

IMPULZUSÜZEMŰ ER-SZÁLLÉZERES ERŐSÍTŐ RENDSZER FEJLESZTÉSE NEMLINEÁRIS MIKROSKÓPIAI ÉS LÉGKÖRI LÉZER RADAR ALKALMAZÁSOKHOZ

Rózsa Dániel¹, Szipőcs Gergely¹, Kolonics Attila¹, Szipőcs Róbert¹

¹HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

Bevezetés

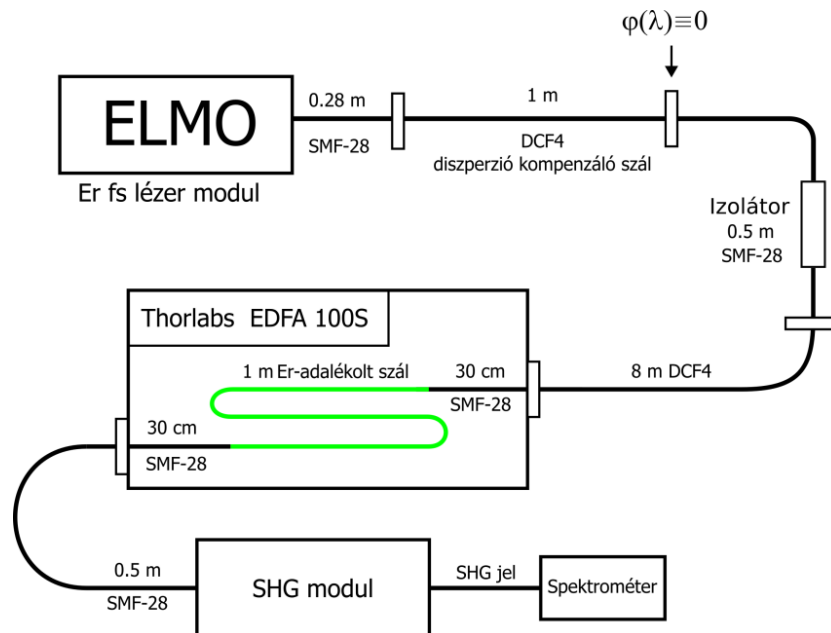
Az optikai szálakból felépített szub-ps-os, impulzusüzemű lézerek egyre jelentősebb szerepet játszanak a nemlineáris mikroszkópiai alkalmazásokban [1]. Az optikai szállézeresek előnyös tulajdonságai közül érdemes megemlíteni tipikusan kisebb méretüket, a precíziós, nagyköltségű mechanika és vízűtés hiányát, kisebb elektromos fogyasztásukat, vagy teljesen szálintegrált változataikban érzéketlenségüket külső behatásokra, például mechanikai rezgésre. Hátrányuk, hogy hőmérsékleti stabilitásuk csak egy lényegesen költségesebb, bonyolultabb, polarizáció tartó szálakon alapuló technológiával biztosítható, illetve hangolhatóságuk is általában messze elmarad például a Ti-zafiron, mint erősítő közegen alapuló lézer oszcillátorokétól. Kutatócsoportunk korábban elsősorban az Yb-adalékolt optikai szálakon alapuló oszcillátorok illetve erősítők kutatás-fejlesztésével foglalkozott [1], mostani munkánkban a 1560 nm környékén, az optikai telekommunikációs tartományban működő Er-szállézeresek és erősítők fejlesztését céloztuk meg, elsősorban nemlineáris mikroszkópiai és légköri lézer radar alkalmazásokat szem előtt tartva. Célul tűztük ki (1) a 760-780 nm-es tartományban működő femtoszekundumos Ti-zafir lézerek kiváltását NAD(P)H fluoreszcencia élettartam mérésen alapuló (FLIM), a sejtek metabolikus állapotát vizsgáló alkalmazásokban [2], illetve (2) a szövetek mélyebb rétegeibe jobban behatoló, 1,7 mikron környékén működő szub-ps-os szál-oszcillátorok [3] illetve hosszabb távon Tm-erősítők fejlesztését, amelyek akár 1-1,5 mm mélységben is képesek többfotonos folyamatok révén 3D mikroszkópiás képalkotásra [4]. Ez utóbbi impulzusüzemű szállézer rendszerek jelentős szerepet játszanak 3D pásztázó légköri lézer radar alkalmazásokban, ahol ezek nem egyedi, hanem "burst", azaz impulzus-sorozat üzemmódban működnek a jobb detektálhatóság érdekében.

