

VÁRALLYAY ZOLTÁN KRISZTIÁN

**Nemlineáris hullám terjedés és ultrarövid  
impulzus kompresszió step-index és  
mikroszerkezetű szálakban**

A DOKTORI (PH.D.) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

SUPERVISOR: **Dr. Jakab László**  
BME, VIK

CONSULTANT: **Szipőcs Róbert, PhD**  
MTA, SZFKI

(2007)

# 1. Bevezetés

A nem lineáris jelenségek vizsgálata optikai szálakban, nagyszámú új eszközhöz és kísérleti eljáráshoz vezetett amelyek hasznosíthatóak a lézer fizikában, a spektroszkópiában, a metrológiában csak úgy mint a biológiában és az orvostudományban. Bár a nemlinearitás kiaknázása sok esetben előnyös találhatóunk számos olyan alkalmazást ahol megléte káros és negatív hatásainak elkerülése körülményes.

Az első nemlinearitással kapcsolatos vizsgálatok szálakban, a lézerek megjelenésére tekintenek vissza. Az önfázis moduláció (SPM), a Raman szórással, Kerr nemlinearitás, keresztfázis moduláció (XPM), négyhullám keverés (FWM) kísérleti kimutatása optikai szálakban a Bell Laboratóriumban történt a hetvenes évek végén, nyolcvanas évek elején. Az egyik legizgalmasabb impulzus forma kialakulás nemlineáris optikai közegben történő terjedés során, a szoliton terjedés, számítógépes szimuláció során felfedezett hullámalak amelyet néhány évvel később kísérletileg is kimutattak. Ezek a vizsgálatok, többek között, megalapozzák például a szoliton kommunikáció lehetőségét nagy távolságokba.

A nemlinearitás használata lehetőséget nyújt az impulzus kompresszióra és szoliton kompresszióra optikai szálakban. Ezek az eljárások olyan rövid időtartományokat átölelő optikai impulzusokat tesznek elérhetővé amelyeknek a generálása rövid impulzusú lézerekkel nem lehetséges.

Az impulzus kompresszió spektrális kiszélesítéssel érhető el a terjedés alatt, amely egy kompresszált időbeli alakot eredményez diszperzió kompenzálás után. A szoliton kompresszió esetében a diszperzió kompenzálás a hullám vezető által, a nem lineáris hatásokkal párhuzamosan történik. Ennek az eléréséhez anomális kromatikus diszperzióra van szükség, amely ellentétes hatású csörpöt generál az impulzuson mint az SPM.

A mikroszerkezetű (MOF) és a fotonikus bandgap szálak megjelenése felgyorsította az olyan eszközök és módszerek fejlesztését amelyeknek célja a nemlineáris hatás növelése vagy éppen ellenkezőleg csökkentése volt. Lehet olyan mikroszerkezetű szálakat tervezni például, hogy képesek legyenek fehér fényű kontinuum keltésére a látható vagy a közeli infravörös tartományban, amely nagy nemlinearitással rendelkező szálakat kíván anomális diszperzióval. Ezzel kapcsolatos kísérleteket először a 2000-es év elején készítettek, illetve impulzus kompressziót először 2003-ban mutattak be ilyen kis magátmérőjű mikroszerkezetű szálban.

Az üreges maggal rendelkező PBG szálak azonban a nemlinearitást nagy-

ságrendekkel képesek csökkenteni lehetővé téve ezáltal a nagy energiájú impulzusok átvitelét, elméletileg, csekély veszteséggel.

Egy korábbi eljárás a nemlinearitás csökkentésére ultrarövid impulzusok átvitelével kapcsolatban a hagyományos step-index és adalékolt szálakban a csörpölt impulzus erősítés (CPA) amelynél az impulzust kinyújtják GDD hozzáadásával a szálbemenet előtt és a terjedés után újra kompresszálják. Ezáltal megközelítőleg alakhű impulzus átvitel biztosított.

Manapság a szálalapú eszközök kísérleti vagy numerikus eljárásokkal kapcsolatos vizsgálatai az érdeklődés középpontjában állnak. Szálak például alapvető komponensei lehetnek fényforrásoknak, mérő rendszereknek és orvosi eszközöknek is mert akár impulzusok viselkedése is megváltoztatható használatukkal alapvető, hagyományos funkciójuk mellett, a fényátvitel mellett.

## 2. Célkitűzések

A disszertáció három különböző részre osztható, amelyek a nemlineáris hullám terjedés egy módusú vagy mikroszerkezetű szálak vizsgálatán keresztül kapcsolódnak egymáshoz. Továbbá minden fejezet a megfelelő impulzus vagy szálparaméterek megtalálásával foglalkozik, ahhoz, hogy az adott optikai rendszer megvalósítható legyen.

