

## ZÁRÓJELENTÉS

OTKA azonosító: **49296**

Pályázat címe: **Ultrarövid fényimpulzusok terjedésének vizsgálata fotonikus kristály szálakban és szálerősítőkben**

Vezető kutató: **Szipőcs Róbert, PhD**

Pályázat időtartama: **2005.01.01.- 2008.06.30.**

OTKA pályázatunk célja ultrarövid lézerimpulzusok fotonikus kristály szerkezetű optikai szálakban (PCF) történő terjedésének vizsgálata volt számítógépes szimuláción és ennek eredményeit ellenőrző méréseken keresztül. Három fő témával foglalkoztunk, amelyek fontosabb eredményei a következők voltak:

### **1. téma: Impulzuskompresszió fotonikus kristály szerkezetű optikai szálakban**

Az optikai impulzusok terjedését leíró szimulációs programot készítettünk, mely tartalmazza a szálban fellépő nemlineáris hatások közül az önfázis moduláció leírását, kezelését az időtartományban és a diszperzió hatását a frekvencia tartományban. Különböző, kommercionálisan elérhető, kismagátmérőjű fotonikus kristály szálak esetében az elkészített program segítségével kiválasztottuk azokat az optikai szálakat, melynek segítségével a legkisebb impulzus energiák mellett a legjobb impulzuskompresszió megvalósítható.

Megvizsgáltuk, hogy milyen hatással van a diszperziós előkompenzálás (pre-csörp) a kimeneti spektrumra, impulzusalakra. A kompresszált impulzusokat időbeli félérték szélességük és minőségük alapján rangsoroltuk.

A számolások alapján kapott optimális csörp paraméterek felhasználásával méréseket végeztünk, majd a számolásokat tovább finomítottuk, magasabb rendű nemlineáris tagokat figyelembe véve, amelyek a 10 fs alatti impulzusok terjedésénél jelentősek lehetnek. Megterveztük és megépítettük az optimálisnak gondolt elő- és utókompenzáló diszperziós egységeket.

12 fs-os kompresszált lézerimpulzusokat állítottunk elő kisenergájú ( $E < 1$  nJ) femtoszekundumos lézeroszillátorok és kismagátmérőjű fotonikus kristály szerkezetű optikai szálak felhasználásával. Elméleti számításaink azt mutatták, hogy akár 6 fs-nál rövidebb fényimpulzusok előállítására is lehetséges ilyen kis impulzusenergiák esetén.

Szimulációs programunk segítségével számításokat végeztünk, hogy milyen impulzus energiák mellett lehetséges pikoszekundumos (pl. optikai szálban erősített lézerdiódák) kompresszálása a szub-100-fs-os időtartományba.

A fenti eredményeket az alábbi közleményekben mutattuk be részletesen:

1. Várallyay Z, Fekete J, Bányász Á, Szipőcs R; Optimizing input and output chirps up to the third order for sub-nanojoule, ultra-short pulse compression in small core area PCF; Appl. Phys. B **B86**, 567-572 (2007)
2. Várallyay Z, Fekete J, Bányász Á, Szipőcs R: Sub-nanojoule pulse compression in small core area photonic crystal fibers below the zero dispersion wavelength, In: *Trends in Optics and Photonics (TOPS), Vol. 98, Advanced Solid State Photonics, Proceedings Volume* (Optical Society of America, Washington, 2005), pp. 571-576, 2005

3. Várallyay Z, Fekete J, Bányász Á, Szipőcs R: Pulse compression with highly nonlinear photonic crystal fibers by optimization of input and output chirp parameters up to the third-order, In: *Proceedings of Optical Amplifiers and Their Applications, 7-10 August 2005, Budapest, Hungary*, (Optical Society of America, Washington, 2005, ISBN 1-55752-790-3), Paper ME6, 2005

## **2. téma: Femtoszekundumos impulzusok alakhú átvitele nagy magátmérőjű fotonikus kristály szerkezetű optikai szálakban.**

Szimulációs programunk segítségével számításokat végeztünk, hogy milyen impulzusparaméterek (energia, impulzushossz) mellett lehetséges az impulzusok alakhú átvitele. Vizsgálataink során ultrarövid lézerimpulzusok terjedését modelleztük és mértük nagy magátmérővel rendelkező fotonikus kristály optikai szálakban a diszperzió és az esetleges nemlineáris hatások pontos figyelembevételével úgy, hogy a terjedés után a diszperzió kompenzálás könnyen, kis helyen megoldható legyen. Szimulációs eredményeinket mérésekkel (spektrum, autokorrelációs függvények) ellenőriztük.

Kísérleteket végeztünk, hogy milyen impulzus és szálparaméterek mellett lehetséges nagyenergiájú ( $E > 1-10$  nJ) impulzusok alakhú átvitele fotonikus kristály szerkezetű, légmagos optikai szálakon.

A fentieket alkalmaztuk interdiszciplináris alap kutatásokban, mint pl. egy neuronhálózatok vizsgálatára alkalmas kétfoton abszorpciós fluoreszcencia mikroszkóp megépítésénél. Kimutattuk, hogy lehetséges a mikroszkópban lévő optikai elemek pozitív anyagi diszperziójának kompenzálása megfelelően megválasztott, üreges szerkezetű (pl. HC 800-2 típusú) fotonikus kristály szerkezetű optikai szálak alkalmazásával.

Nagyenergiájú ( $E \sim 200$  nJ) lézerimpulzusok terjedését vizsgáltuk LMA (Large Mode Area) szerkezetű fotonikus kristály szerkezetű optikai szálakban és egymódusú optikai szálakban 800 nm körül. Modelleredményeink és előzetes kísérleti eredményeink alapján a szál végén előállított önfázis modulált spektrum akár 10 fs-nál rövidebb impulzusok előállítását is lehetővé teszi.

Felhasználva az egy- és kétdimenziós fotonikus kristály szerkezetek – azaz az optikai vékonyréteg dielektrikum szerkezetek és a hengersizmetrikus Bragg szerkezetű optikai szálak - közötti analógiát, javasoltuk, hogy az 1D vékonyréteg dielektrikum lézertükrökkel célszerű közel sírlódó beesésben használni, mert ezáltal a tükrök sáv szélessége jelentősen növelhető, a veszteségek és a diszperzió pedig csökkenthető. A jól ismert negyedhullámú feltételt a kétdimenziós esetre alkalmazva pedig szivárgó módus mentes Bragg üveg- illetve légmagos optikai szálakat sikerült terveznünk. Az egydimenziós modellből kiindulva kétdimenziós véges elem módszer alkalmazásával sikerült olyan üreges, fotonikus kristály szerkezetű optikai szálakat (Hollow Core Photonic Crystal Fiber) terveznünk, melyek alkalmasak nagyenergiájú ( $E > 10$  nJ) lézerimpulzusok diszperziójának tökéletes kompenzálására másod – és harmadrendben, 10-100 nm sáv szélességen, 800 nm vagy 1 mikron körül. Elméleti számításaink azt mutatják, hogy a sáv szélesség akár 100-200 nm-re is megnövelhető.

A 2. téma kapcsán bemutatott eredményeket az alábbi közleményekben mutattuk be részletesen:

4. Dombi P, Antal P, Fekete J, Szipőcs R, Várallyay Z; Chirped-pulse supercontinuum generation with a long-cavity Ti:sapphire oscillator, *Appl. Phys.* **B88**, 379–384 (2007)
5. Rózsa B, Katona G, Vizi E. S, Várallyay Z, Sággy A, Valenta L, Maák P, Fekete J, Bányász Á, Szipőcs R; Random access 3D two-photon microscopy, *Appl. Optics* **46**, 1860-1865 (2007)

