

NAGY MÓDUSÁTMÉRŐJŰ FOTONIKUS KRISTÁLYSZÁL DISZPERZIÓS GÖRBÉINEK MEGHATÁROZÁSA ABLAKOLT FOURIER-TRANSZFORMÁCIÓS SPEKTRÁLIS INTERFEROMETRIÁVAL

Vukovity Krisztina¹, Grósz Tímea^{1,2}, Horváth Mercédesz^{1,3}, Kovács Attila Pál¹

¹SZTE TTIK Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Dóm tér 9, Szeged, H-6720 Magyarország

²ELI-ALPS, ELI-HU Nonprofit Kft., Wolfgang Sandner utca 3., Szeged, H-6728 Magyarország

³Semilab Félvezető Fizikai Laboratórium Zrt., Prielle K. utca 2., Budapest, H-1117 Magyarország

DOI: <https://doi.org/10.14232/kvantumelektronika.9.36>

1. Bevezetés

A fotonikus kristályszálak felfedezése [1] számos olyan alkalmazás megvalósítását tette lehetővé, amelyek speciális diszperzió-karakterisztikával bíró, alacsony veszteségű impulzustovábbítást igényelnek [2]. Habár a gyártási technológia napjainkig sokat fejlődött, előfordulhat, hogy az elkészült optikai szál geometriája, és ezáltal optikai tulajdonságai eltérnek a tervezettől. Ha a gyártás során például a szál szerkezetének hengeres szimmetriája sérül, akkor a szál kettősen törővé válik. Ekkor a szálba csatolt ultrarövid lézerimpulzus két, egymásra merőleges polarizációjú impulzusra bomlik fel, melyek különböző sebességgel terjednek, és ennek következtében időbeli késés alakul ki közöttük. Mivel a polarizációs iránytól függően a magasabb rendű diszperziós jellemzők is nagyon eltérők lehetnek [3], a szálból kilépő, egymásra merőleges polarizációjú impulzusok időbeli alakja is jelentősen különbözhet, ami az alkalmazások szempontjából kritikus lehet. A fentiekből látható, hogy egy optikai szálnak a használata előtt nagyon fontos, hogy mérésekkel meghatározzuk a diszperziós jellemzőit, és ne a tervezéskor megadott paramétereket vegyük alapul.

A spektrális interferometria egy széleskörben használt, nagy pontosságú, lineáris mérőmódszer, mely alkalmasnak bizonyult többek között optikai szálak diszperziójának mérésére is [3]. Nemrégiben megmutattuk, hogy a spektrális interferogramok kiértékelésére az ablakolt Fourier-transzformációval (windowed Fourier transform, WFT) meghatározott gerincvonal módszerrel [4] relatíve kis diszperziójú, légmagú fotonikus szálak diszperziója nagy pontossággal megmérhető [5]. Kérdés, hogy a nagyobb intenzitású lézerimpulzusok továbbítására kifejlesztett, nagy módusátmérőjű, tömör magú fotonikus szálak esetén is használható-e ez a módszer, amikor a szál csoportkésleltetés-diszperziója nagyságrenddel nagyobb a légmagú szálakhoz képest. Ismert, hogy a WFT módszernél használt ablakfüggvény szélessége meghatározza a WFT jel spektrális és időbeli felbontását is, melyek szorzata állandó. Ebből következik, hogy úgy kell megválasztani az ablakfüggvény szélességét, hogy megtaláljuk a megfelelő kompromisszumot a spektrális és az időbeli felbontóképesség értéke között.

Ebben a dolgozatban megvizsgáljuk egy nagy módusátmérőjű (large mode area, LMA), tömör magú fotonikus kristályszál esetében, hogy hogyan változik a WFT jel időbeli szélessége, és így a diszperziós együtthatók mérési pontossága az ablakfüggvény-szélességének változtatásával, figyelembe véve a szál csoportkésleltetés-diszperziójának hatását is.