Lényeges eltérés az Yb- és az Er-szállézeres rendszerek között, hogy előbbi esetében az alkalmazott optikai szálak az 1030 nm körüli erősítési tartományban tipikusan normális, míg az Er-szállézeres rendszerekben 1560 nm körül anomális diszperzióval rendelkeznek. Cikkünkben egy olyan Er-szállézeres erősítő rendszer fejlesztésével kapcsolatos eredményeinket mutatjuk be, amelyhez egy MenloSystems GmbH (Németország) által gyártott „ELMO” oszcillátort, valamint egy Thorlabs Inc. (N.J., USA) által gyártott Er-szálerősítőt használtunk. A szálerősítő elé és mögé behegesztett, különböző diszperziós tulajdonságokkal rendelkező optikai szálak alkalmazásával, valamint a szálerősítő teljesítményének optimalizálásával állítottunk elő olyan erősített lézerimpulzusokat 1560 nm, illetve 1680 nm környékén, amelyek előbbi esetben egy másodharmonikus (SHG) egység segítségével állít elő 100 fs-os lézerimpulzusokat 780 nm környékén, míg utóbbi esetben megfelelő magimpulzusokat egy 1,7 mikronon működő Tm-erősítő számára. A következőkben a rendszer modellezésével és kísérletes munkáinkkal kapcsolatos eredményeinket foglaljuk össze.

Kísérleti elrendezés

A másodharmonikus keltéshez optimalizált kísérleti elrendezés blokkvázlata az 1. ábrán látható. Az ELMO Er-száloszcillátor 1580 nm-es középhullámhosszon állít elő 50 MHz-es ismétlődési frekvencián $P_{\text{átl}} = 5$ mW átlagteljesítménnyel ultrarövid lézerimpulzusokat, amelyek időbeli hossza megfelelő hosszúságú diszperziókompenzáló szál alkalmazásával 150 fs-nál rövidebbre kompresszálható. Modellszámításainknál illetve kísérleteinknél abból indultunk ki, hogy az 1 m hosszú, DCF4 típusú diszperzió kompenzáló szálal követően közel transzformáció limitált impulzusokkal rendelkezünk, vagyis a spektrális fázis értéke azonosan egyenlő nullával a lézerspektrum teljes tartományán. Az Er-oszcillátor mögött annak védelme érdekében egy izolátort

