

Nagy csúcsteljesítményű néhány ciklusú fázismodulált optikai parametrikus erősítők optimalizálása

Doktori értekezés tézisei

Tóth Szabolcs

Témavezető

Dr. Osvay Károly

egyetemi docens



Fizika Doktori Iskola

Szegedi Tudományegyetem

Természettudományi és Informatikai Kar

Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Szeged

2021

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés	2
2	Célkitűzések	4
3	Alkalmazott módszerek	6
4	Új tudományos eredmények	7
	A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos publikációk	8
	Egyéb tudományos publikációk	9
	Konferencia előadások (Szóbeli)	9
	Konferencia előadások (Poszter)	10
	Magyar tudományos publikációk	11
	Hivatkozások	11

1 Bevezetés

A XIX. század elejéig a Nap volt a legintenzívebb fényforrás, amellyel kísérletezni tudtak. Ennek alapján írták le a fény terjedésének ma is használatos, alapvető törvényeit, mint például az egyenes vonalú terjedést, fénytörést és a diszperziót (az anyag törésmutatójának a fény hullámhosszától való függése). Mindezt egy olyan fényforrás segítségével tették, melynek átlagos intenzitása a Föld felszínén $0,14 \text{ W cm}^{-2}$. Ennél az intenzitás szintén az anyagok optikailag lineáris viselkedést mutatnak. Ez azt jelenti, hogy az anyag nem létesít kölcsönhatást a fény különböző frekvencia komponensei között. Ezzel szemben, a lézerek 1960-ban történő sikeres kísérleti megvalósítását követően [1] lehetőség nyílt több MW cm^{-2} (tízmilliószor nagyobb) intenzitás elérésére. Ekkora fényintenzitás már nemlineáris viselkedést vált ki az anyagban. Az első ilyen nemlineáris jelenséget, a másodharmonikus keltést (SHG), már 1961-ben, nagyjából egy évvel a lézer felfedezése után demonstrálták [2].

A másod-harmonikus keltés és ehhez hasonló nemlineáris folyamatokban valós energiaszintek nem vesznek részt. Az ilyen folyamatokat parametrikus folyamatoknak nevezzük. Emiatt a parametrikus folyamatok lejátszódása a femtoszekundumtól ($1 \text{ fs} = 1 \times 10^{-15} \text{ s}$) nagyobb időintervallumokon, ahol ezeket jelenleg hasznosítani és tanulmányozni lehet, pillanatszerűnek tekinthető.

A másod-harmonikus keltés demonstrálását követően a tudósok vizsgálni kezdték a fény nemlineáris folyamatokkal történő erősítését [3]. Ez a módszer az úgy nevezett optikai parametrikus erősítés (OPA), amelyet kísérletileg először 1965-ben igazoltak [4]. A folyamat során a pumpa impulzusból pillanatszerű energiatranszfer történik a jel impulzusba. A pumpa és a jel impulzusok foton energia különbsége egy harmadik, úgynevezett "idler" impulzus megjelenését eredményezi.

Az impulzusüzemű lézerek technológiai fejlődése rövidesen eljutott arra az intenzitás szintre, amelynél az anyagok törésmutatója intenzitásfüggővé vált. Ez olyan effektusok felfedezéséhez vezetett, mint az önfázis moduláció (SPM) és az önfókuszálódás (Kerr-effektus), illetve ezek következményeként a lézernyaláb terjedés közben történő felbomlása. Mindezen jelenségek megakadályozták az impulzusok energiájának további növelését. A problémára bő két évtizeden át nem találtak megoldást, mígnem 1985-ben Donna Strickland és Gérard Mourou sikeresen alkalmazták a fázismodulált impulzusú erősítés ("chirped pulse amplification"), rövidítve CPA, módszerét lézerpulzusokra [5]. A módszer lényege, hogy az ultrarövid impulzusok időtartamának növelésével lecsökkentjük a csúcshintenzitást. Így erősítés közben nem lépnek fel az előbb említett, nemkívánt nemlineáris jelenségek. Az erősítést az impulzusok időbeli összenyomása követi. A ma működő titán-zaffír alapú CPA rendszerekben 100 fs alatti időtartamú impulzusokat, akár 1 ns időtartamra nyújtják, ami lehetővé teszi az impulzusok energiájának akár 12 nagyságrenddel történő növelését. Így, az impulzusok csúcsteljesítmény az időbeli összenyomásukat követően a petawattos (PW) szintet is elérheti. Azokat a CPA rendszereket, amelyekbe lézerek helyett optikai parametrikus erősítésnél használatos nemlineáris kristályt helyeznek, optikai parametrikus fázismodulált impulzusú erősítőknek ("optical parametric chirped pulse amplification", OPCPA) nevezik.