2. Elméleti áttekintés

A spektrálisan bontott interferometriában a kísérleti elrendezés egy széles spektrumú fényforrással megvilágított kétsugaras interferométerből és a kimenetén elhelyezett spektrométerből áll. Az

interferométer egyik karjába kerül a vizsgálandó optikai elem, míg a másik, referenciaként szolgáló karban egy késleltető elem segítségével az interferométer két karja közötti időbeli késés állítható. Nem túl nagy τ időbeli késés esetén a két karból kilépő fénynyaláb interferenciájának következtében modulált spektrum jelenik meg a spektrométer kimenetén, melyet az

$$I(\omega) = I_r(\omega) + I_s(\omega) + 2\sqrt{I_r(\omega)I_s(\omega)} \cos(\Phi(\omega)), \quad (1)$$

összefüggés ír le, ahol $I_r(\omega)$ és $I_s(\omega)$ a referencia- és a tárgykarból érkező fényhullám spektrális intenzitása, míg $\Phi(\omega)$ a két kar közötti spektrális fáziskülönbség:

$$\Phi(\omega) = \varphi(\omega) + \omega\tau, \quad (2)$$

ahol $\varphi(\omega)$ a minta spektrális fázisfüggvényét jelöli, $\omega\tau$ pedig az interferométer két karja közötti geometriai úthosszkülönbségből származó fázis tag. A vizsgált optikai elem diszperzióját szokásosan a $\varphi(\omega)$ fázisfüggvénynek egy ω körfrekvencia körüli sorfejtésével kapott Taylor-sorának együtthatói jellemzik. Ha az optikai elemnek az impulzus időbeli alakjára gyakorolt hatását nézzük, akkor a csoportkésleltetés (GD , $d\varphi/d\omega$), a csoportkésleltetés-diszperzió (GDD , $d^2\varphi/d\omega^2$), illetve a további magasabb rendű diszperziós tagok, például a harmadrendű diszperzió (TOD) meghatározása is fontos. Vegyük észre, hogy

$$\frac{d\Phi}{d\omega} = \frac{d\varphi}{d\omega} + \tau, \quad (3)$$

azaz a minta csoportkésleltetés függvénye és az interferométer két karjai közötti Φ fázis ω szerinti deriválásával adódó függvény csak egy konstansban, az interferométer két karja közötti, általában ismeretlen értékű τ késleltetésben különbözik.

A spektrális interferogramok kiértékelésére, és ezáltal a spektrális fázis meghatározására a WFT gerincvonal keresésén alapuló algoritmust használjuk. A kiértékelés első lépéseként megszorozzuk az interferogramot a Gauss-görbe alakú ablakfüggvénnyel

$$g(\omega - \Omega) = \exp \left[- \left(\frac{\omega - \Omega}{\Delta\Omega} \right)^2 \right], \quad (4)$$

ahol Ω jelöli az ablakfüggvény középhez tartozó körfrekvenciát, míg $\Delta\Omega$ jellemzi az ablakfüggvény szélességét. Ezt követően az ablakolt interferogramon végrehajtunk egy inverz Fourier transzformációt (IFT):

$$W_l(\Omega, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\omega) g(\omega - \Omega) \exp(i\omega t) d\omega. \quad (5)$$

A kapott Gauss-os időbeli alakú jel maximuma a WFT jel gerincvonalának az adott Ω körfrekvenciánál lévő pontját adja meg. Változtatva az ablakfüggvények Ω központi körfrekvenciáját, ablakolt interferogramok sorozatát kapjuk, amelyeken szintén elvégezve az IFT-t, kirajzolódik a gerincvonal, ami a minta csoportkésleltetés görbéjével egyezik meg egy konstans tagot leszámítva. Az interferométer két karja közötti τ késleltetés változtatásával ez a gerincvonal az időtengely mentén mozog, de az alakja nem változik. A GDD, TOD és az esetleges magasabb rendű diszperziós együtthatókat megkapjuk, ha a gerincvonalra egy polinomot illesztünk. Optikai szálak

