

B3720

PhD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**OPTIKAI ELEMEEK FÁZISTULAJDONSÁGAINAK  
INTERFEROMETRIKUS VIZSGÁLATA**

Írta:

**KOVÁCS ATTILA**



**Szegedi Tudományegyetem**  
**Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék**  
**Szeged, 2000**

## I. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK, CÉLKITŰZÉSEK

A rövid impulzusok előállítása az első lézerek megjelenése óta a lézerfizika egyik fontos területét alkotja. Az e téren végzett kutatómunka eredményességét jelzi, hogy az eltelt több mint három évtized alatt a lézerimpulzusok időbeli hosszát a kezdeti néhány milliszekundumos időtartamról közel tizenkét nagyságrenddel sikerült csökkenteni. Napjainkra a módusszinkronizált szilárdtest-lézerekkel lehetővé vált stabil, 7-8 femtoszekundumos, az ún. fehér fény kontinuum keltéssel pedig már 4.6 fs-os impulzusok előállítása.

Ilyen rövid impulzusok előállításánál illetve alkalmazásánál a használt optikai elemek anyagi illetve szögdiszperziója, azaz hogy az optikai elem anyagát jellemző törésmutató illetve az optikai elemén eltérülő fénysugár eltérítési szöge függ a hullámhossztól, sokkal komolyabb problémát okozhat, mint a nano- vagy pikoszekundumos impulzusok esetében. Ennek oka, hogy míg egy 800 nm központi hullámhosszú, 5 ps-os impulzus spektrális sáv szélessége a 0.1 nm-es nagyságrendbe esik, addig egy 5 fs-os impulzusé már meghaladja a 100 nm-t. Ezért ha egy pikoszekundumos impulzus halad keresztül diszperzív közegen, akkor az impulzust alkotó spektrális komponensek egymáshoz viszonyított fázisa a kis sáv szélesség miatt kevésbé változik meg, mint egy femtoszekundumos impulzus esetében. Mivel a lézerek fényerősítő közege és a lézernyaláb tereléséhez használt optikai elemek rendszerint diszperzivek, ezért a femtoszekundumos impulzusok előállításánál illetve alkalmazásánál *az optikai elemeknek az impulzus fázisszerkezetére gyakorolt hatását, vagy más szóval fázistolajdonságát pontosan kell ismerni.*

Ennek jellemzésére az optikai elem ún. csoportképletetésének, azaz a fázistolás frekvencia szerinti első deriváltjának a frekvenciafüggését szokták megadni. Az utóbbi időben azonban egyre jobban elterjedt a második derivált, a csoportképletetés-diszperzió használata, ugyanis az impulzus torzulását okozó magasabb rendű fázisderiváltak jelenléte jobban látszik, ha nem a csoportképletetésnek, hanem a csoportképletetés-diszperzióknak a frekvenciafüggését vizsgáljuk.

A lézerek fényerősítő közegének diszperzióját leggyakrabban ún. prizmás impulzuskompresszorral kompenzálják. A prizmakar annyira tolják bele a fényútba, hogy a kompresszor csoportképletetés-diszperziójának az impulzus központi hullámhosszán vett értéke éppen minuszegyszerese legyen a közegének. A szinkronpumpált módusszinkronizált lézerek esetében azonban a prizmak beállításakor arra is ügyelni kell, hogy a rezonátor körüljárási ideje, vagyis a mi szóhasználatunkkal élve a csoportképletetés pontosan megegyezzen a gerjesztő lézer ismétlési frekvenciájából adódó értékkel. Eddig e két feltétel

teljesítése csak több lépésben volt megoldható. Jelen értekezés egyik célja *a prizmás impulzuskompresszor fázistulajdonságainak vizsgálatán keresztül egyszerűbb beállítási mód megadása.*

Az elmúlt évek során egyre nagyobb teret hódított egy olyan új elrendezésű szilárdtest-lézer, ahol a lézerkristály csoportképletetés-diszperzióját prizmás kompresszor helyett speciálisan tervezett dielektrikumtűkrök, ún. fáziskorrigáló tűkrök kompenzálják. E tűkrök alkalmazásával lehetővé vált egy stabilabb működésű, kompaktabb, szub-10 fs-os lézer előállítása. Sajnos a tűkrök használatakor komoly problémát jelent, hogy a jelenlegi párologtatási technikák nem tudják garantálni, hogy a kész tűkrök valóban a tervezett csoportképletetés-diszperzióval rendelkezzenek. Ezért tűkrökompensált lézert csak előzőleg *lemért diszperziójú* tűkrökből érdemes építeni. Ennek alapján további célom volt *egyszerű, de nagy pontosságú interferometrikus elrendezések kifejlesztése a fáziskorrigáló lézertűkrök csoportképletetés-diszperziójának mérésére.*