Az OPCPA első és egyben legfontosabb előnye a lézerek erősítésén alapuló CPA módszerhez képest, hogy a pumpa és jel fotonok energiakülönbsége egy harmadik foton formájában távozik a kristályból. Így a nemlineáris kristályokban nagyságrendekkel kisebb hőterhelés lép fel, mint a lézer kristályokban. Ebből kifolyólag az

OPCPA könnyebben skálázható nagy átlagteljesítményű impulzussorozatok létrehozására. Továbbá a lézerezősítőkből fellép egy parazitikus folyamat, az úgynevezett erősített spontán emisszió (ASE) jelensége. Ez az erősített impulzusok előtt és után egy hosszan elnyúló zajszintet okoz, ami negatívan befolyásolja a kísérletek lefolyását. Időtartamát a lézerek közeg gerjesztett energiaszintjének lecsengési ideje szabja meg. Az ennek megfelelő jelenség a parametrikus erősítőkből az úgynevezett parametrikus szuperfluoreszcencia (PSF), amely az elektromágneses tér vákuum fluktuációjából származik. Ennek időtartamát a pumpaimpulzus időtartama szabja meg. Így, ha a pumpa és jel impulzusok időtartama közel azonos, akkor az OPCPA módszerrel nagyobb kontraszttal (jobb jel-zaj viszonytal) rendelkező impulzus állítható elő. Nem utolsósorban a parametrikus erősítők sáv szélessége általában nagyobb, mint a lézerek aktív közegek emissziós sáv szélessége. Ezért az OPCPA rendszerek 10 fs időtartamú impulzusok előállítását is lehetővé teszik, míg a titán-zafír alapú CPA rendszerekben az elérhető impulzushossz, speciális technikák hiányában, a 40 fs és 50 fs közötti tartományba esik.

Előnyös tulajdonságai mellett az OPCPA működéséhez sokkal szigorúbb körülmények szükségesek. A legfontosabb követelmény a pumpa és jel impulzusok szinkronizációja. Továbbá az erősített jel impulzus igen érzékeny a pumpa impulzus téridőbeli alakjára, ami sokáig nagy kihívások elé állította a pumpalézer technológiát. Mindezek mellett az energiakonverzió tipikus hatásfoka OPCPA-ban a 10% és 25% közötti tartományba esik, míg titán-zafír CPA rendszerekben kisebb erőfeszítésekkel 50% is elérhető. Ez utóbbi az oka annak, hogy a PW csúcsteljesítményű impulzusokat előállító CPA rendszerek többsége lézerezősítő kristályon alapul.

Az OPCPA rendszerekkel olyan nagy átlag és csúcsteljesítményű ultrarövid impulzusok előállítása vált lehetővé amelyek a fény elektromos terének csupán néhány oszcillációs ciklusból állnak [6]. Ezeket a szakirodalomban néhány-ciklusú impulzusoknak nevezik (ez általában 1-5 ciklust jelent). Az ilyen fényimpulzusok tudományos szempontból nagy jelentőséggel bírnak. Például vékony céltrágyon protonokat és ionokat kelthetnek, melyeket akár néhány MeV energiára is felgyorsíthatnak [7]. Továbbá, közel egyciklusú, néhány mJ energiájú impulzusokkal 1 fs időtartamú és MeV energiájú elektronnyalábokat keltettek [8]. Mindezek mellett, talán az attoszekundumos ($1 \text{ as} = 1 \times 10^{-18} \text{ s}$) impulzusok előállítása motiválja leginkább a több tíz millijoule energiájú, vivő-burkoló fázisstabilizált (CEP-stabilizált) és néhány ciklusú impulzusok előállítását [9].

Az OPCPA rendszerek másik fő jelentősége, hogy erősítési spektrumukat a nemlineáris kristályok átláthatósági tartománya szabja meg, míg ezt lézerek esetén az aktív anyagok emissziós spektruma korlátozza. Ez lehetőséget nyújt olyan OPCPA rendszerek megvalósítására, amelyek a közép infravörös (mid-IR) tartományban működnek. Az utóbbi évtizedben megfigyelték, hogy számos atomfizikai kísérlet lefolyása előnyösebb, ha a kísérletet meghatározó lézerimpulzus hullámhossza ebben a spektrális tartományban van. Például ilyen fényimpulzusokkal keltették az eddig mért legrövidebb (43 as) attoszekundumos fényimpulzust [10]. Továbbá, számos molekula rotációs és vibrációs spektruma is a közép infravörös tartományban van, így ezeket a forrásokat előszeretettel alkalmazzák például biológiai minták vizsgálatánál és lélegzet analízis során [11].