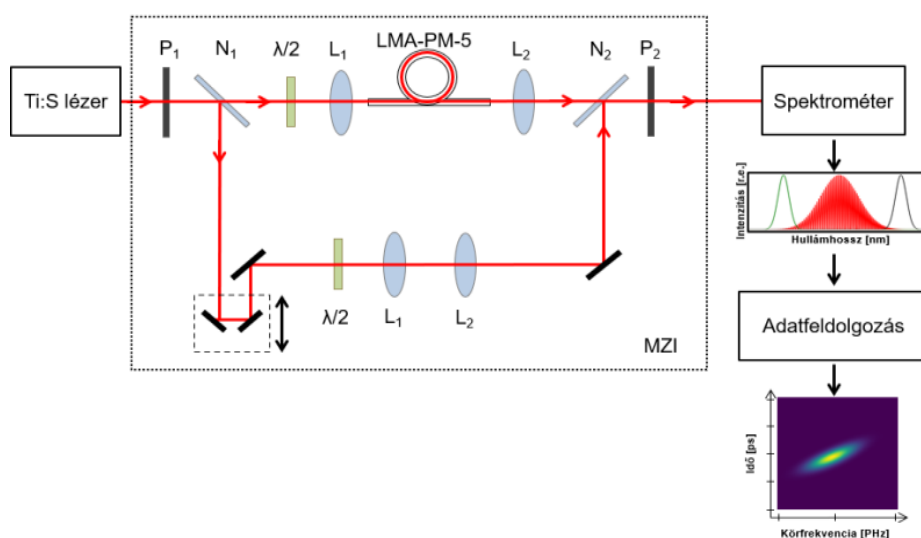
esetében a mért csoportképletetés görbének hullámhossz szerinti deriválásával megkaphatjuk a szálak diszperziójának jellemzésére gyakran használt D diszperziós görbét is:

$$D = -\frac{1}{L} \frac{dGD}{d\lambda}. \quad (6)$$

Az interferogramok WFT-n alapuló kiértékelésekor ügyelni kell arra, hogy az ablakfüggvény $\Delta\Omega$ szélességének megválasztásakor két feltételnek teljesülnie kell: Ω környezetében legyen az interferenciacsíkok amplitúdója közelítőleg állandó, és a spektrális fázisfüggvény jó közelítéssel lineáris legyen. Ha $\Delta\Omega$ -t nagyra választjuk, akkor a WFT jel időbeli szélessége elvileg kicsi lesz, azaz jó lesz az időbeli felbontásunk, feltéve, ha a lineáris közelítés nem sérül. Ha azonban a vizsgált szál diszperziója nagy, akkor már nem lesz érvényes ez a közelítés, így kisebb ablakszélességet kell választani, ami valamennyire viszont rontja az időbeli felbontást. Látható, hogy az optimális ablakszélesség mintánként eltérő lehet.

3. Kísérleti elrendezés

Az alkalmazott kísérleti elrendezés egy szélessávú titán-zafír lézerrel (6fs@ 800 nm, FWHM = 150 nm) megvilágított Mach-Zehnder interferométer, melynek kimenetén egy 0,2 nm spektrális felbontású spektrométer van (1. ábra). A vizsgált mikrostruktúrált optikai szál esetünkben egy 92 cm hosszú, tömör magú, nagy móduskeresztmetszetű fotonikus kristálysál (LMA-PM-5) volt. Annak biztosítása érdekében, hogy az interferométerben terjedő nyaláb lineárisan poláros legyen, az interferométer bemenete elé egy polarizátor került. A tárgykarban a szál elé helyezett félhullámlemezlemez lehetett beállítani, hogy a szál két polarizációs módusa közül melyik gerjesztődjön. A referenciakarbeli félhullámlemez segítségével a referencia impulzus polarizációs síkját a tárgykarból érkezővel párhuzamosra állítottuk. A szálba való fény be- és kicsatolásához egy 30 mm és 19 mm fókusztávolságú NIR akromát lencsét használtunk. Diszperziójuk kompenzálása érdekében ugyanilyen lencsék kerültek a referenciakarba is. A spektrométer kimenetén előállt spektrális interferogram WFT módszerrel alapuló kiértékelése során az interferogramot ablakoljuk az ablak-



