*, H. Cao, M. Kalashnikov, N. Khodakovskiy, L. Ehrentraut, K. Osvay, V. Chvykov, "Proof-of-principle experiment on a Thin Disk Ti:Sapphire amplifier with Extraction During

- Pumping (EDP-TD)," in *7th EPS-QEOD Europhoton Conference*, 21-26 August 2016, Vienna, Austria, paper SSL-3.7.
- KE.6.** H. Cao*, R. S. Nagymihaly, M. Kalashnikov, V. Chvykov, N. Khodakovskiy, K. Osvay, "Towards few cycle PW peak and kW average power Ti:Sapphire laser systems," in *International Conference on Coherence and Nonlinear Optics / International Conference on Lasers, Applications, and Technologies*, 26-30 September 2016, invited talk, paper IWB1.
- KE.7.** R. S. Nagymihaly*, H. Cao, M. Kalashnikov, N. Khodakovskiy, L. Ehrentraut, K. Osvay and V. Chvykov, "Thin Disk Ti:Sapphire amplifiers for Joule-class ultrashort pulses with high repetition rate," in *SPIE Optics + Optoelectronics*, 24-27 April 2017, Prague, Czech Republic, paper 10238-11.
- KE.8.** H. Cao*, M. Kalashnikov, K. Osvay, N. Khodakovskiy, R. S. Nagymihaly, and V. Chvykov, "Active spectral pre-shaping with polarization encoded amplifiers," in *SPIE Optics + Optoelectronics*, 24-27 April 2017, Prague, Czech Republic, paper 10238-09.
- KE.9.** R. S. Nagymihaly*, P. Jojart, A. Borzsonyi, K. Osvay, "Measurement of spectral phase noise in a cryogenically cooled Ti:Sa amplifier," in *SPIE Optics + Optoelectronics*, 24-27 April 2017, Prague, Czech Republic, paper 10238-12 (2017).
- KE.10.** R. S. Nagymihaly, P. Jojart, A. Borzsonyi*, K. Osvay, "Spectral phase instabilities during amplification in Ti:Sapphire," in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 14-19 May 2017, San Jose, California, USA, paper SM3I.7.
- KE.11.** V. Chvykov*, R. Nagymihaly, H. Cao, M. Kalashnikov, K. Osvay, "High Repetition Rate Thin Disk Ti:Sa Amplifiers for Sub-PW class Laser Systems," in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 14-19 May 2017, San Jose, California, USA, paper STu1O.5.
- KE.12.** V. Chvykov*, R. Nagymihaly, H. Cao, M. Kalashnikov, and K. Osvay, "High Peak Power and Repetition Rate Laser Systems with

Thin Disk Ti:Sa Amplifiers," in *Frontiers in Optics 2017*, 18-21 September 2017, Washington, D.C. USA, paper LW5F.2.

- KE.13.** V. Chvykov*, R. Nagymihaly, H. Cao, M. Kalashnikov, K. Osvay, "Ti:Sapphire as Perspective Active Media for Thin Disk Lasers and Amplifiers," in *Advanced Solid State Lasers Conference*, 1-5 October 2017, Nagoya, Aichi, Japan, paper AW4A.2.
- KE.14.** R. Nagymihaly, H. Cao, P. Jojart, M. Kalashnikov, A. Borzsonyi, V. Chvykov*, K. Osvay, "Carrier-Envelope Phase Stability in a Polarization-Encoded Ti:Sa amplifier," in *Advanced Solid State Lasers Conference*, 1-5 October 2017, Nagoya, Aichi, Japan, paper AW1A.5.
- KE.15.** R. S. Nagymihaly*, P. Jojart, A. Borzsonyi, H. Cao, M. Kalashnikov, V. Chvykov, J. Limpert, T. Mocek, and K. Osvay, "Investigation of spectral phase stability issues in ultrafast laser systems by spectrally resolved interferometry," *International Conference on Extreme Light*, 6-9 November 2017, Szeged, Hungary.
- KE.16.** M. Kalashnikov*, V. Chvykov, H. Cao, R. Nagymihaly, N. Khodakovskiy, "Future of Ti:Sapphire lasers: combining high peak and average power," *International Conference on Extreme Light*, 6-9 November 2017, Szeged, Hungary.