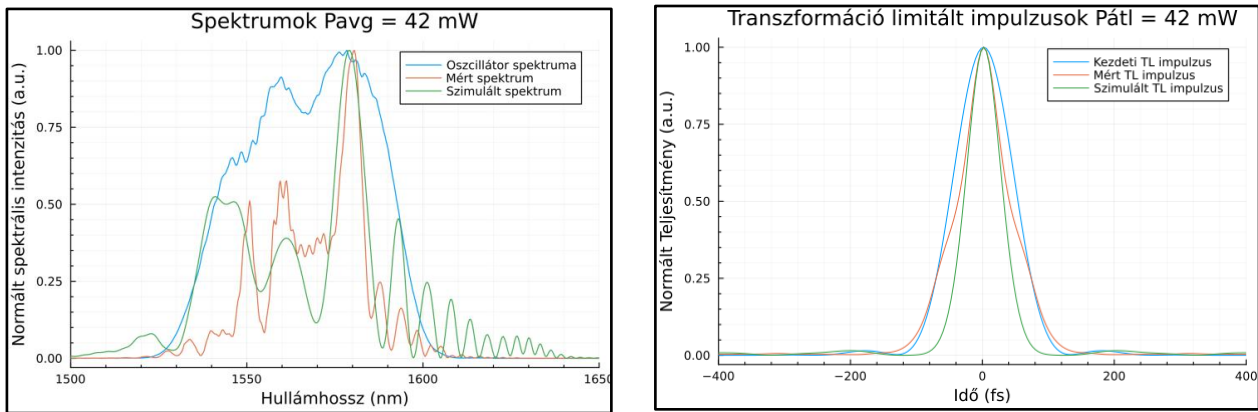
helyeztünk el úgy, hogy az abba vezető optikai szálak hosszát a kísérletileg megvalósítható legrövidebb értékre állítottuk be egy Fitel S177 típusú (Furukawa Electric, Japán) szálhegesztő alkalmazásával. A Thorlabs EDFA 100S Er-szálerősítőben alkalmazott optikai szálak típusát és hosszát megkaptuk a gyártótól, ezeket használtunk modellszámításainknál. Az 1580 nm alatt normális diszperzióval rendelkező DCF4 diszperziókompenzáló szál hosszát az Er-szálerősítő előtt 8 m-re választottuk, míg az erősítőből kilépő, erősített lézerimpulzusokat a másodharmonikus keltő egységig szállító, anomális diszperzióval rendelkező SMF-28 szál hosszát 0,5 m-re. A másodharmonikus keltő egység részletes ismertetésétől most terjedelmi okok miatt eltekintünk.



1. ábra: Az Er-szálerősítő rendszer másodharmonikus keltéshez optimalizált blokkvázlata DCF4 diszperziókompenzáló szálak és SMF-28 anomális diszperziójú optikai szálak alkalmazása esetén.

Szimulációs eredmények összevetése a mérési adatokkal

Modellszámításainknál első lépésként Er-száloszcillátorunk spektrumát mértük le egy Q8384 típusú optikai spektrum analízátorral (Advantest, USA), amelynek detektálási tartománya 1700 nm-ig tart. A hullámhossz szerinti $I(\lambda)$ spektrális intenzitás spektrumot először átalakítottuk körfrekvencia szerinti $I(\omega)$ spektrummá, amelyet megfelelő zajsűrűk és simítások alkalmazása után használtuk szimulációinkhoz, amelyhez egy korábban csoportunk által kifejlesztett, ú.n. „split-step Fourier”-módszeren alapuló Matlabban megírt kódot használtunk a bemeneti paraméterek megfelelő megválasztása illetve a szoftver szükséges továbbfejlesztése után: számításainknál a másodrendű diszperzió és a Kerr-nemlinearitás mellett figyelembe vettük a harmadrendű diszperzió, valamint a „self-steepening” és stimulált Raman szórás hatásait is. A 2. ábrán egy ilyen, 42 mW átlagteljesítményű Er-erősítő kimethoz tartozó mért és szimulált spektrumot mutatunk be az eredeti, erősítőbe belépő Er-oszcillátor spektrum feltüntetésével.