A szilárdtest-lézerek fejlesztése során egyre újabb és újabb kristályokat alkalmaznak fényerősítő közegként. A tűkrökompensált lézerek építésénél, *mint az a fentiekből már kiderült, a megfelelő csoportképletetés-diszperziójú tűkrök kiválasztásához a kristály diszperzióját is jól kell ismerni.* Némely kristályról azonban a szakirodalomban nem találunk adatot, illetve amint azt a kísérleti tapasztalatok mutatják, a feltüntetett adatok nem megbízhatók. Ezért célom volt *néhány, a tűkrökompensált lézerek építésénél szóbajöhető lézerkristály diszperziós értékeinek meghatározása is.*

A lézertűkrök illetve kristályok csoportképletetésének mérésére már több interferometrikus módszert is kifejlesztettek, azonban azokkal a módszerekkel a megfelelő pontosság csak bonyolult elrendezéssel, költséges eszközök használatával érhető el.

Létezik azonban egy módszer, az ún. spektrálisan bontott fehér fényű interferometria, melyet eddig még ilyen célra nem használtak, azonban egyszerű, és ami számunkra különösen fontos, hogy bizonyos elrendezésben a kapott interferenciacsíkok alakja mutatja a vizsgált minta diszperziójának menetét. E kedvező tulajdonságok mellett azonban komoly probléma, hogy a pontossága nem éri el az általunk igényelt mértéket.

*Jelen értekezés témája tehát egyrészt egy klasszikus interferometrikus technika, a spektrálisan bontott fehér fényű inuferometria továbbfejlesztése fáziskorrigáló tűkrök illetve lézerkristályok diszperziójának mérésére, melyhez szükséges az "üres" interferométer esetén létrejövő interferenciacsíkok tulajdonságainak tanulmányozása is, másrészt a prizmás impulzuskompresszorok diszperziós tulajdonságainak vizsgálata.*

## II. A VIZSGÁLATOKNÁL HASZNÁLT ESZKÖZÖK. MÓDSZEREK

A prizmás kompresszor fázisderiváltjainak elméleti meghatározásánál a Martinez által bevezetett formalizmust használtam, mely jelentősen egyszerűsítette a számolásokat. A kapott eredmények kísérleti ellenőrzésénél az ún. repülési idő interferométert használtuk. A fényforrás egy  $N_2$  lézerrel gerjesztett festéklézer volt  $\Delta\lambda=10$  nm-es sávszélességgel.

A spektrálisan bontott fehér fényű Michelson interferométert alap optikai elemekből házilag állítottam össze. Az interferométer kivilágítására fehér fényforrásként egy közönséges 100 W-os halogén lámpát használtam, a referencia tükör egy elhanyagolható diszperziójú,  $\lambda/10$ -es felületi minőségű arany tükör volt. A vizsgált fáziskorrigáló tükörknél is alapkövetelmény a  $\lambda/10$ -es felületi minőség.

A fehér fényű interferogram spektrális bontásához egy lencséből, egy rácsból és egy CCD chipből álló spektrográfort állítottam össze. A spektrálisan bontott interferenciacsíkok dőlésének tanulmányozásakor 600 vonal/mm-es reflexiós rácsot használtam. A diszperzív fáziskorrigáló lézertükrök illetve a lézerkristályok vizsgálatánál azonban egy 200 vonal/mm-es transzmissziós rácsot alkalmaztam, mivel így a teljes 700-900 nm-es hullámhossztartomány ráesett a detektorra, mely egy EDC-1000 típusú CCD chip volt (165 x 196 pixel).

A CCD kamerával kapott képek kiértékeléséhez a spektrálisan bontott interferenciacsíkok dőlésénél egy saját készítésű programot, míg a diszperzív tükrök és a kristályoknál kapott interferogramok kiértékeléséhez a Szipőcs Róbert kollégám által írt programot használtam. Ezek a programok egy hagyományos személyi számítógépen futottak, a kiértékelés néhány percet vett igénybe.