6. Fekete J, Várallyay Z, Szipőcs R; Design of high bandwidth one- and two-dimensional photonic bandgap dielectric structures at grazing incidence of light; *Appl Optics*; **47**, 5330-5336, 2008
7. Várallyay Z, Saitoh K, Fekete J, Kakihara K, Koshihara M, Szipőcs R; Reversed dispersion slope photonic bandgap fibers for broadband dispersion control in femtosecond fiber lasers; *Optics Express*; **16**, 15603-15616, 2008
8. Rózsa B, Vizi E S, Katona G, Lukács A, Várallyay Z, Sággy A, Valenta L, Maák P, Fekete J, Bányász Á, Szipőcs R: Real time 3D nonlinear microscopy, In: *Trends in Optics and Photonics (TOPS), Vol. 98, Advanced Solid State Photonics, Proceedings Volume* (Optical Society of America, Washington, 2005), pp. 858-863, 2005
9. P.5. Dombi P., Antal P., Szipőcs R., Várallyay Z, Fekete J; Chirped-pulse supercontinuum generation with a 200-nJ Ti:sapphire oscillator, *CLEO/Europe-IQEC 2007*, 17-22 June 2007, München, Germany, Paper CF-19-MON, (2007)
10. Fekete J, Várallyay Z, Szipőcs R; Design of leaking mode free hollow-core photonic bandgap fibers; In: *Optical Fiber Communication Conference*; OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, 2008), paper JWA4, 2008
11. Várallyay Z, Fekete J, Szipőcs R; Higher-order mode photonic bandgap fibers with reversed dispersion slope, In: *Optical Fiber Communication Conference*; OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, 2008), paper JWA8, 2008
12. Várallyay Z, Fekete J, Szipőcs R; Higher order mode photonic bandgap fibers for dispersion control; In: *Conference of Lasers and Electro-Optics*; OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, 2008), paper JThA48, 2008

### 3. téma Femtoszekundumos impulzusok erősítése adalékolt optikai szálakban.

Szimulációs programunkat alkalmassá tettük, hogy az adalékolt optikai szálakban erősödő impulzusok terjedését modellezzük. Számításainkat összehasonlítottuk vonatkozó mérési eredményeinkkel.

Modellszámításokat végeztünk LMA Er-adalékolt fotonikus kristály szálakban történő erősítésre vonatkozóan, melyet az USA-beli OFS-nél (korábban AT&T Bell Labs) kísérletileg is ellenőriztek.

A Furukawa Electric Technológia Intézet Kft-vel és az R&D Ultrafast Lasers Kft-vel együttműködésben a pozitív diszperziós tartományban működő módusszinkronizált szálléert építettünk, amelynek 10 ps-os erősen csörpölt kimenetét 200 fs-ra sikerült kompresszálnunk.

Az előbb említett Yb oszcillátor az mögé R&D Ultrafast Lasers Kft-vel együttműködésben kétfokozatú Yb alapú CPA szálerősítőt építettünk, melyben ~0.1 nJ-os, néhány ps-os lézerimpulzusokat erősítettünk fel ~20 nJ-osra, majd kísérletet tettünk a széthúzott impulzusok kompresszáálására rácsos kompresszorral illetve HC1060-as típusú üreges fotonikus kristály szerkezetű optikai szállal.

A 3. téma kapcsán bemutatott eredményeket az alábbi közleményekben mutattuk be részletesen:

13. C. Jasapara, M. J. Andrejco, J. W. Nicholson, A. D. Yablon, and Z. Várallyay, Simultaneous amplification and compression of picosecond pulses to 65-kW peak power without pulse break-up in Er fiber, *Optics Express* **15**, 17494-17501 (2007).
14. Fekete J, Cserteg A, Szipőcs R; All-fiber, all-normal dispersion ytterbium ring oscillator; *Laser Physics Letters*; **6**, 49-53, 2009

A fenti közlemények ingyen letölthetők a [www.szipoecs.com](http://www.szipoecs.com) weboldalról.

A továbbiakban a 2. és 3. téma kapcsán szeretnénk részletesebb szakmai beszámolót adni azokról a munkákról, amelyekről még nincs referált folyóiratbeli elfogadott közleményünk.

### Üreges fotonikus kristály szálak tartalmazó valós idejű 3D mikroszkóp

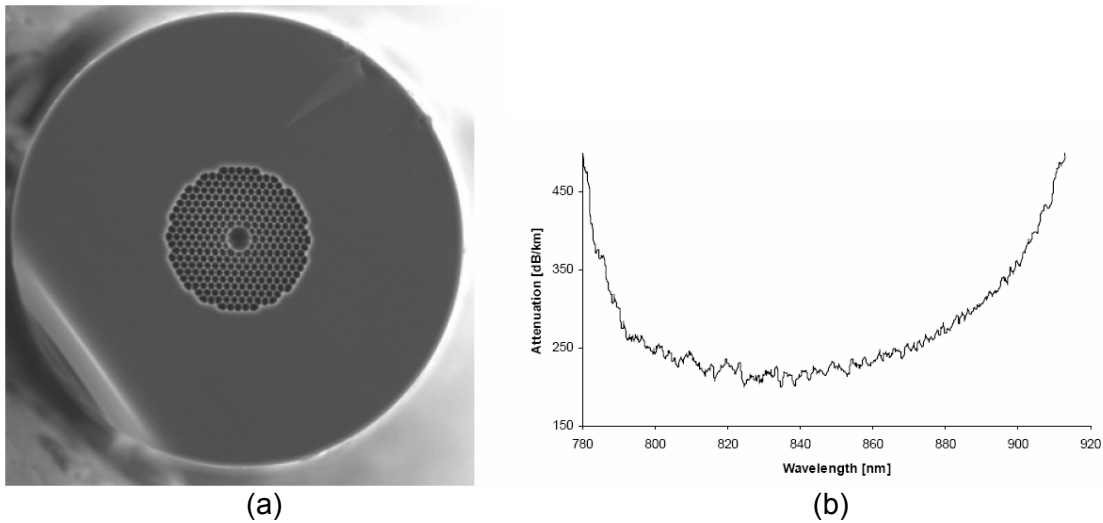
Az MTA KOKI-val kifejlesztett valós idejű 3D kétfoton fluoreszcencia mikroszkópunk működése, a vizsgálni kívánt pontok megcímzése azon alapul, hogy femtoszekundumos lézerünk fényimpulzusait a lehetőleg időbeli és térbeli torzulás nélkül juttassuk el a vizsgálni kívánt képpontba egy optikai szálakból álló szálköteg segítségével. A általunk korábban kísérletileg megvalósított koncepcióban (ld. még, B. Rózsa, G. Katona, E. S. Vizi, A. Lukács, Z. Várallyay, A. Sággy, L. Valenta, P. Maák, J. Fekete, Á. Bányász, R. Szipőcs: "Real time 3D two-photon microscopy for neurology", Technical Digest of Biomedical Optics Topical Meeting, ISBN 1-55752-807-1, Paper Tu167, © Optical Society of America (2006)) még hagyományos, kb. 6 mikron magátmérőjű, kvarcüveg maggal rendelkező optikai szálakat alkalmaztunk, melyek speciális, ún. CPA technikát igényeltek az impulzusok nemlineáris hatásoktól mentes átviteléhez. Ez a gyakorlatban szükségessé tette egy négyprizmás, Proctor&Wise féle kompresszor megtervezését, megépítését, valamint egy megfelelően nagy pozitív anyagi diszperzióval rendelkező osztókocka alkalmazását a leképező rendszerünkben. A mikroszkóp rendszer komplexitását jelentősen csökkentené, ha olyan optikai szálakat sikerülne alkalmaznunk, melyek 1.) nem-lineáris hatásoktól mentesen tudnák továbbítani a femtoszekundumos fényimpulzusokat, illetve 2.) a szálak megfelelő mértékű anomális diszperzióval rendelkeznének ahhoz, hogy megfelelő beállítás esetén a mintákban kapnánk a legrövidebb fényimpulzusokat. Ilyen optikai szálak tervezésével kapcsolatos munkánkat ismertettük a 2. feladat kapcsán.

A fotonikus kristály szálak több fajtája ismert, melyek lehetőséget nyújtanak a femtoszekundumos lézerimpulzusok alakhű átvitelére. A projekt során először megvizsgáltuk, hogy a nagymagátmérőjű (LMA, Large Mode Area) fotonikus kristály optikai szálak alkalmasak-e erre a feladatra. Megállapítottuk, hogy kb. 100 mW átlagteljesítményig ezek a szálak valóban alkalmasak a lézerimpulzusok nemlineáris hatásoktól mentes továbbítására, viszont a szálak jelentős pozitív anyagi diszperzióját mindenképpen kompenzálni kell az alakhű átvitel érdekében (ld. még Rózsa B, Vizi E S, Katona G, Lukács A, Várallyay Z, Sággy A, Valenta L, Maák P, Fekete J, Bányász Á, Szipőcs R: Real time 3D nonlinear microscopy, In: *Trends in Optics and Photonics (TOPS), Vol. 98, Advanced Solid State Photonics, Proceedings Volume* (Optical Society of America, Washington, 2005), pp. 858-863, 2005).