2 Célkitűzések

Az előzőekben felsorolt kísérletek megkövetelik a nagy csúcs- és átlagteljesítményű, ultrarövid impulzusok előállítását a közeli- és közép-infravörös (near-IR és mid-IR) spektrális tartományokban. Jelenleg erre az OPCPA módszer az egyik legalkalmasabb erősítési technika. Ennél fogva munkám motivációját az OPCPA rendszerek fejlesztése jelentette.

2.1 Első célkitűzés

Az OPCPA rendszerek számos előnyös tulajdonsággal bírnak a hagyományos CPA rendszerekkel szemben. Fontos kivétel ez alól a konverziós hatások, amely a titánzafír alapú CPA rendszerekben általában 50%, viszont OPCPA-ban tipikusan 10-20% körüli érték. Ez a fő oka annak, hogy a ma működő PW csúcsteljesítményű impulzusokat előállító rendszerek jelentős hányada lézerezésen alapuló CPA rendszert alkalmaz. Ezért céлом egy olyan OPA elrendezés numerikus vizsgálata és optimalizálása volt, amelynek segítségével növelhető a jelenlegi energiakonverziós hatások.

2.2 Második célkitűzés

A több milli joule energiával rendelkező, egy optikai ciklusból álló impulzusok előállítását főként az izolált attoszekundumos impulzusok generálásra motiválja. Az egyciklusú impulzusok előállításának egyik módja az OPCPA erősítő kritikus sáv szélességének növelése lehet. Ezért céлом egy olyan OPCPA elrendezés numerikus vizsgálata volt, amelynek segítségével növelhető az erősített impulzusok sáv szélessége.

2.3 Harmadik célkitűzés

Az ELI-ALPS kutató központban található Egyciklusú Lézerrendszer első fejlesztési fázisa, SYLOS 1, volt az első olyan rendszer amely 1 kHz ismétlési frekvencián állított elő TW csúcsteljesítményű, vivő-burkoló fázis stabilizált lézerimpulzusokat [6]. A második fejlesztési szakasz (SYLOS 2) célja az impulzushossz 2 optikai ciklusra történő csökkentése volt a csúcsteljesítmény megtartása mellett. Ezért céлом az ELI-ALPS SYLOS 2 lézerrendszerében lévő szélessávú OPCPA fokozatok numerikus optimalizációja volt.

2.4 Negyedik célkitűzés

A CEP-stabilizált közép-infravörös impulzusokat különbségi frekvenciakeltés segítségével hozzák létre. Azonban ezek energiáját növelni kell, aminek két lehetséges módja van. Az egyik a közép-infravörös impulzusok DFG-t követő optikai parametrikus erősítése (OPA). Dolgozatomban ezt "idler módszernek" neveztem el. A másik módszer ennek fordítottja, azaz a DFG-t megelőzi a jelimpulzus erősítése OPB-ban. Ezt munkám során "jel módszernek" hívtam. A tudományos közlemények alapján a két módszert egyenlő arányban alkalmazzák, azonban nincs indokolva, hogy miért az adott módszerre esett a választás. Ez bizonyos szempontból érthető, hiszen laboratóriumi körülmények között az átállás egyik módszerről a másikra

nehezen kivitelezhető, egyes esetekben nem is lehetséges. Így célul tűztem ki a közép-infravörös ultrarövid lézerimpulzusok két féle előállításának numerikus összehasonlító elemzését.

3 Alkalmazott módszerek

Egy OPCPA rendszer fejlesztése során rengeteg a szabad paraméter, amelyek optimalizálásához elengedhetetlen a széleskörű numerikus módszerekkel történő vizsgálat. A numerikus szimulációk segítségével nagymértékben csökkenthetőek a rendszer kifejlesztéséhez szükséges költségek. Továbbá a szimulációk révén információ nyerhető az impulzusok téridőbeli alakjáról, melynek mérése nem mindig kivitelezhető kísérleti körülmények között.

