

Mikrostrukturált optikai szálak diszperziójának vizsgálata spektrális interferometriával

Doktori (Ph.D.) értekezés tézisei

Szerző:
Grósz Tímea

Témavezető:
Dr. Kovács Attila Pál
adjunktus



Fizika Doktori Iskola
Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék
Természettudományi és Informatikai Kar
Szegedi Tudományegyetem

Szeged

2017

1. Bevezetés

Napjainkban az optikai szálak alkalmazása igen széleskörű, nem csupán a telekommunikációban, hanem az orvostudományban, a kutatásban, lézertünetek mobilis továbbításában, valamint korszerű szenzorikai megoldásokban is jelentős szerepük van. Éppen ezért a fejlesztések valamint a hagyományos optikai szálak alkalmazhatóságának határait kiterjesztő alternatív megoldások iránti igény folyamatosan növekszik. Elrugaszkodva a korábban ismert klasszikus száloptikai megoldásoktól, a kilencvenes években az ún. fotonikus optikai szálak (photonic crystal fiber, PCF) és Bragg-típusú szálak megjelenése új távlatokat nyitott a fotonikában. Ezen mikrostrukturált szálak legfontosabb tulajdonsága, hogy igen sok alkalmazás által támasztott követelménynek eleget tudnak tenni, hiszen optikai tulajdonságaik, mint például diszperziójuk, kettőstörésük, nemlinearitásuk, valamint a vezetési tulajdonságaik megfelelő tervezéssel tetszés szerint alakíthatók, akár egymástól függetlenül is. Lehetőség van olyan geometriák tervezésére, melyekkel gyakorlatilag diszperziómentes vezetés is megvalósítható. A levegőben, azaz légmagos szálban (hollow-core photonic crystal fiber, HC-PCF) történő fényvezetés lehetősége különösen jelentős, hiszen ezáltal nagy teljesítmények átvitele valósítható meg alacsony veszteségek és csökkentett nemlinearitás mellett. Kedvező tulajdonságaik miatt a légmagos szálakat gyakran alkalmazzák száloptikai giroszkópok gyártásában, gáz spektroszkópiában, nagyteljesítményű ultrarövid optikai impulzusok átvitelében és kompresszáálásában, endoszkópiában, optikai kommunikációs rendszerekben, valamint különböző szenzorokként is.

Habár az optikai szálak gyártása jelentős fejlődésen esett át az elmúlt évtizedekben, az, hogy a legyártott szál pontosan ugyanolyan struktúrával rendelkezzen, mint ahogyan azt megtervezték, és ezáltal a modellezés alkalmával meghatározott optikai tulajdonságokkal bírjon, viszonylag nehezen kivitelezhető, még egyszerűbb geometriával rendelkező optikai szálak esetén is. Ahhoz, hogy a gyártási technológia hatásait már a tervezésnél is figyelembe tudják venni, illetve azért, hogy minél kevesebb

lépésben sikerüljön a célparaméterekkel rendelkező szálak létrehozni, és egyúttal az igen költséges tervezési-gyártási folyamatot hatékonyabbá tenni, nagyon pontos mérési módszerre van szükség.

Optikai elemek spektrális fázisának meghatározására gyakran alkalmazott nagypontosságú, lineáris módszer a spektrálisan bontott interferometria, mely optikai szálak diszperziómérésében is bizonyított már. Előnye, hogy mivel lineáris módszer, emiatt aránylag olcsó, nem igényel hosszú szálmintát, valamint, hogy magasabb rendű diszperziók mérésére is nagypontossággal alkalmazható, mely a mikrostruktúrált szálak gyakori tulajdonsága.

Munkám során különböző spektrális interferometrián alapuló kiértékelési eljárások alkalmazhatóságát vizsgálom meg Bragg-típusú, valamint légmagos fotonikus optikai szálak diszperziójának meghatározására.