1. ábra

A kísérleti elrendezés vázlata, valamint az interferogram feldolgozásának menete. Ti: S: Ti:zafír oszcillátor, MZI: Mach-Zehnder interferométer, P_1 és P_2 : polarizátorok, N_1 és N_2 : nyalábosztók, $\lambda/2$: félhullámlemez, L_1 és L_2 : lencsék.

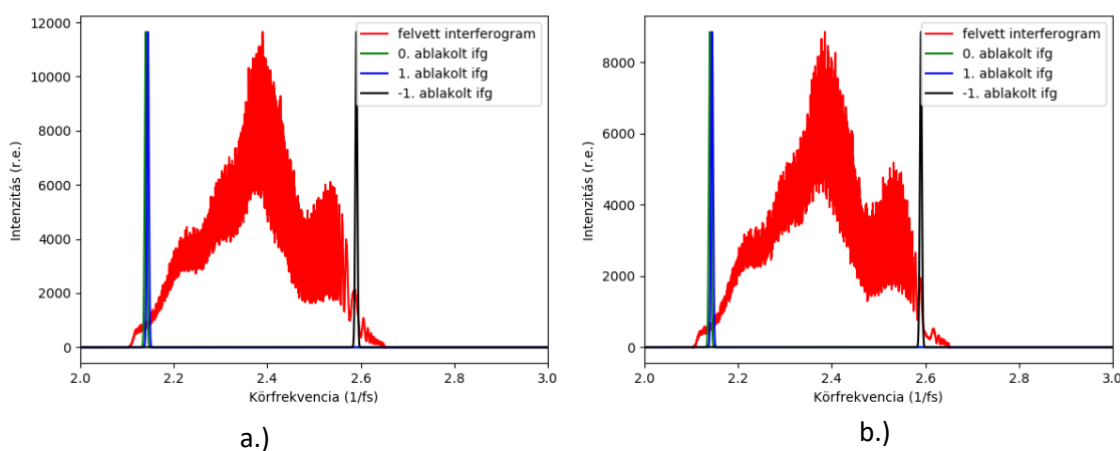
függvény központi körfrekvenciájának változtatásával, ami az ábrán látható végeredményhez hasonló WFT jelet ad.

4. Eredmények

A felvett interferogramok kiértékelését az általunk Python-nyelven írt, ablakolt Fourier-transzformációs gerincvonal keresésen alapuló programmal értékeltük ki. A diszperziós együtthatók minél pontosabb meghatározásában fontos feltétel, hogy a választott ablakfüggvény-szélességben a spektrális fázis lineáris függvénnyel közelíthető legyen, azaz a magasabb rendű diszperziós hatásoknak ne legyen szerepe a központi körfrekvenciák körüli kis tartományban. Mivel a GDD időbeli megnyúlást eredményez, így ideális esetben az összes Ω központi körfrekvenciánál vett ablakolt interferogram inverz Fourier-transzformációjával kapott időbeli jel szélessége a $\Delta\tau \Delta\Omega = \sqrt{8\ln(2)}$ kifejezésből becsülhető. Ezért a programban elhelyeztünk egy olyan részt, ami ennek a közelítésnek az érvényességét vizsgálja.