Az OPCPA modellezéséhez fejlesztett numerikus kódok, amelyek a folyamat minden egyes tulajdonságát figyelembe veszik, meglehetősen összetettek [12]. Ezen felül a modellezéshez szükséges számításigények a nyalábméret és az impulzusidő növelésével exponenciálisan növekednek. Ennek következményeként a tudományos folyóiratokban eddig közölt numerikus szimulációknak két esete figyelhető meg, amelyekkel csökkenthető a szimulációhoz szükséges számítási teljesítmény. Az első esetben, közelítésekkel élve, csak kétdimenziós (terjedési távolság és idő) modelleket alkalmaznak [13] vagy elhanyagolnak bizonyos jelenségeket, például a diszperziót [14]. A második esetben egy négydimenziós (x, y, z, t) modellt használva, 10 ps időtartamnál nem hosszabb impulzusokkal és/vagy kis méretű nyalábokkal végeznek számításokat [15].

Munkám során egy olyan négydimenziós, numerikus kódot használtam OPCPA modellezéshez, amely speciális módszerrel számítja ki a szélessávú, nyújtott impulzusok Fourier-transzformáltját. A módszernek köszönhetően lecsökken a numerikus modellezéshez szükséges számítási igény, így lehetőséget ad olyan OPCPA rendszerek közelítés nélküli modellezésére, amelyben a nyújtott impulzusok hossza meghaladja a 10 ps időtartamot. A legjobb tudomásom szerint, a tudományos közlemények alapján, ehhez hasonló szimulációs eredményeket még nem demonstráltak.

A dolgozatomban bemutatott numerikus modellezések elvégzéséhez egy 128 GB memóriát és Intel Xeon E5-1650 CPU processzorral felszerelt szervert használtam. Az OPCPA kód vezérlését egy sajátkezüleg fejlesztett Python kóddal vezéltem, ami lehetővé tette több egymást követő, automatizált optimalizációs számítás futtatását. Továbbá, olyan numerikus terjesztő algoritmusokat fejlesztettem ki Pythonban, amelyekkel az OPCPA fokozatok közötti terjedést és gömbtükrök által okozott fázistolást, paraxiális közelítés nélkül lehet modellezni. Ez lehetővé tette OPCPA rendszerek valóságű szimulációját.

4 Új tudományos eredmények

T1 Numerikus módszerekkel megvizsgáltam és optimalizáltam egy úgynevezett "cascaded extraction OPA" (CE-OPA) erősítő elrendezést és kimutattam, hogy a CE-OPA módszer legalább 10%-al növeli meg a pumpából jelimpulzusba történő energiakonverzió hatásfokát [T1].

T2 Numerikus módszerekkel megvizsgáltam és optimalizáltam egy dupla BBO kristályból álló erősítő elrendezést, amellyel két optikai ciklusból álló impulzusok előállításához szükséges sáv szélességet lehet erősíteni. Modelleztem, hogy ezt az elrendezést milyen feltételek esetén lehet alkalmazni és megállapítottam, hogy az alábbi két feltétel teljesülése esetén ez az erősítő konfiguráció az impulzusok téridőbeli torzulásához vezet [T2]:

1. A pumpaimpulzus erősítés közben fellépő laterális elmozdulása összemérhető a pumpa és jel nyalábok méretével.
2. Az erősítés nagy és így a pumpa módosítja ("vezeti") a jelimpulzus terjedését az erősítő közegben.

T3 Modelleztem és optimalizáltam az ELI-ALPS Egyciklusú Lézerrendszerének (SYLOS) OPCPA rendszerét, ami jelenleg 2,2 optikai ciklusú (6,4 fs) időtartamú TW csúcsteljesítményű impulzusokat állít elő [T2].

T4 Modelleztem és optimalizáltam egy közép-infravörös tartományban működő OPCPA rendszert az "idler módszert" és a "jel módszert" alkalmazva és összehasonlítottam az erősített impulzusok paramétereit. Kimutattam, hogy a pumpa energia ki nyerésének hatásfoka kicsivel jobb és a közép-infravörös impulzus csúcsteljesítménye magasabb az "idler módszert" alkalmazva, míg a CEP-stabilitás jobb és a kompresszált impulzusok időtartama kicsivel rövidebb a "jel módszer" használatával [T3].

T5 Kimutattam, legjobb tudomásom szerint először, hogy a pumpaimpulzus kiürülése és a fázis modulált impulzusok időtartamának erősítés közben történő csökkenése spektrális beszűkülést és alacsonyabb csúcsteljesítményt elérését eredményezi az OPCPA rendszer kimenetén [T3].

