

## Ultrarövid lézerimpulzusban jelenlevő terjedési irány és fázisfront szögdiszperzió mérése

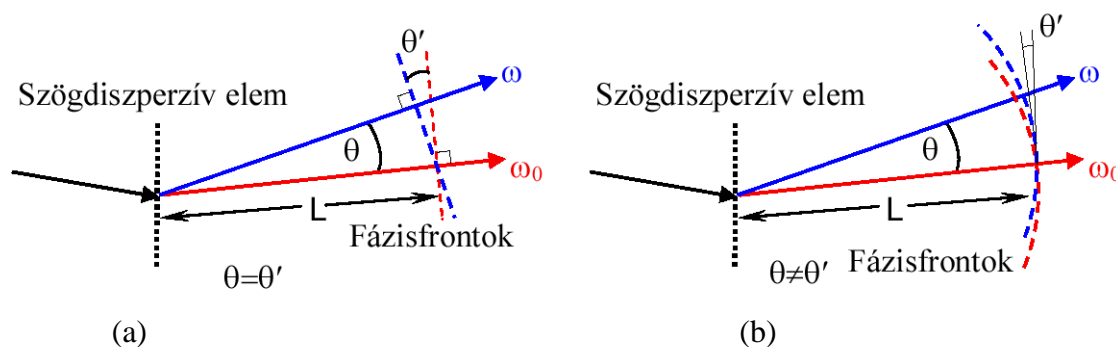
### I. Elméleti összefoglaló

Napjainkban ultrarövid, azaz femtoszekundumos nagyságrendbe eső fényimpulzusokat előállító lézereket már nemcsak lézerfizikai laboratóriumokban, hanem kémiai, biológiai, műszaki és orvostudományi kutatásoknál is egyre gyakrabban használnak. Az ultrarövid impulzusok idő- és térbeli alakja, míg eljutnak a lézertől a céltárgyig, jelentősen torzulhat, ami a kísérletek eredményeit jelentősen befolyásolhatja. Ezért fontos, hogy minél pontosabban ismerjük a torzulások okait és jellemzőit.

A torzulás egyik oka lehet az alkalmazott optikai elemek anyagi diszperziója, amelynek az impulzus időbeli alakjára gyakorolt hatását ún. impulzuskompresszorokkal elég jó hatásfokkal lehet kompenzálni. Akkor is torzulhat azonban az impulzus, ha az alkalmazott optikai elem vagy elemekből felépített eszköznek szögdiszperziója van, azaz a rajta áthaladó impulzusnak a különböző színű spektrális komponensei eltérő irányban terjednek az optikai elem után. Ilyen optikai elem lehet egy prizma, egy diffrakciós rács vagy egy akusztó-optikai deflektor, illetve a prizmákból vagy rácsokból álló, kissé pontatlanul beállított impulzusnyújtó vagy kompresszor.

#### I.1. A szögdiszperzió kétféle értelmezése

Az anyagi diszperzió esetében az impulzus kiszélesedése azért következik be, mert az impulzust alkotó, egy irányban terjedő, különböző hullámhosszú monokromatikus hullámok egymáshoz viszonyított fázisa megváltozik, mivel eltérő fázissebességgel terjednek a közegben. Fáziskülönbség lép fel azonban akkor is, ha a monokromatikus hullámok ugyanolyan sebességgel terjednek, de különböző irányban. Ez a helyzet áll elő, amikor az impulzus egy szögdiszperzív elem (prizma, rács) halad keresztül.