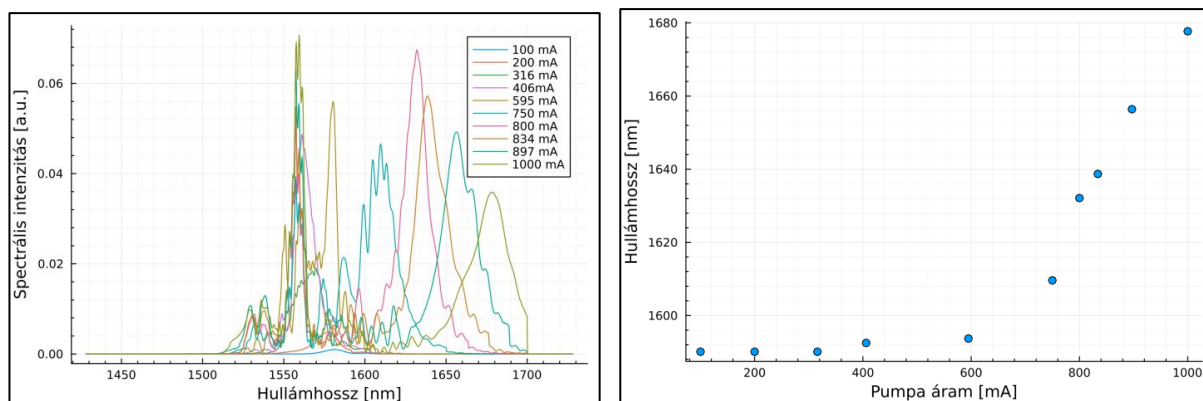
2. ábra: Bal oldalon az Er-szálerősítő bemenetén mért Er-oszcillátor spektruma (kék), az SHG egységhez érkező, ~ 0.84 nJ energiájú szoliton-impulzusok mért spektruma (piros), valamint az ehhez az impulzusenergiához tartozó modelleredmény (zöld). Jobb oldalon az egyes spektrumokhoz tartozó időbeli alak, transzformáció limitált lézerimpulzusokat feltételezve.

A szimulációs és mérési eredmények részletes bemutatásától most terjedelmi korlátok miatt eltekintünk, csak az alapvető fizikai folyamatok bemutatására és a másodharmonikus teljesítmény optimalizálása szempontjából jelentős paraméterek ismertetésére törekszünk. Kiindulási állapotban a Er-lézeroszillátorból kilépő lézerimpulzusok alakját alapvetően a mögötte lévő optikai szálak diszperziója határozza meg, amik az impulzusok időbeli széthúzását vagy összenyomását eredményezik a csörp és diszperzió relatív előjelének függvényében. Kísérletünkben az erősítő előtt lévő 8 m hosszú DCF4 szál pozitív csörpöt eredményez, vagyis a hosszabb hullámhosszú komponensek haladnak elől időben, míg a rövidebb hullámhosszúak hátul, ami az Er-erősítő belsejében sem változik lényegesen. Az erősítőtől kilépő, erősített lézerimpulzusok már az eredetnél nagyobb, kb. nyolcszoros impulzusenergiákkal rendelkeznek, amelyek az anómális diszperziójú SMF-28 típusú szálban kompresszálódnak, csúcsintenzitásuk folyamatosan nő, ahogy az optikai szálban továbbhaladnak mindaddig, amíg a Kerr-nemlinearitás és a negatív diszperzió kölcsönhatásaként szolitonszerű impulzusok elő nem állnak az optikai szálban, praktikusán az SMF-28 szál végén, közvetlenül a másodharmonikus keltő egység bemenetén. Esetünkben ezt a feltételt a EDFA 100S Er-erősítő áramának, valamint az SMF-28 szál hosszának megfelelő megválasztásával tudjuk elérni: 42 mW erősített átlagteljesítmény és 0,5 m szálhossz mellett nagyságrendileg 1,5 mW átlagteljesítményű másodharmonikus jelet tudtunk előállítani 780 nm-en. Fontos megjegyeznünk, hogy a szoliton impulzusokat adott sáv szélesség korlátok (pl. a BBO kristály fázisillesztési sáv szélessége) és adott szálparaméterek (Kerr-nemlinearitás nagysága, módus-átmérő, anomális diszperzió értéke) mellett csak viszonylag szűk energia tartományban lehet előállítani [5], ezért másodharmonikus jelünk nagyságrendi növeléséhez az Er-erősítő erősítésének növelése mellett az optikai szálparaméterek, az alkalmazott optikai szálak fizikai jellemzőinek megváltoztatása is szükséges, például nagy módus-átmérőjű, nem adalékolt (LMA) szálak, vagy légmagos fotonikus kristály szálak (HC-PCF) alkalmazásával, amelyek viszont további technológiai fejlesztéseket igényelnek például az alkalmazott szálhegesztési technológiáknál vagy a különböző optikai szálak közötti módusillesztés területén.