A vizsgált tükrök felületi egyenetlenségének meghatározása az Optikai és Kvantumelektronikai Tanszéken található Atomi Erő Mikroszkóppal (TMX 2000) történt.

A Fabry-Perot interferométerre épülő elrendezésnél a spektrális bontásához egy DFS-8 típusú spektrográfort használtunk, mivel a fent említett házi készítésű spektrográf felbontóképessége nem volt megfelelő. A spektrálisan bontott interferogram kiértékelése egy Zeiss-típusú komparátorral történt.

### III. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. *A prizmás impulzuskompresszor fázistulajdonságainak elméleti vizsgálatán keresztül igazoltam, hogy létezik egy olyan irány, az ún. izokronikus irány, amely mentén a kompresszor prizmáját mozgatva a csoportképletelés-diszperzió értéke beállítható úgy, hogy közben a csoportképletelés állandó marad [1,5,12].* Az izokronikus irányra általam meghatározott formulából adódó értékkel a kísérleti eredmények jó egyezésben voltak. Amennyiben a prizmát az izokronikus irány mentén mozgatjuk, a szinkronpumpált lézerek beállítása egyszerűsödik.

2. Összeállítottam egy spektrálisan bontott fehér fényű (SBFF) interferométert, mely egy fehér fényvel kivilágított Michelson interferométerből és egy egyszerű spektrográf kombinációjából állt. Az interferométer egyik tükrét vízszintes tengely körül megdöntve, a karhosszkülönbség változtatásakor az SBFF interferenciacsíkok meredeksége változott. *Az SBFF interferenciacsíkok kialakulását leíró egyszerű modell segítségével meghatároztam az SBFF csíkok meredeksége és a karhosszkülönbség közötti kapcsolatot, melynek helyességét kísérleti eredményekkel is igazoltam [2,13].*

Az SBFF interferenciacsíkok meredeksége és a karhosszkülönbség közötti összefüggés segítségével szemléletes magyarázatot adtam a fehér fényű interferenciacsíkok láthatóságának változására.

3. *Kidolgoztam egy, az SBFF Michelson interferométeren alapuló módszert a fáziskorrigáló lézertükrök csoportképletelésének mérésére [3,6,7,10,14].* A módszer lényege, hogy a tükrök csoportképleteléséről az információt az SBFF interferenciacsíkok alakja hordozza, melynek pontos meghatározásához az SBFF interferogram intenzitáseloszlására hullámhosszanként koszinuszfüggvényeket illeszttem. A csoportképletelés az illesztésből kapott fázisfüggvény numerikus deriválásával adódott.

A vizsgálandó tükröket az interferométerbe páronként helyeztem be, hogy négyszeres reflexióval a mérés pontosságát megnöveljem. Ennek eredményeképp *a relatív csoportképletelést  $\pm 0.2$  fs-os időbeli feloldással határoztam meg 1 nm-enként a 700-900 nm-es hullámhossztartományon.*

Részt vettem *a Fabry-Perot interferométerre alapuló SBFF módszer továbbfejlesztésében is, mellyel szintén  $\pm 0.2$  fs-os pontossággal határoztuk meg a vizsgált lézertükrök csoportképletelését. A kiértékeléshez a jelenleg ismert módszerekkel ellentétben nem volt szükség bonyolult számítógépes illesztési eljárásokra [4,7.8.15].*

4. *A Michelson interferométeren alapuló módszer esetén az SBFF interferenciacsíkok alakja és a tükrök csoportképletetése közötti kapcsolatra egy egyszerű, közelítő kifejezést adtam, melynek alapján lehetőség van a tükrök csoportképletetés-diszperziójának gyors, vizuális ellenőrzésére pusztán az SBFF interferogram megfigyelése alapján [11].*

5. *Az SBFF Michelson interferométer egy másik változatával — nincs megdörntve egyik tükrő sem és a kristály fázistolajdonságainak jellemzői az SBFF interferogram hullámhossz-tengely menti metszetéből adódnak — meghatároztam egy Ti:zafir és két, eltérő (0.8% és 2.0%) Cr<sup>3+</sup> adalékoltságú Cr:LiSAF kristály csoportképletetés- illetve harmadrendű diszperzióját [9,10,16]. A csoportképletetés-diszperzió mérésének pontossága = 1%, míg a harmadrendű diszperzióé ± 8% volt.*