A kiértékelő programunk ellenőrzése érdekében a vizsgálandó szálhoz hasonló diszperziós együtthatók segítségével szimulált interferogramot értékeltünk ki először. Megfelelő $\Delta\Omega$ mellett a fenti kifejezésből adódó időértéket kapunk a WFT jel minden Ω körfrekvenciaértékénél, és ekkor a várt és kapott csoportképletet görbék jól illeszkedtek. A diszperziós együtthatók közötti különbség a TOD esetén is kisebb, mint 4% volt. Megjegyezzük, hogy nem megfelelő ablakszélesség választása esetén ez az eltérés akár 20%-nál is nagyobb lehet.

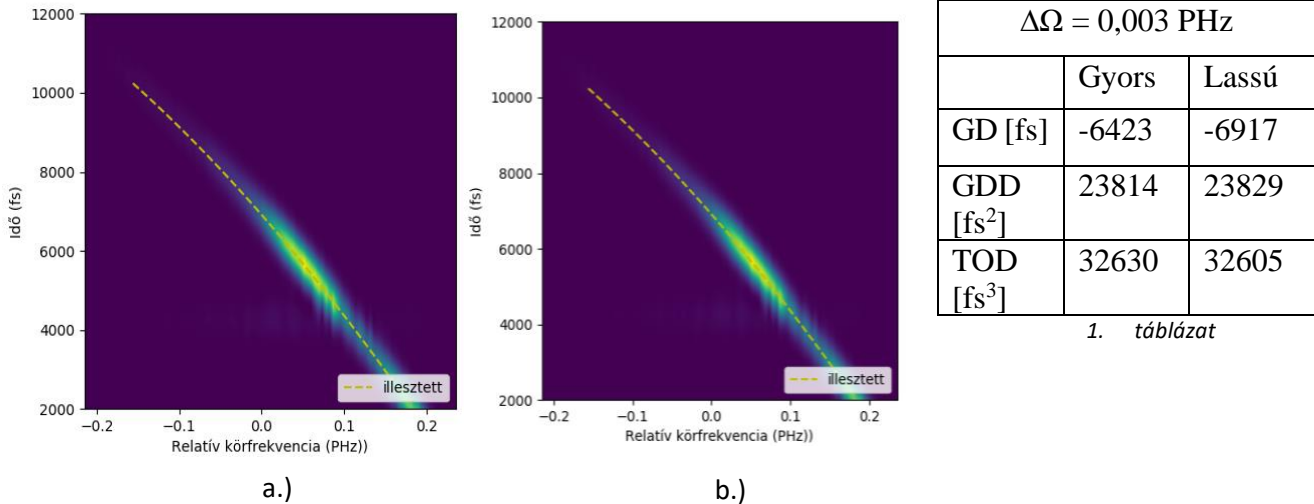
Ezt követően a vizsgálandó LMA szállal kapott interferogramok kiértékelését végeztük el. Mivel a szál a méréseink alapján kettősen törő tulajdonságot mutatott a gyári adatlapjával ellentétben, így először a szál egyik tengelyének polarizációs síkjával párhuzamosra állítottuk a becsatolandó lézerpulzus polarizációs síkját a félhullámlémez segítségével, és ennek a nyalábnak a referenciakarban terjedő nyalábbal történő interferenciát vizsgáltuk. Ezt követően ugyanannál a késleltetőállásnál a szál másik tengelyére történő hasonló beállítással vettük fel az interferogramot. Egy ilyen felvett interferogram párt mutat a 2. ábra az első két szomszédos és utolsó ablakfüggvénnyel. A két interferogram kiértékelésekor azonos ablakfüggvény szélességet és ablakolandó tartományt használtunk.