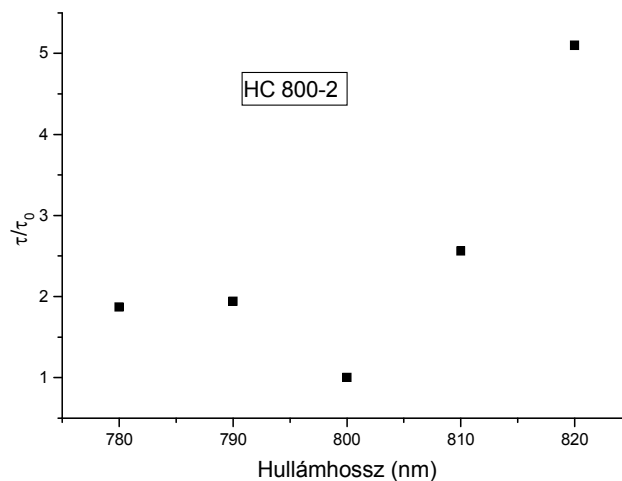
A most bemutatásra kerülő kísérleti vizsgálataink tárgyát a légmagos fotonikus kristály szerkezetű optikai szálak képezték (hollow core photonic bandgap fiber, ld. még 1. ábra), melyekben a fény jelentős része (kb. 95%) levegőben vagy vákuumban terjed, így a terjedés során jelentősen lecsökkennek a nemlineáris hatások. Hangolható Ti-zafír lézerünk segítségével lemértük ilyen, kommercionálisan beszerezhető optikai szálak diszperziós tulajdonságait és megállapítottuk, hogy 1.) legalább 1 nJ impulzusenergiáig biztosítható kb. 100 fs-os lézerimpulzusok nemlineáris hatásoktól mentes átvitele, 2.) a lézer hullámhosszának megfelelő megválasztásával biztosítható az alakhű átvitel, illetve a mikroszkóp elemek anyagi diszperziójának kompenzálása.

Megállapítottuk, hogy kb. 1 m hosszú HC 800-as típusú optikai szál alkalmazása esetén lehetséges a femtoszekundumos lézerimpulzusok alakhű átvitele és a mikroszkóp objektív kb.  $GDD \approx 2000 \text{ fs}^2$  értékű pozitív diszperziójának kompenzálása 800 nm környékén (ld. 2. ábra). Megjegyezzük, hogy a mérésekhez FemtoRose 100 TUN hangolható Ti-zafír

lézerünket használtuk, melynek tipikus spektrális sávzélessége 5 nm volt. (Ennél nagyobb sávzélességek esetén a fentiekől eltérő eredményeket kaphatunk.)

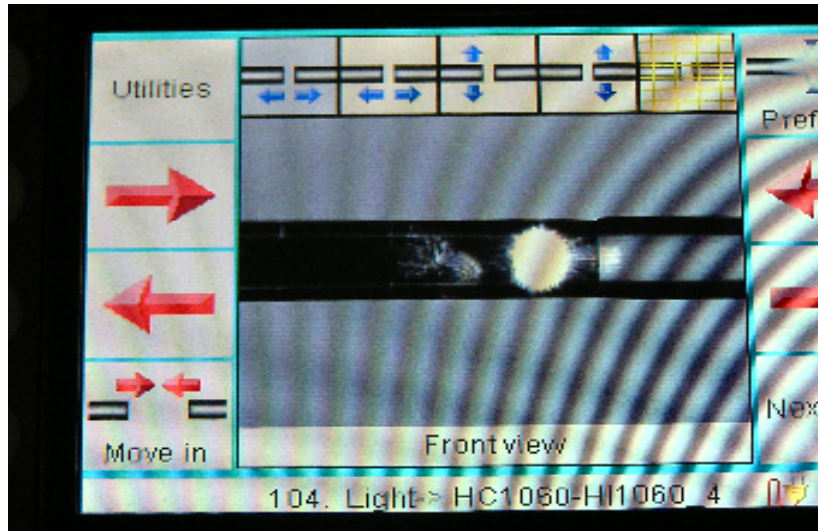


**1. ábra** A méréseinkhez használt üreges fotonikus kristály szerkeztű optikai szál (a) elektronmikroszkópos képe és (b) átviteli függvénye



**2. ábra** A mikroszkóp objektív kimenetén mért relatív impulzushossz kb. 1 m hosszú HC 800-2 típusú (Crystal Fibre) üreges fotonikus kristály szál alkalmazása esetén.

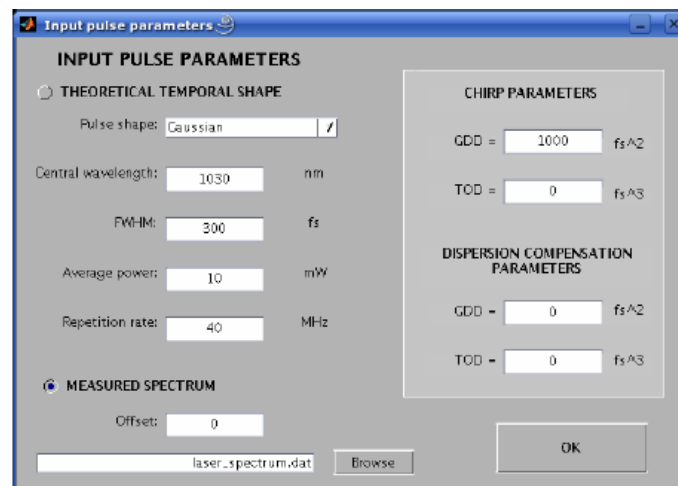
Fontos technológiai problémaként jelentkezett viszont, hogy az üreges fotonikus kristály szálak a vágást követő néhány órán belül elvesztették jó fényvezető képességüket, mert a szálban lévő kis kapillárisok a levegőből lekondenzált vízzel töltődtek fel. Ezt a szálak végeinek lezárásával oldottuk meg szálhegesztő készülékünk segítségével (ld. 3. ábra). Mivel a fotonikus kristály szálak végére a 3D mikroszkópunkban korábban is használt egymódusú optikai szálaknak megfelelő optikai szálakat hegesztettünk, így a most bemutatott technológia alkalmazása esetén sincs szükség a korábban alkalmazott optikai leképező rendszer áttervezésére.



**3. ábra** Az üreges fotonikus kristály szál végeinek lezárása szálhegesztő készülék segítségével. Balra: HC800-2-es fotonikus kristály szál, jobbra: egymódusú szál.

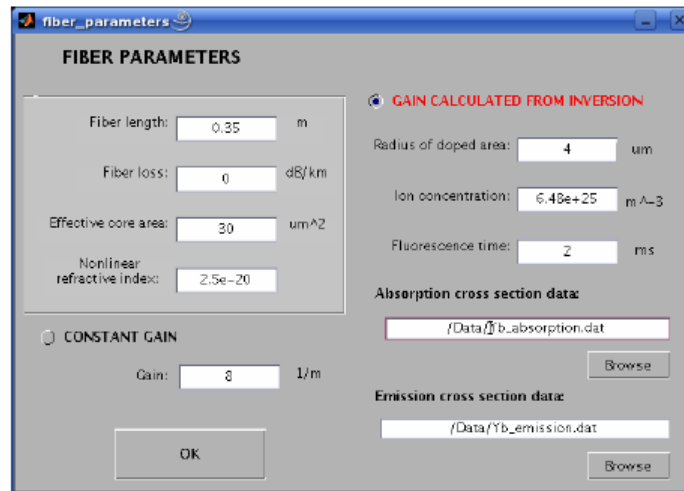
Femtosekundumos impulzusok erősítése kétfokozatú, Yb adalékolt optikai szálerősítőben

Az adalékolt optikai szálban történő impulzusterjedés modellezésére MatLab-ban írt számítógép programot készítettünk, mely jelenleg a következő fizikai jelenségek leírására, modellezésére alkalmas: erősítés adott pumpálási és jelszintek esetén, száldiszperzió és önfázismoduláció figyelembe vétele. A program bemeneti adatait egy megfelelő interface segítségével tudjuk megadni (4. ábra). A program alkalmas mind előlről, mind hátulról vagy mindkét irányból pumpált geometriák modellezésére is.