Az első fejezetben a mikro hullámmal modulált jel átvitelét vizsgálom egy módusú optikai szálban a nemlinearitás figyelembevételével. Ebben a fejezetben a nemlinearitás a diszperzió okozta modulációs elnyomás kompenzálásával kapcsolatban merül fel. A nemlinearitás és a diszperzió együttes hatását vizsgálom intenzitás modulált jelek esetén, azért, hogy megtaláljam azokat a paramétereket a terjedő jellel kapcsolatban, amelyek a várt szoliton terjedést létrehozzák.

A folytatásban a numerikus eszközeinket olyan impulzus átviteli rendszer tervezésére alkalmazzuk, egy két-foton mikroszkóp részeként, amely a csörpölt impulzusok átvitelén alapul, step-index szálon keresztül. Ezekben a vizsgálatokban a nemlinearitás káros hatásainak az elkerülése a cél. A szimuláció képes megjósolni a használható impulzus energiát az előkompenzálás és kompresszálás erősségét amely a rendszeren átvihető, hogy a két fotonos gerjesztés megvalósítható legyen.

A disszertáció harmadik része mikro szerkezetű szálakban történő impulzus kompresszióval foglalkozik. Előcsörp ebben a fejezetben szintén szere-

pet játszik abban, hogy elkerüljük a diszperzió okozta jelentős impulzus alak torzulást és szabályozzuk a spektrum kiszélesedését az impulzus csúcs intenzitásának változtatásával. A cél az optimális bemeneti és kimeneti csőröpök megtalálása, hogy 6 fs-nál rövidebb kompresszált impulzus alakot kapjunk. A kompresszált impulzusok minőségát és szélességát vizsgáltam különböző bemenő paraméterekkel is. Diszperzió módosított mikroszerkezetű szálakat ugyancsak használok a szimulációkban az impulzus kompresszióra legmegfelelőbb szál kiválasztásának érdekében 800 nm hullámhossz körül és nano-Joule alatti impulzus energiákra.

### 3. Új tudományos eredmények

- A mikrohullámmal modulált jelek hagyományos egy módú optikai szálon történő átvitelét vizsgáltam elméletileg és kísérletileg. Kiszámoltam a szoliton kialakulást és stabil szoliton terjedést 10 GHz sinus modulált jelek esetén 20 mW és nagyobb átlagteljesítmények esetén [1, 2]. Javasoltam a Raman erősítés használatát a vivő hullám gyengülésének kiküszöbölésére, távoli terjedés esetén [2].
- A diszperzió okozta modulációs elnyomás megjelenését vizsgáltam a szál hossza mentén a nemlinearitás és a kromatikus diszperzió függvényében [2]. A kapott eredményeket közelítő formulákban foglaltam össze.
- Szimuláció útján kimutattam, hogy a negatívan csörpölt ultra rövid impulzusok spektrális beszűkülést szenvednek egy módusú szálon történő átvitelükkor a normál diszperziós tartományban a kromatikus diszperzió és az önfázis moduláció együttes hatásaként [4]-[5]. Kiszámoltam azt az intenzitás határt a kezdetileg csörpölt impulzusokra 20 nm sáv szélességgel, amelyekből körülbelül 40 fs kompresszált idő alak nyerhető az átviteli rendszer végén torzulásmentesen [6].
- A nano-Joule és nano-Joule alatti ultra rövid impulzusok kompresszióját vizsgáltam elméletileg kis mag átmérőjű mikro szerkezetű szálakban. Kimutattam, hogy előkompenzálás és diszperzió kompenzálás szükséges ahhoz, hogy jó minőségű 6 fs-nál rövidebb kompresszált impulzusokat kapjunk 12 fs-ról indulva, mindössze prizma párt és csörpölt tükröt felhasználva a nagy nemlinearitású szál mellett [7, 8, 9].

- Pikoszekundumos és néhányszor száz femtoszekundumos impulzusokat vizsgáltam és kimutattam, hogy megfelelő diszperzió kompenzálás esetén hússzoros impulzus kompresszió érhető el ezen az idő tartományon [10]. Megmutattam, hogy kisebb harmadrendű diszperzióval rendelkező mikroszerkezetű szálak használatával 6 vagy 5 fs-nál rövidebb impulzusok nyerhetők 24 fs transzformáció limitált impulzusokat használva [10].