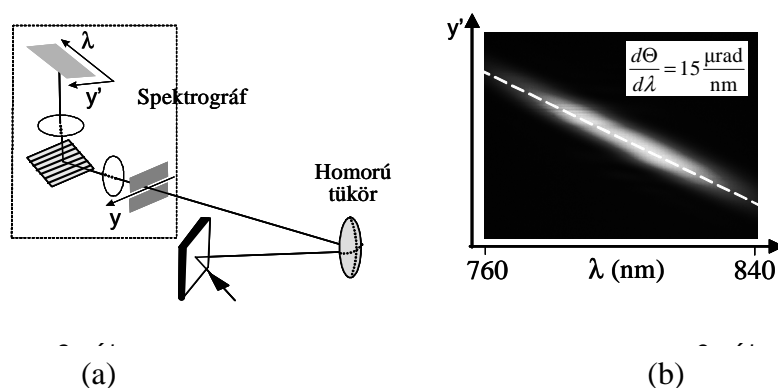


1. ábra A szögdiszperzió kétféle értelmezése.

Az irodalomban a szögdiszperziót kétféle módon definiálják (1. ábra). Az egyik definíció szerint a szögdiszperzió a fény terjedési irányának frekvenciafüggését ( $d\theta/d\omega$ ) jelenti (terjedési irány szögdiszperzió), míg a másik definíció szerint a különböző frekvenciájú monokromatikus hullámok fázisfrontjai által bezárt szög frekvenciafüggését ( $d\theta'/d\omega$ , fázisfront szögdiszperzió). E két definíció által adott eredmény között síkhullámok esetén nincs különbség (1.a ábra), ellentétben a Gauss-nyalábokkal (1.b ábra). További fontos különbség a két mennyiség között, hogy míg a fázisfront-szögdiszperzió az impulzusfront dőlését, addig a terjedési irány szögdiszperziója az idő- és térbeli fázismodulációt határozza meg.

## I.2. A terjedési irány szögdiszperzió mérése

A terjedési irány szögdiszperzió méréséhez egy leképező spektrográfot használunk (2. ábra). A vizsgálandó nyalábot egy fókuszáló elemmel (akromátlensével vagy homorú tükörrel) lefókuszáljuk a spektrográf részére. Az impulzust alkotó spektrális komponensek a terjedési irány szögdiszperzió miatt különböző irányokban haladnak, ezért a lencse fókusz síkjában, azaz a spektrográf résén különböző helyekre fókuszálódnak. Emiatt a spektrográf detektorán, egy CCD chipen detektált spektrum megdől (2.b ábra). A dőlési szög arányos a szögdiszperzióval és a lencse fókusztávolságával. A spektrográf paramétereinek megfelelő megválasztásával akár 0,2  $\mu\text{rad}/\text{nm}$ -es pontosság is elérhető. Ez a technika valós idejű mérést tesz lehetővé, így alkalmas impulzusnyújtók és kompresszorok nagy pontosságú beállítására.



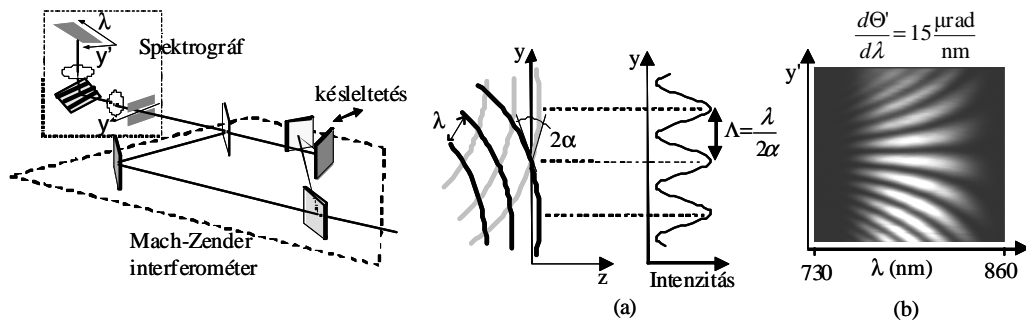
2. ábra Terjedési irány szögdiszperzió mérési elrendezése. (b) A szögdiszperzió miatt megdőlt a spektrum.