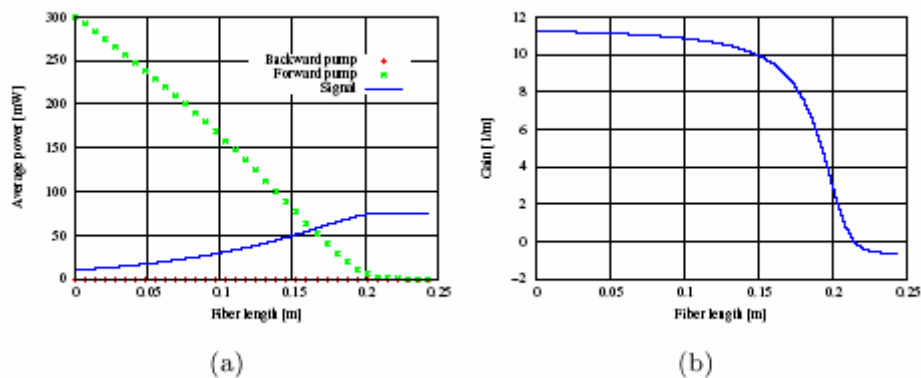
**4. ábra** A szálerősítés modellezésére írt program bemeneti paramétereinek beállítására írt interface

A számításokhoz szükséges az erősítéshez használt optikai szál fizikai paramétereinek beállítása, melyet kezdetben az irodalmi adatok alapján adtunk meg, viszont ezeket a paramétereket a pontosabb leírás érdekében módosítanunk kell a mérési eredmények alapján. A szál fizikai paramétereinek beállítása a 5. ábrán látható interface segítségével történik.



5. ábra Az adalékolt optikai szál paramétereinek beállítása.

A számítások eredményeként a 6. ábrán látható görbékhez hasonlókat kapunk eredményül, melyek segítségével meghatározzuk az optimális kísérleti paramétereket.

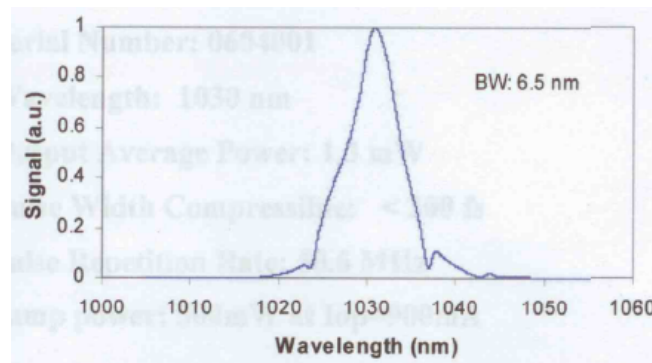


6. ábra A szálerősítő modellezésére írt program kimenete.  
 (a) A pumpáló teljesítmény csökkenése és a jeltejesítmény növekedése a szálhossz függvényében.  
 (b) Az erősítés változása az adalékolt szálhossz függvényében.

A 3. feladat megvalósításához kezdetben a FETI Kft. az USA-beli Polaronyx Inc cégtől vásárolt fs-os Yb szállézerét használtuk, így a szálerősítő megépítésével kapcsolatos kísérleti munkát már közvetlenül ennek beérkezése után meg tudtuk kezdeni. **Ennek következtében feleslegessé vált az eredetileg tervezet, Yb alapú dióda pumpált femtoszekundumos, telítődő abszorbenssel módusszinkronizált szilárdtestlézer** (nem szállézer!) megépítése, amit a szálerősítő magimpulzusainak előállítására terveztünk használni.

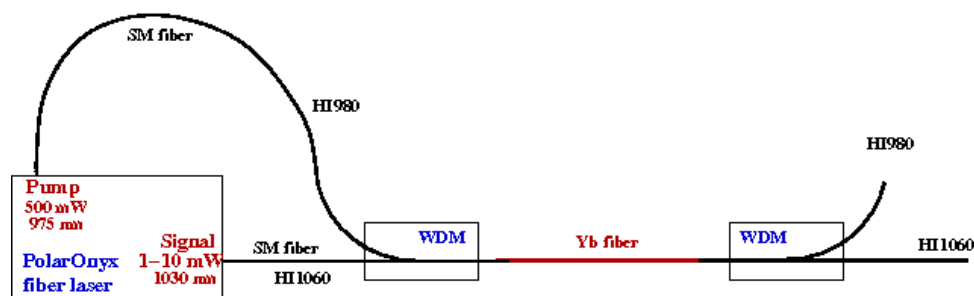
Az előbb röviden bemutatott programot használtuk szálerősítőnk modellezésére. A program jelenlegi változata alkalmas az optikai szálban fellépő nemlineáris hatások közül a önfázismoduláció modellezésére, illetve alkalmas a diszperzió és adott pumpálási geometriák (előre vagy visszafelé pumpálás) esetén az erősítés figyelembe vételére. A 7. ábrán a seed lézerként alkalmazott, Yb alapú, fs-os módusszinkronizált szállézer (típus: Mercury 2000, gyártó: PolarOnyx Inc., USA) mért spektrumát mutatjuk be, melyet a szálerősítő modellezésénél mint bemeneti paramétert használtunk. A lézer egyedi tulajdonsága, hogy a lézer pumpálási teljesítménye egy soros porton keresztül beállítható. Ezt az opciót a gyártó külön a mi kérésünkre biztosította annak érdekében, hogy szálerősítőnk optimális időbeli lefutású és optimális spektrális tulajdonságokkal rendelkező magimpulzusokkal tudjuk meghajtani. A bemutatott spektrum felvételekor a következő

beállítást alkalmaztuk:  $P_{\text{pump}} = 500 \text{ mW @ } 975 \text{ nm}$ . Ekkor a lézer  $P \sim 1\text{-}3 \text{ mW}$  átlagteljesítményt ad le  $\sim 40 \text{ MHz}$  ismétlődési frekvencián,  $1030 \text{ nm}$  környékén.



7. ábra A szálérősítő bemeneti magimpulzusainak mért spektruma

A modelleredmények alapján először egy egyfokozatú erősítőt építettünk, melynek kísérleti elrendezése a 8. ábrán látható. A szálérősítő magimpulzusait tehát a 7. ábrán bemutatott spektrummal rendelkező szállézer biztosítja, melynek kimenete egy hagyományos, egymódusú optikai szál.

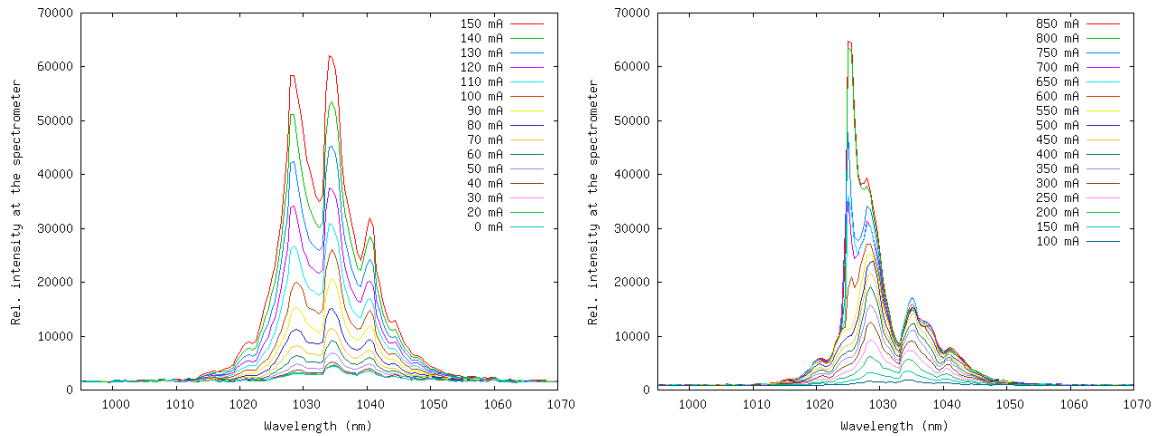


8. ábra Az egyfokozatú szálérősítő kísérleti elrendezése

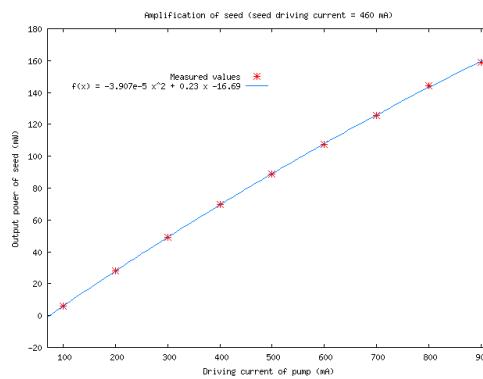
Ezt a jelet (signal) egy WDM csatoló egyik bemenetére vezetjük, míg a másik bemenetre egy  $130 \text{ mW}$  átlagteljesítményű,  $975 \text{ nm}$ -es, száloptikai kimenettel rendelkező lézertióda fényét vezetjük – ez utóbbi biztosítja az erősítő fokozat pumpáló teljesítményét (pump). Az erősítés egy Yb adalékolt egymódusú optikai szálban jön létre, melyet előlről pumpálunk.