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos publikációk

- [T1] H. Cao, S. Toth, M. Kalashnikov, V. Chvykov, and K. Osvay, “Highly efficient, cascaded extraction optical parametric amplifier,” *Optics Express*, vol. 26, no. 6, pp. 7516–7527, 2018. DOI: [10.1364/OE.26.007516](https://doi.org/10.1364/OE.26.007516).
- [T2] S. Toth, T. Stanislauskas, I. Balciunas, R. Budriunas, J. Adamonis, R. Danilevicius, K. Viskontas, D. Lengvinas, G. Veitas, D. Gadonas, A. Varanavicius, J. Csontos, T. Somoskoi, L. Toth, A. Borzsonyi, and K. Osvay, “SYLOS lasers - the frontier of few-cycle, multi-TW, kHz lasers for ultrafast applications at extreme light infrastructure attosecond light pulse source,” *Journal of Physics: Photonics*, vol. 2, no. 4, p. 045 003, 2020. DOI: [10.1088/2515-7647/ab9fe1](https://doi.org/10.1088/2515-7647/ab9fe1).
- [T3] S. Toth, R. Flender, B. Kiss, M. Kurucz, A. Andrianov, L. Haizer, E. Cormier, and K. Osvay, “Comparative study of an ultrafast, CEP-stable, dual-channel mid-IR OPCPA system,” *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 36, no. 12, pp. 3538–3546, 2019. DOI: [10.1364/JOSAB.36.003538](https://doi.org/10.1364/JOSAB.36.003538).

Egyéb tudományos publikációk

- [O1] M. Kurucz, S. Tóth, R. Flender, L. Haizer, B. Kiss, B. Persielle, and E. Cormier, “Single-shot CEP drift measurement at arbitrary repetition rate based on dispersive Fourier transform,” *Opt. Express*, vol. 27, no. 9, pp. 13 387–13 399, 2019. DOI: [10.1364/OE.27.013387](https://doi.org/10.1364/OE.27.013387).
- [O2] M. Kurucz, R. Flender, L. Haizer, R. S. Nagymihaly, W. Cho, K. T. Kim, S. Toth, E. Cormier, and B. Kiss, “2.3-cycle mid-infrared pulses from hybrid thin-plate post-compression at 7 W average power,” *Optics Communications*, vol. 472, p. 126 035, 2020, ISSN: 0030-4018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126035>.
- [O3] C. Medina, D. Schomas, N. Rendler, M. Debatin, D. Uhl, A. Ngai, L. B. Ltaief, M. Dumergue, 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*, vol. 23, no. 5, p. 053 011, 2021. DOI: [10.1088/1367-2630/abf7f9](https://doi.org/10.1088/1367-2630/abf7f9).

Konferencia előadások (Szóbeli)

- [CO1] T. Stanislauskas, I. Balciunas, R. Budriunas, G. Veitas, D. Gadonas, J. Adamonis, A. Michailovas, A. Borzsönyi, **Sz. Toth**, J. Csontos, and K. Osvay, “Chirped pulse parametric amplifier producing 5-tw, 2.1-cycle, CEP stable pulses at 1 kHz repetition rate,” Optical Society of America, 2019, cg_p-16. DOI: [10.1364/CLEO_EUROPE.2019.cg_p_16](https://doi.org/10.1364/CLEO_EUROPE.2019.cg_p_16).
- [CO2] K. Osvay, A. Börzsönyi, H. Cao, E. Cormier, J. Csontos, P. Jójárt, M. Kalashnikov, B. Kiss, R. Lopez-Martens, **Sz. Toth**, and Z. Varallyay, “Development status and operation experiences of the few cycle high average power lasers of ELI-ALPS (Conference Presentation),” in *Short-pulse High-energy Lasers and Ultrafast Optical Technologies*, International Society for Optics and Photonics, vol. 11034, SPIE, 2019. DOI: [10.1117/12.2523057](https://doi.org/10.1117/12.2523057).
- [CO3] **Sz. Toth***, R. Nagymihaly, A. Andrianov, B. Kiss, R. Flender, M. Kurucz, L. Haizer, E. Cormier, and K. Osvay, “Conceptual study of a 1 kHz 10 mJ-class mid-IR OPCPA system with thermal aspects,” in *Ultrafast Optics 2019*, International Society for Optics and Photonics, vol. 11370, SPIE, 2019, pp. 77–80. DOI: [10.1117/12.2562972](https://doi.org/10.1117/12.2562972).
- [CO4] **Sz. Toth***, T. Stanislauskas, I. Balciunas, A. Andrianov, R. Budriunas, G. Veitas, J. Csontos, A. Borzsönyi, L. Toth, T. Somoskoi, and K. Osvay, “Design study of two-cycle bandwidth, single-color pumped OPCPA chain,” in *Ultrafast Optics 2019*, International Society for Optics and Photonics, vol. 11370, SPIE, 2019, pp. 81–83. DOI: [10.1117/12.2562972](https://doi.org/10.1117/12.2562972).
- [CO5] T. Stanislauskas, I. Balciunas, J. Adamonis, R. Budriunas, G. Veitas, D. Lengvinas, D. Gadonas, **Sz. Toth***, J. Csontos, A. Borzsönyi, L. Toth, T. Somoskoi, and K. Osvay, “Performance test results of ELI-ALPS SYLOS lasers,” in *Ultrafast Optics 2019*, International Society for Optics and Photonics, vol. 11370, SPIE, 2019, pp. 177–180. DOI: [10.1117/12.2562972](https://doi.org/10.1117/12.2562972).