2. Célok

1. Olyan mikrostruktúrált optikai szálak előállításánál vagy optikai rendszerek beállításánál, ahol a spektrális fázisban a másodrendű diszperzió (group delay dispersion, *GDD*) értékének csökkentése a cél, a magasabb rendű diszperziók hatásai válhatnak dominánssá. Tekintve, hogy a spektrális fázisfüggvény ekkor harmad- vagy annál magasabb rendű együtthatókat is tartalmazhat, a hagyományos üveglemezeknél vagy optikai szálaknál tapasztaltakkal ellentétben elméletileg akár több állandó fázisú pont (stationary phase point, SPP) is megjelenhet a spektrálisan bontott interferogramokon. Mivel az SPP-k megfigyelésével ez esetben következtetni lehetne a magasabb rendű diszperziók domináns rendjére valamint azok előjelére is, lehetőség nyílna a diszperzió monitorozására akár valós időben is. Dolgozatomban részletesen megvizsgálom a spektrális interferogramokon megjelenő SPP-k száma, mozgása, valamint alakja és a magasabb rendű diszperziós együtthatók közötti kapcsolatot. MathCad szoftver segítségével készített szimulációk felhasználásával demonstrálom,

hogy különböző diszperziós rendek dominanciája milyen hatással van a kialakuló spektrális interferogram mintázatára.

Az SPP-módszer, mint magasabb rendű diszperzió monitorozásra szolgáló eljárás hatékonyságát és megbízhatóságát kísérletileg is érdemes tesztelni. Ehhez egy spektrálisan bontott Mach-Zehnder, valamint egy Michelson-interferométert építünk, és meghatározom egy tömör magú Bragg-típusú mikrostruktúrált szál, valamint egy prizmapár diszperziós tulajdonságait az SPP-módszer segítségével.

2. Az optikai szálak diszperziója az SPP-módszeren kívül más, szintén spektrális interferometrián alapuló kiértékelési eljárásokkal is meghatározható. A különböző módszereket alkalmazó eddigi elméleti és kísérleti munkák esetében azonban nem történt meg ezen eljárások szisztematikus vizsgálata. Ahhoz, hogy rövid ($<1\text{m}$) optikai szálak vizsgálatakor a lehető legmegfelelőbb módszert válasszuk, egy részletes összehasonlítás nagyon hasznos és hiánypótló lenne. Fontos továbbá megvizsgálni, hogy melyik módszer mennyire érzékeny a magasabb rendű diszperzió jelenlétére, illetve, hogy a vizsgált szál spektrumában esetlegesen megjelenő abszorpciós völgyek mennyire befolyásolják a kiértékelés pontosságát. Munkám során így célul tűzöm ki, hogy mikrostruktúrált szálak magasabb rendű diszperziójának mérésekor pontosság szempontjából megvizsgálom és összehasonlítom az állandó fázisú pont, a minimum-maximum (minima-maxima, MM), a fázismodulált koszinuszillesztés (cosine function fit, CFF), valamint a hagyományos (Fourier-transform, FT) és az ablakolt Fourier-transzformációs (windowed Fourier-transform, WFT) kiértékelési eljárásokat. Mintaként a korábban vizsgált Bragg-szálat választom, mely a transzmissziós spektrumában éles rezonanciákkal rendelkezik.

3. Tekintve, hogy a légmagos fotonikus szálak használata számos alkalmazás szempontjából előnyös, hasznos ilyen típusú szálak diszperziós jellemzőit is megvizsgálni. A HC-800 típusú optikai szálak hamar a figyelem középpontjába kerültek, több kutatócsoport is tanulmányozni kezdte őket. Ezen vizsgálatok főként a HC-800-01 PCF-re terjedtek ki,