A szálérősítő megépítése során azt tapasztaltuk, hogy a szálban bizonyos pumpálási teljesítmény fölött (kb.  $130 \text{ mW}$ ) fellép az erősített spontán emisszió (ASE). Erre mutatunk példát a 9. ábrán, ahol az erősített jel (signal) spektruma láthatóan különböző pumpálási teljesítmények (dióda áramok) esetén. Alacsony pumpálásnál a jel fokozatosan erősödik (bal oldali ábra), majd megjelenik az ASE, a spektrumban egy csúcsként  $1025 \text{ nm}$ -en (ld. jobb oldali ábra). A méréseknél a szállézer meghajtó árama  $460 \text{ mA}$  volt, ami  $1\text{-}3 \text{ mW}$  kimenő teljesítménynek felel meg. Az erősítő fokozat után a 10. ábrán látható kimeneti teljesítményeket mértük a pumpálás függvényében.



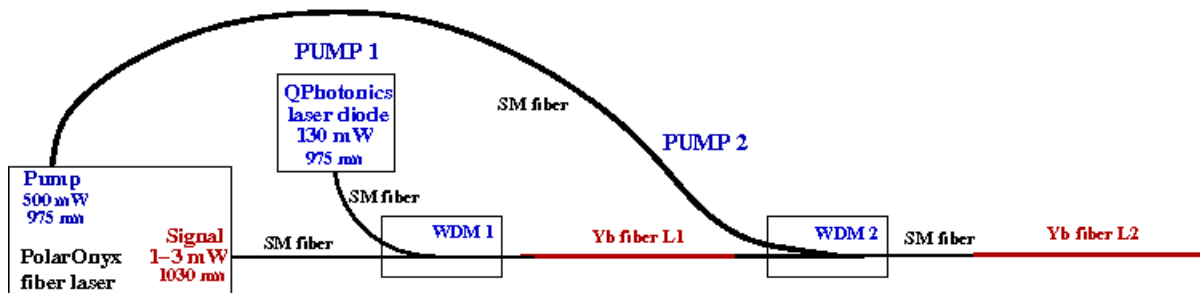


9. ábra A jel erősödése növekvő pumpa teljesítmények esetén.



10. ábra A szálerősítő kimenetén mért módusszinkronizált teljesítmény a pumpálás függvényében.

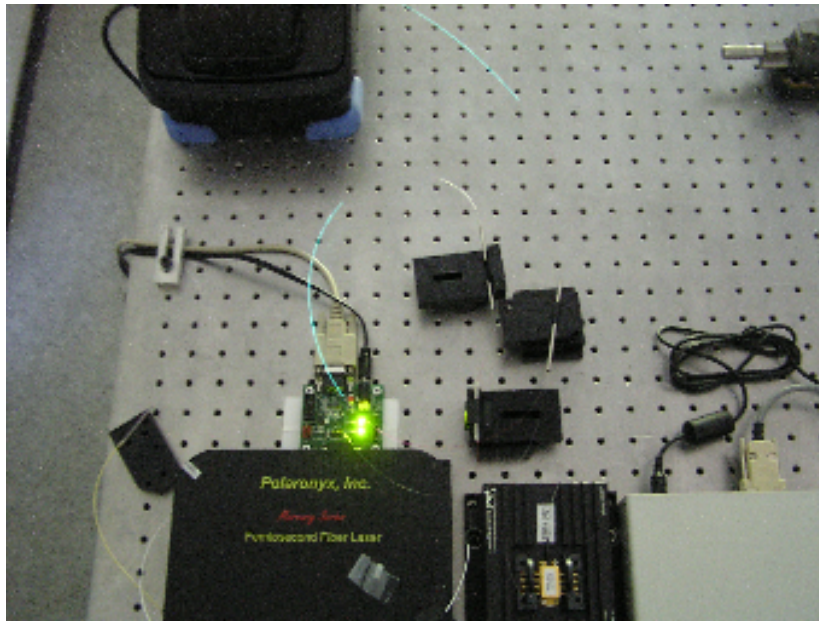
A 10. ábra alapján kiszámítható a jel erősítése a pumpáló teljesítmény függvényében. Ez azonban csak alacsony pumpálási teljesítményeknél reális, hiszen nagyobb teljesítménynél megjelenik az ASE. Ezt az erősítés görbét kell a szálerősítő szimulációs programunknak (Matlab program) visszaadnia. Az ASE elkerülése érdekében célszerűnek mutatkozott egy többfokozatú erősítő megtervezése ill. megépítése is. Az általunk megépített mérési összeállítás a 11. ábrán látható.



11. ábra A kétfokozatú femtoszekundumos Yb szálerősítő összeállítási rajza.

Az erősített spektrumok hasonlóan néznek ki, mint az egyfokozatú erősítő esetén, viszont a nagyobb jelszinteknek köszönhetően a második fokozatban sokkal később lép fel ASE: 300 mA meghajtó áramon működtetett pumpálás esetén a szálkimeneten mérhető átlagteljesítmény elérte a 80 mW-ot.

A kétfokozatú erősítőről készített fotót a 12. ábrán mutatjuk be. Az ábrán bal oldalon alul látjuk a seed oszcillátort, jobbra mellette az optikai szálkimenettel ellátott 975 nm-es pumpáló lézert. A két zöldes színű világító szál az erősítésre használt Yb adalékolt szál, illetve a foton még jól látható a signal és a pumpa fényének összecsatolására alkalmazott 2 db csatoló.



12. ábra A kétfokozatú femtoszekundumos Yb szálerősítőről készült fotó.

A femtoszekundumos impulzusok előállítás érdekében szükséges még a szálerősítő kimenetén az erősített lézerimpulzusok jelentős pozitív csörpjének kompenzálása. Erre egy, az előző pontban bemutatott, üreges szerkezetű fotonikus kristály optikai szál anomális diszperzióját terveztük felhasználni, melynek kb. 100 nm széles bandgap-je 1060 nm-en található. Kísérletet tettünk e módszer alkalmazására: kidolgoztuk a hagyományos egymódusú optikai szálak és a diszperzív HC PBG szálak összehegesztésének technológiáját (ld. még az előző fejezetet), valamint autokorrelátorunk segítségével lemértük az erősített impulzusok másodrendű autokorrelációs függvényét mind a diszperzió kompenzálás előtt és után, viszont megfelelő diszperzió kompenzálást – megfelelő hosszúságú HC PBG szál hiányában – a projekt zárásig még nem sikerült megvalósítanunk.

E kétfokozatú szálerősítő rendszerünk segítségével sikerült száloszcillátorunk 1-3 mW-os átlagteljesítményét kb. 80 mW-ra megnövelnünk. Ez a teljesítmény már alkalmas lehet kétfoton mikroszkópiai alkalmazásokra is, amennyiben sikerül a szálerősítő kimenetén kilépő, erősen csörpölt impulzusok megfelelő diszperziókompenzálása. Mind a beszámoló következő részéből kiderül, további erősítő fokozatok, vagy kétköpenyes fotonikus kristály szerkezetű optikai szálerősítők alkalmazásával a szálerősítő teljesítménye tovább növelhető.