A mérés során felvesszük a megdőlt spektrumot. A MathCad program segítségével veszünk egy-egy függőleges metszetet a rövidebb illetve a hosszabb hullámhosszú oldalon. A metszeteken a *Trace* parancs segítségével leolvassuk a maximumokhoz tartozó  $y'$  pixel értékeket. Figyelembe véve, hogy egy pixel 4.2  $\mu\text{m}$  magas, és 2-szeres nagyítása van a spektrográfnak, meg tudjuk határozni a  $\Delta y/\Delta \lambda$  hányadost. Tekintettel arra, hogy a szögdiszperzió értéke kicsiny, azaz az impulzus spektrális komponenseinek terjedési iránya által bezárt  $\Delta \Theta$  szög kicsiny, így  $\Delta y = f \Delta \Theta$ . Ezen összefüggésből már adódik a terjedési irány szögdiszperzió értéke:

$$\left. \frac{\Delta \Theta}{\Delta \lambda} \right|_{ii} = \frac{\Delta y'}{2f \Delta \lambda}.$$

## I.3. A fázisfront szögdiszperzió mérése

A fázisfront szögdiszperziójának méréséhez is az említett spektrográfot használjuk, de oly módon, hogy a vizsgálandó lézernyaláb előbb keresztül halad egy Mach-Zender típusú interferométeren (3. ábra). Az interferométer egyik karjában a nyaláb eggyel többször verődik vissza, mint a másik karban, ami azt eredményezi, hogy a spektrográf résén az egyik nyaláb jobb oldala a másik bal oldalára esik. Ha egy kicsit megdöntjük az interferométer egyik tükreét úgy, hogy az interferenciacsíkok a spektrográf vízszintes részére merőlegesen legyenek, akkor a 4.b ábrán látható spektrálisan bontott interferogramot kapjuk. Ha a csíkok görbülnek, azt jelenti, hogy az impulzusnak szögdiszperziója van. A szögdiszperzió kvantitatív meghatározásához a spektrum egyes hullámhosszaihoz tartozó oszlopok mentén meghatározzuk a csíkok  $\Lambda$  periódusát, melyből a fázisfrontok által bezárt szög hullámhosszfüggése adódik.



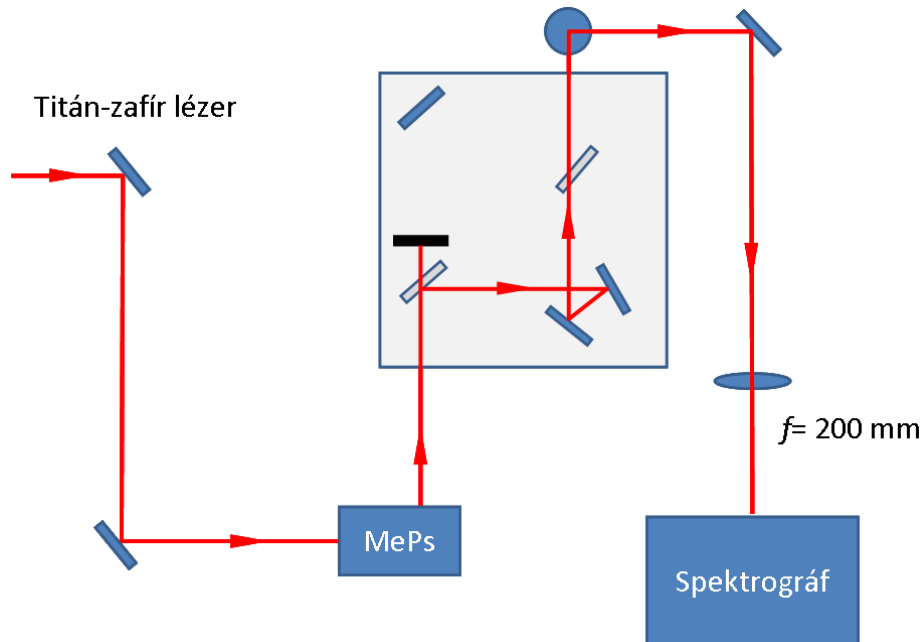
**3. ábra** A fázisfront szögdiszperzió mérésére alkalmas elrendezés. (a) Ha az interferométer két karjából érkező nyalábok fázisfrontjai által bezárt szög a spektrográf belépő részén  $2\alpha$ , akkor az interferenciacsíkok periódusa  $\lambda/2\alpha$ . (b) Egy tipikus spektrálisan bontott interferogram fázisfront szögdiszperzió jelenléte esetén.