*A Ti:zafir kristálnál a mérési eredmények jó egyezésben voltak a szakirodalomban található törésmutató polinomból számolható értékekkel. A Cr:LiSAF kristályok esetében azonban jelentős eltérést tapasztaltam nemcsak az irodalomban közölt polinomból adódó értékektől, hanem a két kristály mért értékei között is. Ez utóbbi eredmények, valamint Uemura 1.5%-os adalékoltságú Cr:LiSAF kristályra vonatkozó, 1998-ban közölt mérései alapján arra következtettem, hogy a Cr:LiSAF kristály diszperziója függ a Cr<sup>3+</sup> adalékoltságtól.*

6. *A Cr:LiSAF kristály mért és számolt fázisderiváltjai közötti jelentős eltérés eredetének tisztázására összehasonlítottam a Cr:LiSAF, valamint néhány, gyakrabban használt ketőstörő kristály törésmutató-deriváltjainak hányadosait, melyeket a szakirodalomban közölt törésmutató polinomokból számoltam. Azt találtam, hogy a Cr:LiSAF kristályra számolt törésmutató-deriváltak hányadosai jelentősen eltérnek a többi kristályétól. E tény, továbbá az 5. pontban említett eredmények alapján arra következtettem, hogy a Cr:LiSAF kristály irodalomban közölt polinomja hibás.*

#### IV. AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSI LEHETŐSÉGEI

A spektrálisan bontott fehér fényű Michelson interferométerből egy példány megtalálható az MTA Szilárdtestfizikai Kutatóintézetében a vákuumpárolgató szomszédságában. A készülék felállítása óta Szipőcs Róbert kollégám ily módon közvetlenül a párolgató után tudja mérni a fáziskorrigáló tükrök csoportképletetés-diszperzióját, ami

lehetővé tette, hogy a párologtatás sajátosságainak kiismerésével valóban a tervezett diszperziójú tükrök készüljenek el.

A Cr:LiSAF kristály diszperziójának méréséből kiderült, hogy a kristály korábban közölt törésmutató polinomja hibás. Ezt a problémát Sorokina és munkatársai a tükrökompenzált Cr:LiSAF lézer kifejlesztésénél is észlelték. A kristály általunk mért diszperziós értékei alapján azonban sikerült megfelelő fáziskorrigáló tükröt készíteni és így megépíteni a lézert. A méréseinkből az is kiderült, hogy a kristály diszperziója függ az adalékoltságtól is. Az elmúlt években az érdeklődés középpontjába került lézerekristályoknál az irodalomban található polinomok csak egy adott adalékoltságra vonatkoznak. Ezért ha valaki tükrökompenzált lézert épít, célszerű a beépítendő kristály diszperzióját előtte megmérni pl. az általunk kidolgozott módszerrel.

## V. AZ ÉRTEKEZÉS ALAPJÁT KÉPEZŐ KÖZLEMÉNYEK

*Nemzetközi referált folyóiratokban megjelent cikkek:*

1. Z. Bor, K. Osvay, H. A. Hazim, A. Kovács, G. Szabó, B. Rácz, and O.E. Martinez:  
*Adjustable prism compressor with constant transit time for synchronously pumped mode locked laser*  
Opt. Commun. 90 (1992) 70
2. A. P. Kovács, K. Varjú, K. Osvay, and Zs. Bor:  
*On the formation of white-light interference fringes*  
Am. J. Phys. 66 (1998) 985
3. A. P. Kovács, R. Szipőcs, K. Osvay, and Zs. Bor:  
*Group delay measurement on laser mirrors by spectrally resolved white light interferometry*  
Opt. Lett. 20 (1995) 788
4. K. Osvay, G. Kurdi, J. Hebling, A. P. Kovács, Z. Bor, and R. Szipőcs:  
*Measurement of the group delay of laser mirrors by a Fabry-Perot interferometer*  
Opt. Lett. 20 (1995) 2339