Mint a összefoglaló bevezető részben a beszámoló elején leírtuk, a projekt során ipari partnereinkkel, a Furukawa Electric Technológia Intézet Kft-vel és az R&D Ultrafast Lasers Kft-vel együttműködésben a pozitív diszperziós tartományban működő módusszinkronizált szállézert építettünk, amelynek 10 ps-os erősen csörpölt kimenetét 200 fs-ra sikerült kompresszálnunk (ld. még *Fekete J, Cserteg A, Szipőcs R; All-fiber, all-normal dispersion*

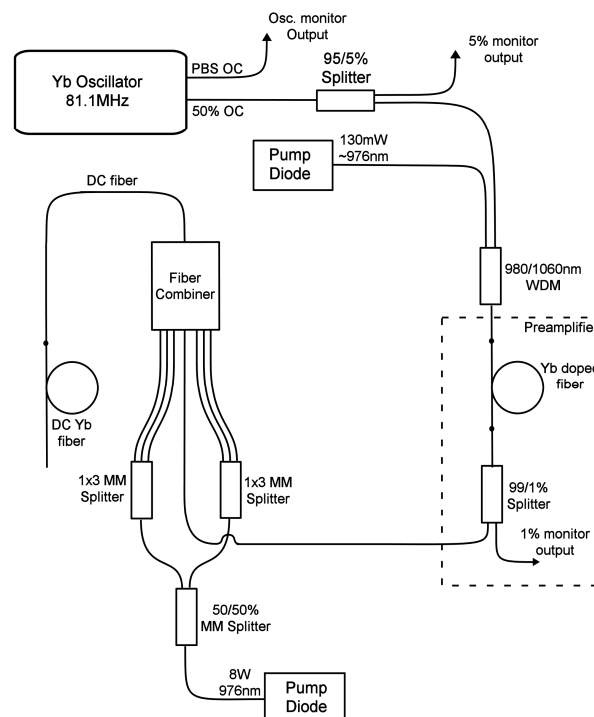
*ytterbium ring oscillator; Laser Physics Letters; 6, 49-53, 2009*). E mögé kétfokozatú Yb alapú CPA szál erősítőt építettünk, melyben  $\sim 0.1$  nJ-os, néhány ps-os lézerimpulzusokat erősítettünk fel  $\sim 20$  nJ-osra, majd kísérletet tettünk a széthúzott impulzusok kompresszáálására rácsos kompresszorral illetve HC1060-as típusú üreges fotonikus kristály szerkezetű optikai szállal. Az elkészített szállézer prototípusról és a mérési környezetről készült fénykép a 13. ábrán látható. A Yb szállézer elkészülte után további méréseinkhez ezt a lézert (nem a Polaronix cég által gyártott Yb szállézert) használtuk.



**13. ábra** A femtoszekundumos Yb szállézer prototípusáról készített fénykép. Előtérben a szálhegesztő berendezés, jobb oldalon fenn a pumpáláshoz használt 976 nm-en működő, 600 mW cw kimenő teljesítménnyel rendelkező lézerdióda illetve meghajtó egysége. Fent az impulzusok jellemzésére használt fotodetektor illetve oszcilloszkóp, valamint spektrométer.

### Kétköpenyes, Yb adalékolt fotonikus kristály szerkezetű optikai szálát tartalmazó szál erősítő

A most bemutatásra kerülő Yb erősítő különlegessége, hogy minden eleme teljesen szálintegrált, beleértve az erősítendő fényimpulzusokat adó szállézert is, mely az R&D Ultrafast Lasers Kft., az MTA SZFKI és a Furukawa Electric Kft. közös fejlesztése (ld. még 13. ábra). A teljes erősítő-összeállítás rajza a 14. ábrán látható.



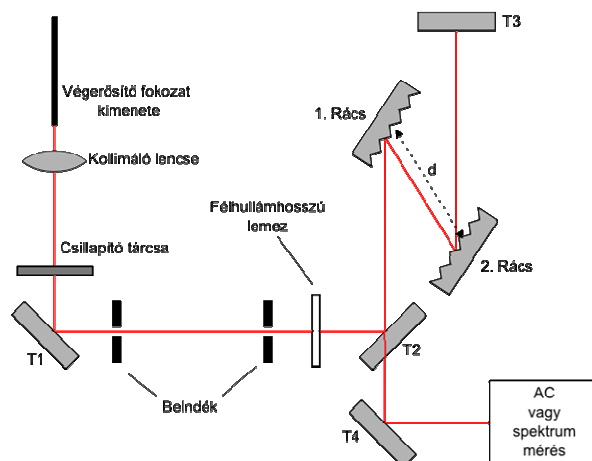
**14. ábra** Kétköpenyes, Yb adalékolt fotonikus kristály szerkezetű optikai szálát tartalmazó kétfokozatú szál erősítő

Az erősítő seed bemenetét adó szállézer egy ultrarövid impulzusú, módusszinkronizált lézer, mely egy Yb-adalékolású optikai szál (LIEKKI/Thorlabs YB1200-4/125) tartalmaz erősítő közegként. A pumpálás egy 976 nm hullámhosszú dióda fényével történik, a lézerműködés azonos irányban. A magimpulzusokat adó szállézer középhullámhossza 1032 nm, impulzusainak ismétlési frekvenciája 81,1 MHz. Két kimenete van, az egyik egy 50/50-es száloptikai osztó egyik kimenete (50% OC) a másik egy polarizációs osztó kimenete (PBS OC). Szabályosabb spektruma miatt az előbbi kimenetet használtuk az erősítő bemeneteként, míg az utóbbi a módusszinkronizáció stabilitásának ellenőrzésére szolgál. Az 50% OC kimenetre egy 95/5-ös osztó van ráhegesztve, melynek 5%-os ága a lézerműködés monitorozására (teljesítmény/spektrum mérés) szolgál, 95%-os ága pedig az előerősítő fokozat bemenetét képezi. Az előerősítő előtt azonban még egy száloptikai izolátort is elhelyeztünk, hogy az előerősítőből esetlegesen visszaszóródó fény ne juthasson vissza a lézerbe, megzavarva annak működését. Az izolátor ~40%-os veszteséget jelent.

Az előerősítőben egy ~ 20 cm hosszúságú egymódusú Yb-adalékolt szálban (LIEKKI/Thorlabs YB1200-4/125) történik a fényerősítés, a pumpálás 130 mW maximális teljesítményű, az OTKA pályázat keretében beszerzett, Q-Photonics gyártmányú, egymódusú lézerműködéssel történik. A pumpadióda kimentét a lézerműködéssel egy 980/1060 nm-re tervezett WDM kombinálja össze. Az előerősítő kimenetére egy 99/1-es osztó van ráhegesztve, melynek 1%-os kimenetén teljesítményt illetve spektrumot lehet mérni, 99%-os kimenete pedig a végerősítő fokozatba továbbítja a fényt.

A végfokozatot egy multimódusú kimenetű, 8 W maximális teljesítményű lézerműködéssel pumpáljuk. Ennek kimenete 1 db 1x2-es és 2 db 1x3-as multimódusú száloptikai osztó segítségével hatfelé van szétbontva, majd ez a hat kimenet egy fotonikus kristály szerkezetű szálkombinálóban egyesül az előerősítő kimenetével. A szálkombináló elem kimenete egy dupla köpenyes (double clad) szál, melynek magjában az erősítendő jel, belső köpenyében pedig a pumpáló fény terjed. Erre a double clad szálra van ráhegesztve egy kb. ~200 cm hosszú, szintén double clad geometriájú, Yb-adalékolt szál (LIEKKI/Thorlabs YB1200-6/125DC), melyben a végfokozat fényerősítése végbemegy. Ennek a szálnak a magjából kilépő fényt egy lencse segítségével kollimáltuk méréseink elvégzéséhez.

A lencse után szabad térben terjedő kollimált fénnyalábot tükrök segítségével vagy egy két optikai rácsból álló impulzuskompresszorra küldtük, vagy egy HC1060 típusú üreges fotonikus kristály szálra kompresszió céljából, majd az impulzuskompresszor kimenetének spektrumát és autokorrelációját mértük, az impulzusok időalakjának megállapítása végett. A rácscok 1200 vonal/mm-esek, és az 1. rácson a fény beesési szöge  $55^\circ$ , mert ekkor viszonylag nagy a diffrakciós hatások. Ennek a bulk (nem száloptikás) elemekből álló elrendezésnek a rajza a 15. ábrán látható.

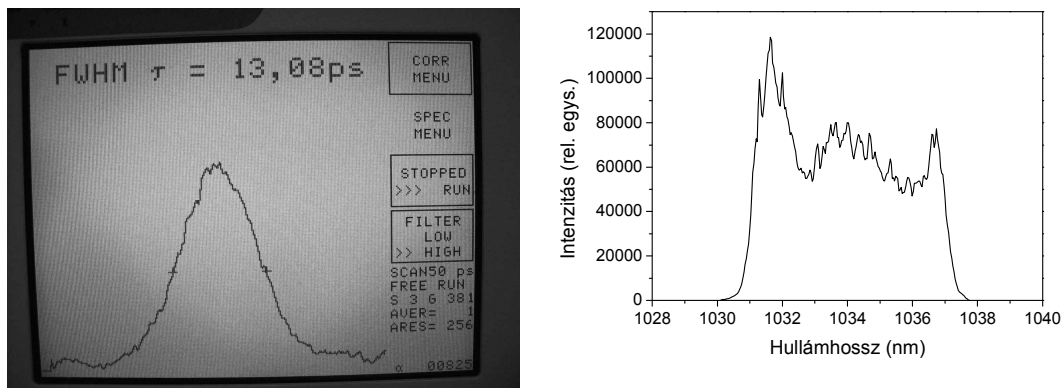


15. ábra A kompresszor sematikus rajza. T1-3: ezüsttükörök,  $d$  a rácscok fényút mentén mért távolsága.