Er-szállézer hangolása stimulált Raman szórás alkalmazásával

Az Er-szálerősítő kimenetén létrejövő szolitonszerű impulzusok hullámhosszának folyamatos növelését az optikai szálakban stimulált Raman szórás alkalmazásával tudjuk elérni úgy, hogy az alkalmazott, anomális diszperzióval rendelkező szál hosszát folyamatosan növeljük [5]. Ezt a folyamatot egyszerűen úgy tudjuk elképzelni, hogy a lézerimpulzusok foton-energiája folyamatosan csökken az optikai szálban fellépő molekuláris rezgésekkel történő kölcsönhatás következtében, így a lézerimpulzus középhullámhossza a terjedés során folyamatosan nő. Vonatkozó kísérletünkben annyit módosítottunk az 1. ábrán látható elrendezésen, hogy az Er-erősítő után egy kb. 1 m hosszú

SMF-28 szálát tettünk, és folyamatosan növeltük lézerezőtünkben az erősítést, így szoliton impulzusaink egyre kisebb távolságokra álltak elő az erősítő kimenetéhez képest és így egyre nagyobb távolságokat tettek meg az SMF-28 szálban. Méréseinknél korlátot jelentett az a tény, hogy a mérésnél használt spektrum-analizátorunk felső mérési határa 1700 nm volt. A 3. ábra bal oldalán a különböző Er-erősítő áramokhoz tartozó, Raman szórás következtében folyamatosan a hosszabb hullámhosszak felé eltolódó lézer kimeneti spektrumot, jobb oldalon pedig a mért spektrális intenzitás csúcsokhoz tartozó hullámhossz értékekre vonatkozó grafikont látjuk. Fontos megjegyeznünk, hogy az 1580 nm feletti, anomális diszperziós tartományban terjedő Raman lézerimpulzusok energiája a teljes impulzusenergia 50-70%-át jelentik, és hogy a lézer spektrumnak ez a része megfelelő spektrális szűrőkkel leválasztható, illetve kompresszálható!



3. ábra: Bal oldalon az Er-szálerősítő kimeneti spektrumai láthatóak, amelyen megfigyelhető a Raman eltolódás. A jobb oldalon az 1580 nm-től jobbra eső spektrális intenzitás csúcsokhoz tartozó hullámhossz értékek láthatóak az erősítő pumpa áramának függvényében.

Felhasznált irodalom

- [1] Á. Krolopp, A. Csákányi, D. Haluszka, D. Csáti, A. Kolonics, N. Wikonkál, and R. Szipoős, Handheld nonlinear microscope system comprising a 2 MHz repetition rate, mode-locked Yb-fiber laser for in vivo biomedical imaging. Biomed. Opt. Express 7, 3531 (2016). <https://doi.org/10.1364/BOE.7.003531>
- [2] A. Kolonics, T. Kawamura, R. Szipoős, Z. Radák. Combined NAD(P)H and lipofuscin FLIM revealed the development of metabolic syndrome in the liver of epigenetically altered rats. Proc. SPIE 12849, 1284909-917 (2024). <https://doi.org/10.1117/12.3005632>
- [3] Z.W. Lin, J.X. Chen, T.J. Li, Z.Y. Zhan, M. Liu, C. Li, A.P. Luo, P. Zhou, W.C. Xu and Y.C. Luo. 1.7 μm figure-9 Tm-doped ultrafast fiber laser. Opt. Express 30(18), 32347 (2022). <https://doi.org/10.1364/OE.468769>
- [4] Choe, K., Hontani, Y., Wang, T. et al. Intravital three-photon microscopy allows visualization over the entire depth of mouse lymph nodes. Nat Immunol 23, 330–340 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41590-021-01101-1>
- [5] Nonlinear fiber optics. GP Agrawal. Academic Press, 2007.

Köszönetnyilvánítás

A TKP2021-NVA-04 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.