jelenleg azonban már csak a HC-800-02 típusú szál van kereskedelmi forgalomban. A HC-800-02 szál bizonyos tulajdonságait ugyan vizsgálták már, azonban csak a teljes működési tartományához képest egy szűk hullámhossztartományban. További munkám során ezért a HC-800-02 típusú optikai szál diszperziójának és polarizációjának vizsgálatát tűzöm ki célul a szál működési tartományát teljesen lefedő 760-870 nm-es hullámhossztartományban. Méréseimhez a továbbiakban is a spektrális interferometriát, a kiértékeléshez pedig a hagyományos Fourier-transzformációs módszert használom. A diszperziót mindkét polarizációs irány mentén meghatározom. A szálakat használat közben gyakran feltekerik vagy meghajlítják, aminek következtében a szálban mechanikai feszültségek lépnek fel. Tekintve, hogy ilyen esetekben a szál kettőtörő és diszperziós tulajdonságai is megváltozhatnak, ezeket nem csupán a szál egyenes pozíciójában, hanem kissé belógatott, valamint feltekert helyzetében is megvizsgálom. A diszperziót, és ezáltal a szálgeometria uniformitását különböző, 10 és 97 cm közötti hosszúságú minták esetében is megvizsgálom.

4. A polarizációs módusdiszperzió (polarization mode dispersion, PMD) jelenléte sok alkalmazás szempontjából hátrányos, így mérése nagy jelentőséggel bír. Az előzőekben vizsgált HC-800-02 PCF mindkét polarizációs módusának egyidejű gerjesztése mellett a PMD-t az FT-módszer segítségével indirekt és direkt módon is meghatározom, majd összehasonlítom a két megközelítés pontosságát.

5. Ismeretes, hogy az ablakolt Fourier-transzformáción alapuló kiértékelések eredményeképpen a minta csoportkésleltetése (group delay, *GD*) direkt módon adódik. Tekintve, hogy a *GD*-görbe alakjából a magasabb rendű diszperziók dominanciájára valamint előjelére is következtetni lehet, érdemes a módszer alkalmazhatóságát más típusú optikai szálak esetén is megvizsgálni. Végezetül tehát azt tűzöm ki célul, hogy megvizsgálom, hogy a továbbfejlesztett, nagy frekvenciafeloldású ablakolt Fourier-transzformáción alapuló gerincvonal kereső algoritmus (windowed Fourier-ridges, WFR) alkalmazása milyen előnyökkel jár a

korábban alkalmazott hagyományos FT-módszerhez képest. Mintaként ismét a HC-800-02 PCF szolgál.

3. Módszerek

Az állandó fázisú pontok száma, mozgása valamint alakja és a magasabb rendű diszperzió kapcsolatának vizsgálatához MathCad 14 szoftverben készítettem szimulációkat. Vizsgálataimhoz a későbbi mérésekhez igazodva a 700-900 nm-es hullámhossztartományt választottam. Harmad-, negyed- és ötödrendű diszperziók hatását tanulmányoztam. Ezt követően a szimulációk eredményét egy 30 cm hosszúságú Bragg-típusú mikrostrukturált optikai szálon, valamint egy változtatható diszperzióval rendelkező 67° -os törőszögű, kvarcból készült prizmákból álló prizmapáron végzett mérésekkel vettem össze. Ehhez egy Mach-Zehnder és egy Michelson-interferométert építettem. A szál esetében szélessávú fényforrásként Ti:S lézeroszcillátort (Femtolasers, Rainbow, impulzushossz: 6 fs, központi hullámhossz: 800 nm, FWHM = 150 nm), míg a prizmapárnál egy 100 W-os halogén lámpát használtam. Detektorként a szál vizsgálatokor egy nagyobb (Ocean Optics HR4000, 700-900 nm, spektrális felbontás: 0.2 nm), a prizmapár esetében pedig egy kisebb felbontású spektrométert (Avantes 3648, 200-1100 nm, spektrális felbontás: 1 nm) használtam. A kiértékeléshez az SPP-módszert használtam.

Az SPP, a MM, a CFF, az FT és a WFT kiértékelési eljárások összehasonlításához a 37 cm-es Bragg-szálat használtam. Méréseimet a 740-840 nm-es hullámhossztartományban végeztem. Egy Mach-Zehnder interferométert építettem, melyet ezúttal egy házilag épített Ti:S oszcillátorból kijövő lézerefénnyel (impulzushossz: 20 fs, központi hullámhossz: 800 nm, FWHM = 60 nm) világítottam ki, és detektorként itt is a fenti nagyfeloldású spektrométert használtam.