A rácsok távolságának változtatásával a kompresszió mértéke változtatható. A legrövidebb kompresszált impulzusalakot eredményező rács távolságból következtetni lehet az eredeti impulzus csőrpijére. A spektrumot egy CVI gyártmányú kettős monokromátorral, az autokorrelációt egy APE PulseCheck autokorrelátorral mértük.

Az előerősítő kimenetén 122 mW pumpáló teljesítmény esetén az előerősítő kimenetén mért teljesítmény 58,7 mW volt. A kompresszálatlan impulzusok mért (nem interferometrikus) autokorrelációja (balra) és spektruma (jobbra) a 16. ábrán látható.

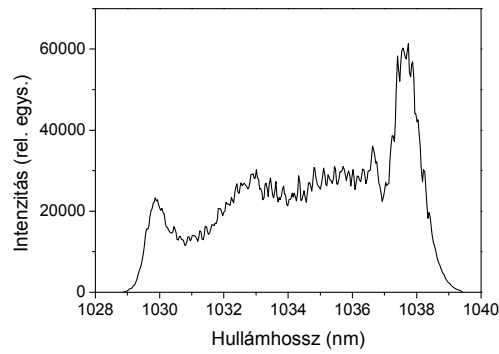
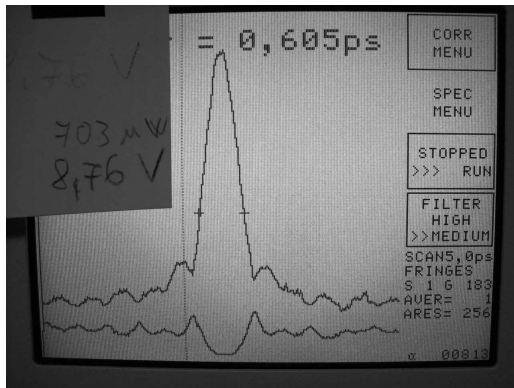
Az előerősítőn elvégzett mérések után a 196 cm hosszúságú double clad Yb szálra röhégesztettünk a szálkombináló kimenetére, és a végerősítőn végeztünk méréseket. Különbözö pumpálásokhoz megkerestük a kompresszor rácsainak azt az optimális távolságát, amelynél a legjobb kompressziót lehetett elérni. Az optimális rács távolság beállítása után lemértük a kompresszor kimenetén az autokorrelációs függvényt és a spektrumot. A teljesítményt a T1 ezüsttükör után elhelyezkedö első blende után mértük. A blendével ki lehetett szürni a megmaradt pumpa fényt (ami a kollimált, a magból kilépö nyaláb körül terjed).



16. ábra Az előerősítőn mért autokorreláció és spektrum.

$P_{\text{szállézer}} = 19,6\text{ mW}$ ;  $P_{\text{előerősítő}} = 58,7\text{ mW}$ ,

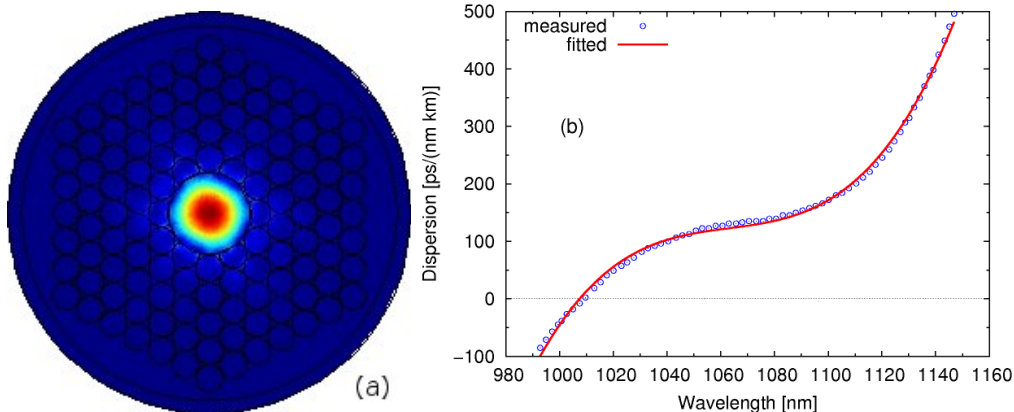
Egy tipikus mért autokorrelációc függvény (balra) és a hozzá tartozó spektrum (jobbra) a 17. ábrán látható. Az ábra alatt feltüntettük az előerősítöt pumpáló Q-Photonics dióda áramát, a szálkombináló kimeneti teljesítményét, a végerősítöt meghajtó dióda teljesítményét, valamint a kimenetén az erősített jel teljesítményét. Ezen kívül az ábra feliratának második sorában szerepel a legjobb kompresszióhoz tartozó rács távolság ( $d$ ), valamint a rácsos kompresszornak az adott távolsághoz tartozó másodrendű (GDD) és harmadrendű (TOD) diszperziója. A rácsok távolságának mérésénél kb.  $\pm 2\text{ mm}$  a leolvasási hiba, ami a számolt GDD-ben  $\pm 1400\text{ fs}^2$ , a TOD-ben  $\pm 3700\text{ fs}^3$  bizonytalanságot eredményez. A szállézer pumpáló dióda meghajtó árama végig 400 mA volt, az 50% OC lézerekimenet utáni 95/5-ös osztó 5%-os kimenetén pedig 1,080 mW volt mérhető, melynek alapján az 50% OC kimenet teljesítménye 22 mW. A mérések során elsösorban a végerősítöt meghajtó dióda teljesítményének függvényében mértük az impulzusok változását. Látható, hogy szinte minden esetben hasonló mértékü impulzuskompresszió volt elérhető, nagyjából azonos rács távolságok mellett. A központi impulzust mellett azonban minden esetben kisebb mellékimpulzusok is megfigyelhetők.



17. ábra.  $P_{preamp} = 60 \text{ mW}$ ,  $P_{PUMP} = 4,48 \text{ W}$ ,  $P_{amp} = 710 \text{ mW}$ ;  
 $d = 8,5 \text{ cm}$ ,  $GDD = -58050 \pm 1400 \text{ fs}^2$ ,  $TOD = 155960 \pm 3700 \text{ fs}^3$ .

### Impulzuskompresszió számítógépes szimulációja HC1060 fotonikus kristály szálakban

Az Yb szállézer és szálerősítő fejlesztéssel kapcsolatos kísérleteinkben a HC-1060-02 típusú légmagos fotonikus bandgap (PBG) szálát használtuk, így a szimulációk is ezen szál fizikai paramétereinek használatával készültek. Először az alakhú átvitel ellenőrzését tettük meg különböző energiájú Gauss impulzusok átvitele esetén egy 1 m hosszúságú PBG szálon. Az impulzusok spektrális szélessége 8 nm körüli, akárcsak kísérleteinkben, amely spektrális szélesség kb. 200 fs transzformáció limitált impulzus hosszának felel meg az 1050 nm körül. Az impulzusok időbeli szélessége 6 ps volt, amely körülbelül 500.000 fs<sup>2</sup> lineáris frekvencia csörpnek felel meg. Ennek a mértékű fázismodulációnak a kiküszöbölésére néhány méter PBG szálnak elegendőnek kell lennie, amelynek pontos megállapításához a szimuláció jó becslést adhat és amely számolásokat alább részletezünk. A PBG szál mért diszperziós adataira illesztettük a diszperziós paramétereket negyedrendig (18.(b) ábra), amelyeket a számolások bemenő paramétereiként felhasználtunk. Ezen diszperziós paraméterek első-, másod-, harmad- és negyedrendben egyenként  $D = 113.8671 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ,  $S = 1.7238 \text{ ps}/(\text{nm}^2\cdot\text{km})$ ,  $T = 0.12119 \text{ ps}/(\text{nm}^3\cdot\text{km})$  és  $F = 0.012504 \text{ ps}/(\text{nm}^4\cdot\text{km})$ .