2. ábra

Azonos késleltetésnél felvett interferogram az első két szomszédos és az utolsó ablakfüggvénnyel a szál a) gyors, b) lassú tengelyére

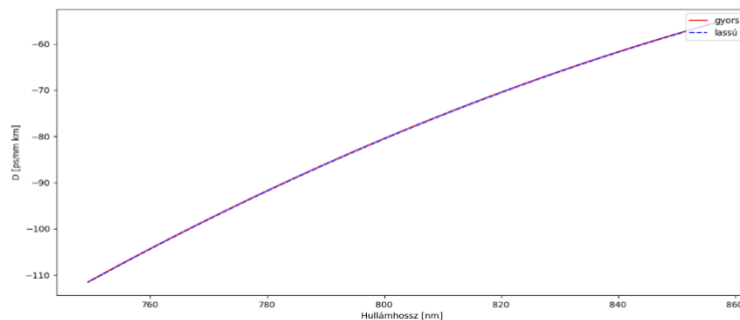
Az ablakfüggvény Ω központi körfrekvenciával ezen körfrekvencia-tartományon végig haladva, majd a kapott ablakolt interferogramok inverz Fourier-transzformációjával előállított WFT jelet polinommal megillesztve meghatároztuk a szál két tengelyére vonatkozó csoportkésleltetés görbéket, melyek a 3. ábrán láthatók. A kapott diszperziós együtthatókat az 1. táblázatban foglaltuk össze.



3. ábra

WFT jel a csoportkésleltetés görbével a) a szál gyors, b) a szál lassú tengelyére.

Látható, hogy a két tengelyre adódó csoportkésleltetés görbe azonos lefutású, csupán eltérő csoportkésleltetésű, aminek eredményeképpen a két polarizációs tengely menti terjedésre vonatkozó *GDD* és *TOD* értékek páronként közel egybeesnek. Ebből következik, hogy a két tengelyhez tartozó *D* görbék (4. ábra) is gyakorlatilag egybeesnek.



4. ábra

A szál gyors és lassú tengelyére kapott *D* diszperziós görbék

5. Összefoglalás

Továbbfejlesztettük az ablakolt Fourier-transzformáció gerincvonalkereső algoritmusán alapuló kiértékelő programunkat, mely így alkalmas tömör magú, nagydiszperziójú optikai szálak mérésére is. A program a kiértékelés során folyamatosan visszajelzést ad, hogy a WFT eljárásban használt lineáris közelítés teljesül-e, és ennek megfelelően a mérést végző személy módosíthatja az ablakfüggvény szélességét.

A kiértékelő programunk alkalmazhatóságát egy kettősen törő LMA szál mindkét polarizációs tengelye mentén végzett diszperziómérés során demonstráltuk. Azt találtuk, hogy a két polarizációs irány menti terjedésnél a *GDD* és a *TOD* értékei hibahatáron belül egyeznek, azonban a két polarizációs módus esetén a csoportkésleltetés jelentős eltérést mutat. Megállapítottuk, hogy a szálak

diszperzióját jellemző D görbe a két polarizációs irányban szinte teljesen megegyezik, azaz a szálból kilépő impulzusalak mindkét polarizációs irányt tekintve azonos lesz.

Köszönetnyilvánítás

A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg. **EFOP-3.6.2-16-2017-00005** - „Ultragyors fizikai folyamatok atomokban, molekulákban, nanoszerkezetekben és biológiai rendszerekben”.

Az ELI-ALPS projekt (GINOP-2.3.6-15-2015-00001) az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Irodalom

[1] P. St. J. Russel, *Science* **299**, 358 (2003).

<https://doi.org/10.1126/science.1079280>

[2] W. Göbel, A. Nimmerjahn, and F. Helmchen, *Opt. Lett.* **29**, 1285 (2004).

<https://doi.org/10.1364/OL.29.001285>

[3] T. Grósz, A. P. Kovács, M. Kiss, and R. Szipőcs, *Appl. Opt.* **53**, 1929 (2014).

<https://doi.org/10.1364/AO.53.001929>

[4] Q. Kema, *Opt. Lasers Eng.* **45**, 1186 (2007).

<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2006.11.005>

[5] T. Grósz, M. Horváth, and A. P. Kovács, *Opt. Express* **25**, 28459 (2017).

<https://doi.org/10.1364/OE.25.028459>