A HC-800-02 légmagos fotonikus optikai szál polarizációfüggő diszperziójának vizsgálatára ismételten egy Mach-Zehnder alapú elrendezést használtam. Fényforrásként a Rainbow Ti:S oszcillátort,

detektorként pedig az Ocean Optics spektrométert használtam. Méréseimet a 760-870 nm-es hullámhossztartományban végeztem, a kiértékeléshez az FT- és az MM-módszereket használtam. A szálmintákat különböző pozíciókban helyeztem el az interferométer tárgykarjában. Több hosszúságú mintán is végeztem méréseket.

A WFR-módszer előnyeinek feltérképezésére ismételten a HC-800-02 szálmintát használtam. A kísérleti elrendezés az előzőekben ismertetett paraméterekkel rendelkezett, méréseimet pedig a 760-840 nm-es hullámhossztartományban végeztem el a szál polarizációs módusainak egyenkénti, majd egyidejű gerjesztése mellett.

4. Eredmények

T1. Különböző diszperziós rendek interferenciamintázatra gyakorolt hatását vizsgáltam meg MathCad 14 szoftverben készített szimulációk segítségével. Megmutattam, hogy az állandó fázisú pontok számát, mozgását és alakját analizálva következtetni lehet adott magasabb rendű diszperzió dominanciájára. Domináns harmadrend kettő, kombinált másod- és negyedrend három, valamint kombinált harmad- és ötödrend négy állandó fázisú pont megjelenését eredményezte. Megállapítottam, hogy az állandó fázisú pontok pozíciói minden esetben nagy pontossággal meghatározhatók, kivéve a domináns negyedrend esetében, amikor is az állandó fázisú pont kis késleltetések esetében túlságosan kiszélesedik, ami a mérési pontosságot jellemzően zavarja. Az állandó fázisú pontok és a magasabb rendű diszperziók kapcsolatát kísérletileg egy 30 cm hosszúságú Bragg-típusú optikai szál, valamint egy változtatható diszperzióval rendelkező ömlesztett kvarcból készült, 67°-os törőszögű prizmapár esetében is megvizsgáltam. A Bragg-szálon végzett mérések eredményei egyeztek a szimulációknál tapasztaltakkal, prizmapár esetében azonban a vizsgált spektrális tartomány túl szűk volt ahhoz, hogy lekövesse az állandó fázisú pontok teljes mozgását, így a monitorozás ellentmondásos eredményre vezetett. Megállapítottam, hogy teljes bizonyossággal csak a

koefficiensek méréssel történő meghatározásával mondható meg, hogy melyik diszperziós rend a domináns [1,7,8,13,15].

T2. Öt kromatikus diszperzió meghatározására alkalmas, spektrális interferometrián alapuló kiértékelési eljárást hasonlítottam össze egy megrendelésre készült 37 cm hosszúságú Bragg-szál magasabb rendű diszperziójának meghatározására a 740-840 nm-es hullámhossztartományon. Kimutattam, hogy az állandó fázisú pont és a minimum-maximum módszer kevésbé, míg a fázismodulált koszinusz-függvény illesztésén alapuló kiértékelési eljárás már kellőképpen érzékeny a magasabb rendek jelenlétére. Az ablakolt Fourier-transzformációs kiértékelés pontossága alulmúlta a várakozásokat. Megállapítottam, hogy a vizsgált Bragg-szál esetében a hagyományos Fourier-transzformáción alapuló kiértékelési eljárás szolgáltatta a legnagyobb pontossággal a diszperziós együtthatókat egészen ötödrendig, illetve, hogy a vizsgált kiértékelési eljárások közül csupán a két, Fourier-transzformáción alapuló módszer alkalmas a szál spektrumában megjelenő szivárgó módusok okozta fázisugrások pontos kimutatására [2,5,6,9–11].