- [CO6] T. Stanislauskas, I. Balciunas, R. Budriunas, J. Adamonis, **Sz. Toth**, A. Borzsonyi, K. Osvay, A. Michailovas, G. Veitas, and D. Gadonas, “Towards Sub-2 cycle, Several-TW, 1kHz OPCPA System Based on Yb:KGW and Nd:YAG Lasers,” Optical Society of America, 2018, STu40.1. DOI: [10.1364/CLEO_SI.2018.STu40.1](https://doi.org/10.1364/CLEO_SI.2018.STu40.1).
- [CO7] T. Stanislauskas, R. Budriūnas, G. Veitas, D. Gadonas, J. Adamonis, A. Aleknavičius, G. Masian, Z. Kuprionis, D. Hoff, G. G. Paulus, A. Borzsonyi, **Sz. Toth**, M. Kovacs, J. Csontos, R. López-Martens, and K. Osvay, “Performance tests of the 5 TW, 1 kHz, passively CEP-stabilized ELI-ALPS SYLOS few-cycle laser system (Conference Presentation),” in *High-Power, High-Energy, and High-Intensity Laser Technology III*, International Society for Optics and Photonics, vol. 10238, SPIE, 2017, pp. 87–87. DOI: [10.1117/12.2265775](https://doi.org/10.1117/12.2265775).

* - az eredményeket bemutató szerző

Konferencia előadások (Poszter)

- [CP1] **Sz. Toth***, T. Stanislauskas, I. Balciunas, R. Budriunas, G. Veitas, D. Gadonas, J. Csontos, A. Borzsonyi, T. Somoskoi, L. Toth, and K. Osvay, “Numerical investigation of broadband opcpa configurations for direct amplification of tw-level, two-cycle pulses,” in *2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference*, Optical Society of America, 2019, cf_p.31.
- [CP2] **Sz. Toth***, R. S. Nagymihaly, R. Flender, B. Kiss, M. Kurucz, L. Haizer, E. Cormier, and K. Osvay, “Design of a 10 khz, mj-level mid-ir opcpa system,” in *2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference*, Optical Society of America, 2019, cf_p.34.
- [CP3] M. Kurucz, **Sz. Toth***, R. Flender, L. Haizer, B. Kiss, B. Perseille, and E. Cormier, “High-accuracy single-shot CEP noise measurement at arbitrary repetition rate,” in *Ultrafast Optics 2019*, International Society for Optics and Photonics, vol. 11370, SPIE, 2019, pp. 293–295. DOI: [10.1117/12.2562972](https://doi.org/10.1117/12.2562972).
- [CP4] R. Flender, M. Kurucz, L. Haizer, R. Nagymihaly, **Sz. Toth**, A. Borzsonyi, E. Cormier, and B. Kiss, “Two-cycle pulses in the mid-IR based on hybrid thin plate compression at high average power,” in *Ultrafast Optics 2019*, International Society for Optics and Photonics, vol. 11370, SPIE, 2019, pp. 293–295. DOI: [10.1117/12.2562972](https://doi.org/10.1117/12.2562972).
- [CP5] **Sz. Toth***, H. Cao, M. Kalashnikov, V. Chvykov, and K. Osvay, “Cascaded extraction opcpa – a highly efficient power amplifier design,” Optical Society of America, 2018, JT5A.20. DOI: [10.1364/EUVXRAY.2018.JT5A.20](https://doi.org/10.1364/EUVXRAY.2018.JT5A.20).