## II. Eszközök

- Ti:zafír lézer
- MePs egység
- Leképező spektrográf (CEOptics)
- Prizma
- Akromátlencse ( $f= 200$  mm)
- Tükrök
- Optomechanikai elemek
- EVSCap.exe program a spektrográf kamerájához
- MathCad14 programok

### III. Feladatok

**1. feladat:** Mérje meg a Ti:zafír lézertől érkező impulzusnak a polarizációs síkjában illetve az arra merőleges síkban fellépő terjedési irány szögdiszperzióját!



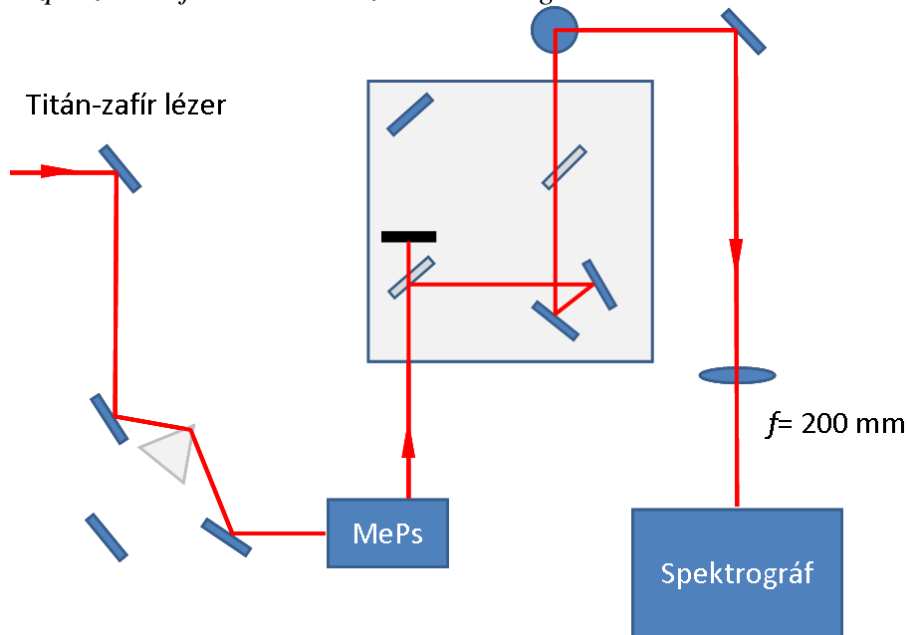
**4 ábra** Elrendezés a Ti:zafír lézertől jövő impulzus terjedési irány szögdiszperziójának méréséhez

Első lépésként összeállítjuk a 4. ábrán látható kísérleti elrendezést. A lézerimpulzus miután néhány tükrön reflektálódik, keresztülhalad a MePs egységen. Ez egy olyan optomechanikai eszköz, mely lehetővé teszi úgy elfordítani 90 fokkal a lézerimpulzus polarizációs síkját, hogy az eszközből kilépő impulzus terjedési iránya ne változzon meg. Első esetben a MePs legnagyobb oldallapja vízszintes az optikai asztal síkjával. Ekkor nem forgatja el a rajta áthaladó lézerimpulzus polarizációs síkját. Az impulzus a MePs után egy fordított karú Mach-Zehnder interferométeren halad keresztül. Bár a terjedési irány szögdiszperzió méréséhez erre az interferométerre nincs szükség, azonban a gyakorlat második felében elvégzendő fázisfront szögdiszperzió méréshez már igen.