*Nemzetközi konferenciákon bemutatott publikációk:*

5. K. Osvay, Z. Bor, A. Kovács, G. Szabó, B. Rácz, H.A. Hazim, and O.E. Martinez:  
*Prismatic Pulse Compressor for Synchronously Pumped Mode Locked Lasers*  
Ultrafast Processes in Spectroscopy 1991, IOP Conf. Ser. 126 (1992) 169
6. A. P. Kovács, R. Szipőcs, K. Osvay, and Z. Bor:  
*Group delay dispersion measurement of laser mirrors by spectrally resolved white light interferometry*  
Ultrafast Phenomena IX, Springer Series in Chemical Physics 60 (1994) 145

7. A. P. Kovács, G. Kurdi, K. Osvay, R. Szipöcs, J. Hebling, and Z. Bor:  
*New interferometric methods for group-delay measurement using white-light illumination*  
Ultrafast Process in Spectroscopy 1995, Plenum Press (1996) 607
8. K. Osvay, G. Kurdi, A. P. Kovács, R. Szipöcs, and Z. Bor:  
*High precision measurement of group delay dispersion on laser mirrors*  
Conference on Lasers and Electro-Optics, 1995, Baltimore, USA, paper CFM8
9. R. Szipöcs, A. P. Kovács, and Zs. Bor:  
*Dispersion measurement on crystals for ultrashort pulse generation with use of interference in the frequency domain*  
Conference on Lasers and Electro-Optics, 1997, Baltimore, USA, paper CTuP32
10. Zs. Bor, A. P. Kovács, K. Osvay, and R. Szipöcs:  
*Measurement of dispersive properties of optical materials and mirrors using spectrally resolved white-light interferometry*  
International Conference on Optical Diagnosis of Materials and Devices for Opto-, Micro-, and Quantum Electronics, 1997, Kijev, Ukrajna, SPIE 3359 (1998) 132
11. A. P. Kovács, Zs. Bor, and R. Szipöcs:  
*Reshaping of the spectrally resolved white-light fringes caused by dispersion*  
5<sup>th</sup> Congress on Modern Optics, 1998, Budapest, SPIE 3573 (1998) 588

*Hazai konferenciákon bemutatott publikációk:*

12. Kovács A., Osvay K., Bor Zs., Szabó G., Rácz B., H. A. Hazim, O.E. Martinez:  
*Prizmás impulzus-kompresszor szinkronpumpált lézerekhez*  
Kvantumelektronika '91, 1991, Budapest, paper P19
13. Kovács A. P., Varjú K., Osvay K., Bor Zs.:  
*Spektrálisan bontott fehér fényű interferenciacsíkok dőlése*  
Kvantumelektronika '97, 1997, Budapest, paper P5
14. Kovács A. P., Szipöcs R., Osvay K., Bor Zs.:  
*Dielektrikum tükrök csoportképletés-diszperziójának mérése fehérfényű-interferométerrel*  
Kvantumelektronika '94, 1994, Budapest, paper 66
15. Osvay K., Bor Zs., Kurdi G., Szipöcs R., Kovács A.:  
*Lézertükrök csoportképletésének mérése Fabry-Perot interferométerrel*  
Kvantumelektronika '94, 1994, Budapest, paper 67
16. Szipöcs R., Kovács A. P., Bor Zs.:  
*Lézertükrök csoportképletés-diszperziójának mérése*  
Kvantumelektronika '97, 1997, Budapest, paper P3



## VI. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ TOVÁBBI FONTOSABB PUBLIKÁCIÓK

- Z. L. Horváth, Zs. Benkő, A. P. Kovács, H. A. Hazim, and Zs. Bor:  
*Propagation of femtosecond pulses through lenses, gratings and slits*  
Opt. Eng. 32 (1993) 2491
- J. A. Fülöp, A. P. Kovács, and Zs. Bor:  
*Dispersion-compensated two-pass arrangement for second harmonic generation of femtosecond pulses*  
Laser Physics 10 (2000) 437
- R. Szipöcs, A. Köházi-Kis, S. Lakó, P. Apai, A. P. Kovács, G. DeBell, L. Mott, A. W. Louderback, A. V. Tikhonravov, and M. K. Trubetskov:  
*Negative dispersion mirrors for dispersion control in femtosecond lasers: chirped dielectric mirrors and multi-cavity Gires-Tournois interferometers*  
Appl. Phys. B 70 (2000) 51