- [CP6] A. Borzsonyi, A. Aleknavicius, D. Gadonas, D. Hoff, G. Veitas, G. G. Paulus, G. Masian, J. Adamonis, J. Csontos, K. Osvay, M. Kovacs, R. Budriunas, R. Lopez-Martens, **Sz. Toth**, T. Stanislauskas, and Z. Kuprionis, “Performance evaluation during the trial operation period of the 5 TW, 1 kHz few-cycle SYLOS laser system of ELI-ALPS,” in *ICEL 2017 - International Conference on Extreme Light*, 2017.
- [CP7] **Sz. Toth**^{*}, H. Cao, M. Kalashnikov, V. Chvykov, and K. Osvay, “Highly efficient, chirped pulse amplification in a cascaded extraction optical parametric amplifier design,” in *ICEL 2017 - International Conference on Extreme Light*, 2017.
- [CP8] **Sz. Toth**^{*}, M. Kovács, T. Stanislauskas, R. Budriunas, J. Adamonis, A. Aleknavicius, Á. Börzsönyi, J. Csontos, G. Shayeganrad, G. Veitas, R. Lopez-Martens, and K. Osvay, “Simulation of Optical Parametric Amplifier Stages of ELI-ALPS SYLOS Laser,” in *ICEL 2017 - International Conference on Extreme Light*, 2017.
- [CP9] A. Andrásik, **Sz. Toth**, R. S. Nagymihály, P. Jójárt, R. Flender, Á. Börzsönyi, and K. Osvay, “Development of few cycle Ti:Sapphire and NOPA amplifiers at 80MHz repetition rate,” in *SPIE Optics + Optoelectronics*, 2017.
- [CP10] A. Andrásik, P. Jójárt, **Sz. Toth**, R. S. Nagymihály, Á. Börzsönyi, and K. Osvay, “10 W multipass Ti:S amplifier for 80 MHz repetition rate,” in *7th EPS-QEOD Europhoton Conference*, 2017, PO–1.29.
- [CP11] **Sz. Toth**^{*}, R. S. Nagymihály, R. Flender, P. Jojart, A. Andrásik, A. Börzsönyi, and K. Osvay, “Development of an 80 MHz Repetition Rate tuneable amplifier system for In-Vivo Deep Brain Imaging Microscopy,” in *7th International Conference on Ultrahigh Intensity Lasers*, 2016.
- [CP12] **Sz. Toth**^{*}, R. Flender, R. S. Nagymihály, P. Jojart, A. Andrásik, A. Börzsönyi, and K. Osvay, “Modelling and Development of an 80 MHz Repetition Rate tuneable OPCPA system for In-Vivo Deep Brain Imaging Microscopy,” in *7th EPS-QEOD EUROPHOTON CONFERENCE*, 2016.
- [CP13] A. Andrasik, P. Jojart, **Sz. Toth**, R. S. Nagymiahly, A. Borzsonyi, and K. Osvay, “10 W-os többpasszos Ti:S erősítő 80 MHz-es ismétlődési frekvencián,” in *Magyar Fizikus Vándorgyűlés*, 2016.
- [CP14] **Sz. Toth**^{*}, R. S. Nagymihaly, P. Jojart, R. Flender, A. Andrasik, A. Borzsonyi, and K. Osvay, “80 MHz ismétlési frekvencián működő optikai parametrikus erősítő fejlesztése,” in *Magyar Fizikus Vándorgyűlés*, 2016.

* - az eredményeket bemutató szerző

Magyar tudományos publikációk

- [S1] Á. Börzsönyi, R. Nagymihály, S. Tóth, and K. Osvay, “A csörpölt (lézer)impulzus-erősítés,” *Fizikai szemle*, vol. 12, pp. 403–407, 2018.