Azért, hogy a mérések elvégzése minél kevesebb időt vegyen igénybe, célszerű már az elején egy komplett elrendezést megépíteni. A terjedési irány szögdiszperzió mérésénél a 4. ábrán látható módon az interferométer egyik karját blokkoljuk. Az  $f=200$  mm fókusztávolságú lencse megfelelő helyzetének beállításához előbb elindítjuk az EVSCap programot, mellyel a leképező spektrográf által detektált spektrumot láthatjuk. A lencsének fókusztávolságnyira kell lennie a spektrográf belépő részétől. Mivel nem ismerjük a lencse fősíkjainak helyzetét, így a lencse pontos helyzetének beállításához a mikrométercsavarral mozgatjuk előre-hátra a lencsét addig, amíg a legvékonyabb spektrumot nem kapjuk. Ekkor felvesszük a spektrumot, melynek a dőlési szögét a MathCad-ben megírt programmal határozzuk meg. A dőlési szög ismeretében, figyelembe véve, hogy a kamera chipjén egy pixel  $4,2 \mu\text{m}$  magas, és a spektrográf 2x-es nagyítást is végez, kiszámoljuk a lézerimpulzusban lévő terjedési irány szögdiszperzió értékét.

Ezután a MePs egységet elfordítjuk 90 fokkal a forgástengelye körül, és az egységben lévő billenő tükröt átbillentjük a másik helyzetébe. A mérést a fentiek szerint megismételjük.

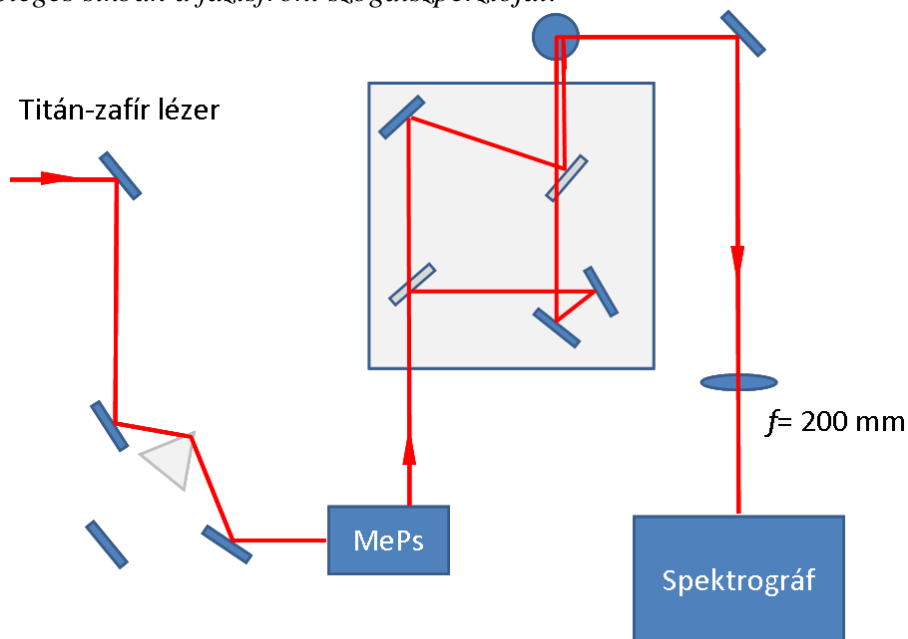
**2. feladat:** Mérje meg a prizmán áthaladt impulzusnak a terjedési irány szögdiszperzióját a prizma szögdiszperziós síkjában illetve az arra merőleges síkban!



**5. ábra** Elrendezés a prizma által a lézerimpulzusban okozott terjedési irány szögdiszperzió mérésére

A mérés elvégzéséhez az 5. ábrán látható módon kiegészítjük a kísérleti elrendezést. A prizma törőszöge 75 fok. A prizmat a minimális deviáció helyzetébe állítjuk. Felvesszük a kapott spektrumot, és az 1. feladatban leírt módon meghatározzuk a szögdiszperzió értékét. Ezután a MePs-et átbillentjük a másik állásába, és ismét felvesszük a spektrumot és meghatározzuk a terjedési irány szögdiszperzió értékét.