T3. Kísérletileg meghatároztam 1 méternél rövidebb HC-800-02 fotonikus optikai szálminták polarizációs irányfüggő kromatikus diszperzióját hatodrendig Fourier-transzformációs spektrális interferometria alkalmazásával a 760-870 nm-es hullámhossztartományban. Megállapítottam, hogy a szál két polarizációs irányához tartozó diszperziós görbék különböznek: a gyors tengely mentén haladó módus gerjesztésével meghatározott görbe a kisebb hullámhosszak tartományában esetenként 70%, míg a lassú tengely mentén terjedő jelentősebb, 198%-os eltérést mutatott a gyártó által megadott adatokból számolt görbétől. A szál mindkét polarizációs irányában a mért *GDD* negatív és abszolút értékben is kisebb, mint hasonló hosszúságú, hagyományos ömlesztett kvarc-alapú egymódusú szálak esetén várható. A magasabb rendű tagok mind pozitív előjelűek, és hogy a harmadrend (third order dispersion, *TOD*) a domináns

tag. Kimutattam, hogy a szál diszperziója mindkét polarizációs irány esetén független a szál pozíciójától és annak hosszától [3,12,14].

T4. Spektrális interferometriát alkalmazva kísérletileg meghatároztam 1 méternél rövidebb HC-800-02 fotonikus optikai szálminták polarizációs módus diszperzióját indirekt és direkt megközelítést alkalmazva a 760-870 nm-es hullámhossztartományban. A polarizációs módusdiszperzió meghatározására az indirekt módszer, valamint a hosszabb szálminták esetén a direkt módszer esetén is a Fourier-transzformációs eljárást használtam, a rövidebb szálaknál pedig minimum-maximum módszert alkalmaztam a csoportkésleltetés-különbség direkt mérésekor. Eredményeimet az irodalomban található adatokkal összevetve megállapítottam, hogy nem lehetséges teljesen megegyező struktúrájú szálakat gyártani, ezért az optikai tulajdonságokat fontos kísérletileg meghatározni. Megállapítottam, hogy a csoportkésleltetés-különbség direkt mérésén alapuló eredmények pontossága a hosszabb szálak esetén egyértelműen kitűnik, tekintve, hogy ez független az egyes polarizációs módusok pontos gerjesztésétől és a referenciakar késleltető elemének pontos beállításától is. A rövidebb szálminták esetén a direkt és az indirekt módszer pontossága összemérhető [3,12,14].

T5. Spektrális interferometria alkalmazásával kísérletileg meghatároztam 1 méternél rövidebb HC-800-02 fotonikus optikai szálminták polarizációfüggő kromatikus diszperzióját a két polarizációs módus egyidejű, valamint egyenkénti gerjesztésével a 760-870 nm-es hullámhossztartományban. A felvett interferogramokat egy továbbfejlesztett ablakolt Fourier-transzformációs gerincvonal kereső algoritmus segítségével értékeltem ki. Az egyidejű gerjesztés mellett egyetlen interferogram kiértékelésével kapott diszperziós és csoportkésleltetés-különbség görbéket összevetve az egyenkénti gerjesztés mellett felvett, majd az ablakolt vagy a hagyományos Fourier-transzformációs módszerrel kapott görbékkel teljes egyezést tapasztaltam.

Kimutattam, hogy az ablakolt Fourier-transzformációs gerinevonal kereső algoritmus további előnye, hogy a kapott *GD*-görbe alakjából minden további analízis nélkül vizuálisan is következtetni lehet a magasabb rendű diszperziók dominanciájára valamint előjelére is [4].

5. A doktori disszertációhoz kapcsolódó publikációk

▪ Referált folyóiratcikkek

[1] **T. Grósz**, A. P. Kovács, K. Mecseki, L. Gulyás, and R. Szipőcs, „Monitoring the dominance of higher-order chromatic dispersion with spectral interferometry using the stationary phase point method,” *Opt. Commun.* **338**, 292–299 (2015).

[2] **T. Grósz**, A. P. Kovács, M. Kiss, and R. Szipőcs, „Measurement of higher order chromatic dispersion in a photonic bandgap fiber: comparative study of spectral interferometric methods,” *Appl. Opt.* **53**(9), 1929–1937 (2014).