Hivatkozások

- [1] T. H. Maiman, “Stimulated Optical Radiation in Ruby,” *Nature*, vol. 187, pp. 493–494, 4736 1960. DOI: [10.1038/187493a0](https://doi.org/10.1038/187493a0).
- [2] P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peters, and G. Weinreich, “Generation of Optical Harmonics,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 7, pp. 118–119, 4 1961. DOI: [10.1103/PhysRevLett.7.118](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.7.118).
- [3] J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing, and P. S. Pershan, “Interactions between light waves in a nonlinear dielectric,” *Phys. Rev.*, vol. 127, no. 6, pp. 1918–1939, 1962. DOI: [10.1103/PhysRev.127.1918](https://doi.org/10.1103/PhysRev.127.1918).
- [4] C. C. Wang and G. W. Racette, “Measurement of parametric gain accompanying optical difference frequency generation,” *Applied Physics Letters*, vol. 6, no. 8, pp. 169–171, 1965. DOI: [10.1063/1.1754219](https://doi.org/10.1063/1.1754219).
- [5] D. Strickland and G. Mourou, “Compression of amplified chirped optical pulses,” *Optics Communications*, vol. 56, no. 3, pp. 219–221, 1985. DOI: [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(85\)90120-8](https://doi.org/10.1016/0030-4018(85)90120-8).
- [6] R. Budriūnas, T. Stanislauskas, J. Adamonis, A. Aleknavičius, G. Veitas, D. Gadonas, S. Balickas, A. Michailovas, and A. Varanavičius, “53 W average power CEP-stabilized OPCPA system delivering 5.5 TW few cycle pulses at 1 kHz repetition rate,” *Optics Express*, vol. 25, no. 5, pp. 5797–5806, 2017. DOI: [10.1364/OE.25.005797](https://doi.org/10.1364/OE.25.005797).
- [7] S. Steinke, A. Henig, M. Schnürer, T. Sokollik, P. Nickles, D. Jung, D. Kiefer, R. Hörlein, J. Schreiber, T. Tajima, and et al., “Efficient ion acceleration by collective laser-driven electron dynamics with ultra-thin foil targets,” *Laser and Particle Beams*, vol. 28, no. 1, pp. 215–221, 2010. DOI: [10.1017/S0263034610000157](https://doi.org/10.1017/S0263034610000157).
- [8] D. Guénot, D. Gustas, A. Vernier, B. Beaufrepaire, F. Böhle, M. Bocoum, M. Lozano, A. Jullien, R. Lopez-Martens, A. Lifschitz, and J. Faure, “Relativistic electron beams driven by kHz single-cycle light pulses,” *Nature Photonics*, vol. 11, pp. 293–296, 5 2017. DOI: [10.1038/nphoton.2017.46](https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.46).
- [9] G. Sansone, E. Benedetti, F. Calegari, C. Vozzi, L. Avaldi, R. Flammini, L. Poletto, P. Villoresi, C. Altucci, R. Velotta, S. Stagira, S. De Silvestri, and M. Nisoli, “Isolated single-cycle attosecond pulses,” *Science*, vol. 314, no. 5798, pp. 443–446, 2006. DOI: [10.1126/science.1132838](https://doi.org/10.1126/science.1132838).
- [10] T. Gaumnitz, A. Jain, Y. Pertot, M. Huppert, I. Jordan, F. Ardana-Lamas, and H. J. Wörner, “Streaking of 43-attosecond soft-X-ray pulses generated by a passively CEP-stable mid-infrared driver,” *Opt. Express*, vol. 25, no. 22, pp. 27 506–27 518, 2017. DOI: [10.1364/OE.25.027506](https://doi.org/10.1364/OE.25.027506).
- [11] F. Tittel, D. Richter, and A. Fried, “Mid-infrared laser applications in spectroscopy,” in *Solid-State Mid-Infrared Laser Sources*, I. Sorokina and K. Vodopyanov, Eds., vol. 89, Springer, 2003. DOI: [10.1007/3-540-36491-9_11](https://doi.org/10.1007/3-540-36491-9_11).
- [12] G. Arisholm, “General numerical methods for simulating second-order nonlinear interactions in birefringent media,” *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 14, no. 10, pp. 2543–2549, 1997. DOI: [10.1364/JOSAB.14.002543](https://doi.org/10.1364/JOSAB.14.002543).

- [13] J. Moses, C. Manzoni, S.-W. Huang, G. Cerullo, and F. X. Kärtner, “Temporal optimization of ultrabroadband high-energy OPCPA,” *Opt. Express*, vol. 17, no. 7, pp. 5540–5555, 2009. DOI: [10.1364/OE.17.005540](https://doi.org/10.1364/OE.17.005540).
- [14] J. Hu, X. Wang, Y. Xu, L. Yu, F. Wu, Z. Zhang, X. Yang, P. Ji, P. Bai, X. Liang, Y. Leng, and R. Li, “Numerical analysis of the DKDP-based high-energy optical parametric chirped pulse amplifier for a 100 PW class laser,” *Appl. Opt.*, vol. 60, no. 13, pp. 3842–3848, 2021. DOI: [10.1364/AO.423191](https://doi.org/10.1364/AO.423191).
- [15] A. Thai, C. Skrobol, P. K. Bates, G. Arisholm, Z. Major, F. Krausz, S. Karsch, and J. Biegert, “Simulations of petawatt-class few-cycle optical-parametric chirped-pulse amplification, including nonlinear refractive index effects,” *Opt. Lett.*, vol. 35, no. 20, pp. 3471–3473, 2010. DOI: [10.1364/OL.35.003471](https://doi.org/10.1364/OL.35.003471).