## 4. Tézisekhez kapcsolódó publikációk

- [1] I. Frigyes, Z. Várallyay, O. Schwelb, L. Jakab and P. Richter, „Investigations in the joint effect of fiber dispersion and nonlinear refraction in microwave optical links,” Proceedings of *International Topical Meeting on Microwave Photonics*, Budapest (Sept 10-12, 2003) pp. 299-302.
- [2] Z. Várallyay, I. Frigyes, O. Schwelb, E. Udvary, L. Jakab and P. Richter, „Soliton propagation of microwave modulated signal through single mode optical fiber,” *Acta Phys. Hung. B* **23**, 175-186 (2005).
- [3] B. Rózsa, G. Katona, B. Lendvai, Sz. E. Vizi, P. Maák, Z. Várallyay, L. Valenta, T. Volosin, A. Vági, Á. Bányász, A. Lukács, J. Fekete and R. Szipőcs, „Fast scanning and uncaging strategies in 3D two-photon microscopy,” IBRO International Workshop on Neuronal Circuits: from Elementary to Complex Functions, Budapest (Jan 29-31, 2004).
- [4] R. Szipőcs, Á. Bányász, J. Fekete, Z. Várallyay, A. Lukács, B. Rózsa, G. Katona and S. E. Vizi, „Chirped pulse fiber delivery system for high speed, high spatial resolution 3D two-photon microscopy,” Conference of ESF Femtochemistry and Femtobiology (ULTRA) program, Pécs (Mar 25-28, 2004).
- [5] B. Rózsa, E. S. Vizi, G. Katona, A. Lukács, Z. Várallyay, A. Sággy, L. Valenta, P. Maák, J. Fekete, Á. Bányász and R. Szipőcs, „Real time 3D nonlinear microscopy,” *Trends in Optics and Photonics*, **98**, 858-863 (2005).
- [6] B. Rózsa, G. Katona, E. S. Vizi, Z. Várallyay, A. Sággy, L. Valenta, P. Maák, J. Fekete, Á. Bányász, and R. Szipőcs, „Random access three-dimensional two-photon microscopy,” *Appl. Optics* **46**, 1860-1865 (2007).

- [7] Z. Várallyay, J. Fekete, Á. Bányász, R. Szipőcs, „Sub-nanojoule pulse compression in small core area photonic crystal fibers below the zero dispersion wavelength,” Trends in Optics and Photonics, **98**, 571-576 (2005).
- [8] Z. Várallyay, J. Fekete, Á. Bányász, R. Szipőcs, „Pulse Compression with highly nonlinear photonic crystal fibers by optimization of input and output chirp parameters up to the third-order,” OSA Conference on OAA, Budapest (Aug 7-10, 2005), paper **ME6**.
- [9] Z. Várallyay, J. Fekete, Á. Bányász, S. Lakó, R. Szipőcs, „Sub-nanojoule pulse compression down to 6 fs in photonic crystal fibers,” CLEO/QELS, Baltimore, Maryland (May 22-29, 2005), paper **JThE21**.
- [10] Z. Várallyay, J. Fekete, Á. Bányász and R. Szipőcs, „Optimizing input and output chirps up to the third order for sub-nanojoule, ultrashort pulse compression in small core area PCF,” Appl. Phys. B, **86**, 567-572 (2007).

## 5. Válogatott, egyéb közlemények

1. P. Dombi, P. Antal, J. Fekete, R. Szipőcs and Z. Várallyay, „Chirped-pulse supercontinuum generation with a long-cavity Ti:sapphire oscillator,” Applied Physics B, **submitted for publication** (March 29, 2007).
2. J. Jasapara, M. Andrejco, J. W. Nicholson, A. D. Yablon and Z. Várallyay, „Simultaneous amplification and compression of picosecond pulses to 50 kW in Er fiber,” CLEO/Europe-IQEC Conference, Munich (Jun 17-22, 2007) paper **CJ1-2-WED**
3. A. Lukács, Z. Várallyay and R. Szipőcs, „Cubic phase distortion of single attosecond pulses being reflected on narrowband Mo/Si filtering mirrors,” Trends in Optics and Photonics, **98**, 806-810 (2005).
4. Z. Várallyay, G. Varga, L. Jakab and P. Richter, „Broadband Raman amplifiers in modern telecommunication systems,” Híradástechnika /seventh English Language Issue/ pp. 36. 2003 december.
5. Z. Várallyay and S. Kugler, „Are the triangles and the squares possible local atomic arrangements in the structure of amorphous silicon?” Journal of Non-Crystalline Solids, **299-302**, 265-268 (2002).
6. S. Kugler and Z. Várallyay, „Possible unusual atomic arrangements in the structure of amorphous silicon,” Philosophical Magazine Letters, **81**, 569-574 (2001).