[3] **T. Grósz**, A. P. Kovács and K. Varjú, „Chromatic Dispersion Measurement along Both Polarization Directions of a Birefringent Hollow-core Photonic Crystal Fiber Using Spectral Interferometry,” *Appl. Opt.* **56**(19), 5369–5376 (2017).

[4] **T. Grósz**, M. Horváth, and A. P. Kovács, „Complete dispersion characterization of optical fibers from a single interferogram using the windowed Fourier ridges algorithm,” *Opt. Express*, megjelenés alatt (2017).

▪ Konferenciakiadványokban megjelent közlemények

[5] A. P. Kovács, **T. Grósz**, and M. Kiss, „Measurement of higher order dispersion in a photonic fiber using spectral interferometry,” *AIP Conf. Proc.* **1462**, 112–115 (2012).

[6] **T. Grósz**, M. Kiss, and A. P. Kovács, „Characterisation of optical pulses travelling through a photonic crystal fibre using Fourier-transform

spectral interferometry,” Proc. SPIE **8775**, Micro-structured and Specialty Optical Fibres II, 87750E-1 (2013).

[7] **T. Grósz**, and A. P. Kovács, „Higher order dispersion measurement using the stationary phase point method,” Proc. SPIE **9128**, Micro-structured and Specialty Optical Fibres III, 91280R-1 (2014).

[8] **T. Grósz**, L. Gulyás, and A. P. Kovács, „Advanced laboratory exercise: Studying the dispersion properties of a prism pair,” Proc. SPIE **9793**, Thirteenth International Topical Meeting on Education and Training in Optics and Photonics (ETOP), 97931N-1 (2015).

▪ **Konferencia előadások és poszterek**

[9] A. P. Kovács, **T. Grósz**, and M. Kiss, „Measurement of Higher Order Dispersion in a Photonic Bandgap Fiber Using Spectral Interferometry,” LEI 2011 - Light at Extreme Intensities, Szeged, Hungary (November 14-18, 2011), poster P12

[10] **T. Grósz**, M. Kiss, and A. P. Kovács, „Dispersion Measurement of Photonic Crystal Fibers up to Fifth Order Using Spectral Interferometry,” 5th EPS-QEOD Europhoton Conference on Solid-State, Fibre, and Waveguide Coherent Light Sources, Stockholm, Sweden (August 26-31, 2012), poster TuP33

[11] **T. Grósz**, M. Kiss, and A. P. Kovács, „Characterisation of Optical Pulses travelling through a Photonic Crystal Fibre Using Fourier-transform Spectral Interferometry,” SPIE Optics and Optoelectronics, Prague, Czech Republic (April 15-18, 2013).

[12] **T. Grósz**, R. Szipöcs, and A. P. Kovács, „Measurement of Polarization-dependent Chromatic Dispersion in a Birefringent Hollow-core Photonic Crystal Fiber Using Spectral Interferometry,” 3rd Workshop on Specialty Fibers and their Applications, Sigtuna, Sweden (August 28-30, 2013), poster F2.10

[13] **T. Grósz**, and A. P. Kovács, „Higher Order Dispersion Measurement Using the Stationary Phase Point Method,” SPIE Photonics Europe, Brussels, Belgium (April 14-17, 2014) poster 9128-27

[14] **T. Grósz**, K. Csonti, R. Szipócs, and A. P. Kovács, „Measurement of the Polarization Mode Dispersion in a HC-800 Photonic Crystal Fiber,” 6th EPS-QEOD Europhoton Conference on Solid-State, Fibre, and Waveguide Coherent Light Sources, Neuchâtel, Switzerland (August 24-29, 2014) poster TuP-T1-P-16

[15] **T. Grósz**, L. Gulyás, and A. P. Kovács, „Advanced laboratory exercise: Studying the dispersion properties of a prism pair,” ETOP 2015, Education and Training in Optics and Photonics, Bordeaux, France (June 29-July 2, 2015) paper 962