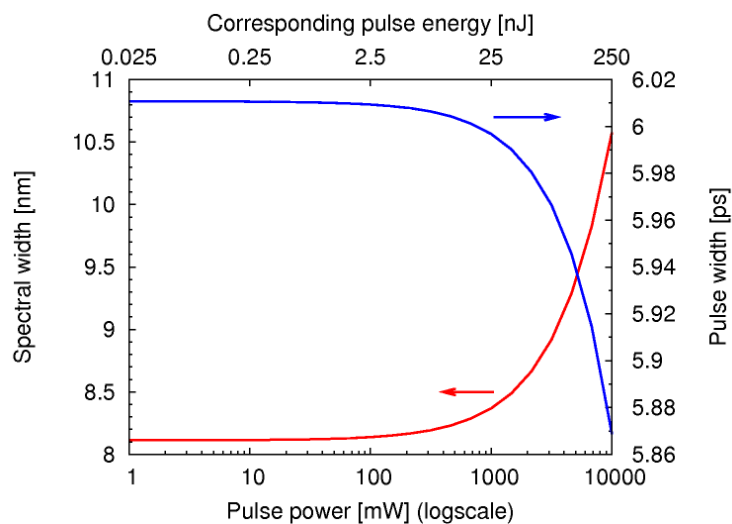


18 ábra (a) Móduseloszlás numerikus modelből egy légmagos PBG szálra a HC-1060 típusúhoz hasonló szerkezettel 1050 nm-en. (b) A HC-1060-02 típusú légmagos PBG szál mért és az általunk illesztett diszperziós függvények.

A nemlinearitásra úgy adunk egy felső becslést, hogy az üvegben levő nemlineáris törésmutató 5%-át vesszük figyelembe, mivel ezen része terjed a módusnak az üvegben. Az így kapott  $n_2$  értéke  $1.5 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2/\text{W}$  adódott. Az effektív mag keresztmetszet pedig  $75 \mu\text{m}^2$ .

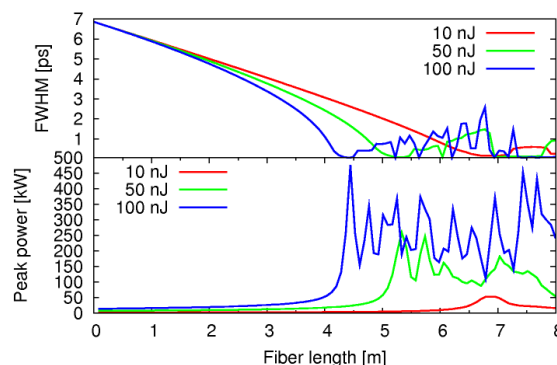
nek adódott. A spektrális kiszélesedés és az időbeli alak jellemző változásait a 19. ábrán mutatjuk be.

Látható, hogy egészen 10 nJ körüli impulzus energiáig az impulzusok spektruma és időbeli alakjuk nem változik lényegesen. Tehát eddig az impulzus energia értékig az impulzusok torzulásmentes átvitele megoldható légmagos PGB optikai szálakkal. Ha 10% spektrális és temporális deformáció elfogadhatónak tekinthető, akkor 1 m HC-1060-02 PBG szálon a 2000 mW átlagteljesítmény (50 nJ) még átvihető. Látszik, hogy ennél nagyobb energiákon erőteljes szoliton kompresszió valósul meg, mivel az impulzus beszűkülése jelentőssé válik. Kisebb energiákon hosszabb szál alkalmazásával érhető el hasonló kompressziós faktor. A 19. ábráról az is leolvasható, hogy a nemlinearitás következtében a spektrális kiszélesedés nagyobb mértékű mint az időbeli alak beszűkülése, aminek következtében az idő sávszélesség szorzat növekedni fog, amelynek következtében transzformáció limitált impulzus generálása egyre nehezebbé válik.



**19. ábra** 8.1 nm sávszélességű Gauss impulzusok spektrális és időbeli félérték szélességének változásai a bemeneti átlag teljesítmény függvényében 40 MHz ismétlődési frekvenciát feltételezve.

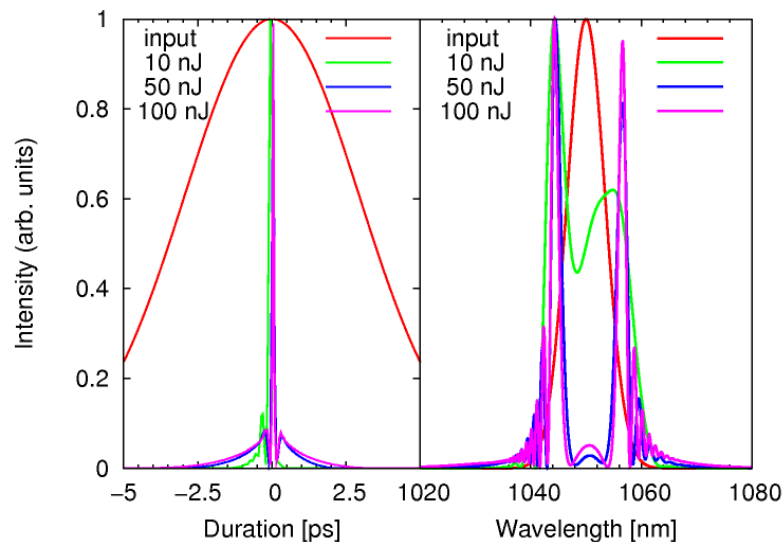
A továbbiakban megkeressük szimuláció segítségével azon szálhosszakat különböző impulzus energiák esetén, amelyeknél a pikoszekundumos impulzusok néhány száz femtoszekundumra kompresszálhatók. A szál és impulzus paraméterek megegyeznek a fent említettekkel, illetve a vizsgálatokat 10, 50 és 100 nJ-os impulzusokra végeztük, amely eredményeket a 20. ábrán foglaltunk össze.



**20. ábra** 8 nm sávszélességű 1050 nm-es Gauss impulzusok csúcspont intenzitás és időbeli félérték szélesség változásai a PBG szál hosszának mentén 10, 50 és 100 nJ impulzus energiák esetén.

Jól látható, hogy a csúcshintenzitások maximuma (első maximuma) jó közelítéssel a félérték szélesség minimumával esik egybe. Tehát azt feltételezhetjük, hogy a szoliton kompresszió a csúcs intenzitás maximumok helyén a maximális. Ezután az impulzusok olyan mértékű „tönkremenetele” figyelhető meg, amelyben a félérték szélesség és a csúcs intenzitások is kaotikus viselkedést mutatnak főleg az erősen torzult impulzusok nem pontosan meghatározható ezen fizikai paraméterei miatt. Tehát a szálát ott kell elvágni adott energiájú impulzusok maximális és jó minőségű kompressziójához, ahol a 20. ábra első intenzitás maximumát illetve időbeli félérték szélesség minimumát találjuk. Ez rendre 10 nJ-os, 50 nJ-os és 100 nJ-os impulzusokra 6.95 m, 5.3 m és 4.44 m, amely hosszaknál a megkapott csúcs intenzitások és félérték szélességek 53 kW, 259.4 kW és 476.7 kW, illetve 149.2 fs, 76.8 fs és 56.3 fs.

A nagyon rövid impulzusok, 200 fs-nál rövidebb félérték szélességek létrejötte azért történhetett meg, mert a terjedés során jelentős spektrális kiszélesedés is tapasztalható volt, így az elméleti transzformáció limit a jóval rövidebb időbeli impulzus szélességek felé tolódott, amelynek létrejötte a PBG szál jelentős diszperziós kompenzálása miatt előállhatott.



**21. ábra** Időbeli (bal oldal) és spektrális (jobb oldal) torzulások 10, 50 és 100 nJ-os impulzusok esetén a PBG szálban egyenként 6.95 m, 5.3 m és 4.44 m terjedések után.

A 21. ábra ezért a spektrális és időbeli torzulásokat hivatott ábrázolni az intenzitás csúcsok (maximális kompresszió) helyén, amelyeknél jól megfigyelhetőek a bemenettől való eltérések. A 10 nJ-os esetben, ahol a spektrum még kevesebb önfázis modulációt szenved nagyobb energiáknál, az impulzus alak többnyire a szál magasabb rendű diszperziója által befolyásolt, ezért a közel 150 fs-os főimpulzus mellett kisebb mellék impulzusokat láthatunk. A spektrum asszimmetrikus torzulása is a magasabb rendű diszperziók meglétére utal. Ezen asszimmetria kiküszöbölésére a nemrégiben publikált közleményünkben szereplő, ú.n. 2D Gires-Tournois szerkezetű, üreges fotonikus kristály szálak alkalmazása jelent megoldást (ld. még Várallyay Z, Saitoh K, Fekete J, Kakihara K, Koshiba M, Szipőcs R; Reversed dispersion slope photonic bandgap fibers for broadband dispersion control in femtosecond fiber lasers; *Optics Express*; **16**, 15603-15616, 2008).