**3. feladat:** Mérje meg a prizmán áthaladt impulzusnak a prizma szögdiszperziós síkjában illetve az arra merőleges síkban a fázisfront szögdiszperzióját!



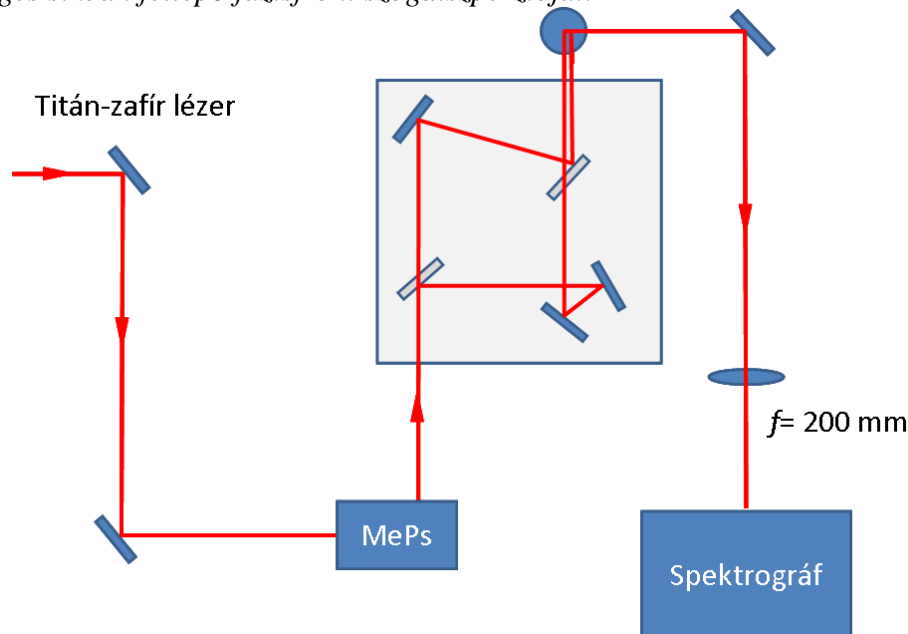
**6. ábra** Elrendezés a prizma által a lézerimpulzusban okozott fázisfront szögdiszperzió mérésére

Megszüntetjük a fenyút blokkolását az interferométerben, melynek a tükeit oly módon állítjuk be, hogy az interferométer kimenetén a két karból érkező fényimpulzus egymás mellett

lépjen ki, és a spektrográf résén találkozzanak össze. Ekkor a monitoron már láthatunk interferenciacsíkokat. Az interferométer nyalábfordító karjában lévő eltolót addig állítjuk, amíg már csak ferdén haladó interferenciacsíkokat látunk. Felvesszük az interferogramot, valamint a két karból érkező fényimpulzus spektrumát. A kiadott MathCad programmal meghatározzuk a fázisfront szögdiszperzióját a lézerimpulzusnak.

Ezután a MePs-et átbillentjük a másik helyzetébe, és megismételjük a mérést.

**1. feladat:** Mérje meg a Ti:zafír lézertől érkező impulzusnak a polarizációs síkjában illetve az arra merőleges síkban fellépő fázisfront szögdiszperzióját!



**7. ábra** Az elrendezés a Ti:zafír lézertől jövő impulzus fázisfront szögdiszperziójának mérésére

A kísérleti elrendezés a 7. ábrán látható, azaz kivesszük a két tükröt a fényútból, melyek a prizma felé irányították a fénynyalábot. A mérés a 3. feladatban leírt módon történik.

**Irodalom:**

[1] K. Varjú, A. P. Kovács, G. Kurdi, K. Osvay, „High-precision measurement of angular dispersion in a CPA laser”, Applied Physics B **74** (2002) S259-S263.  
[2] K. Varjú, A. P. Kovács, K. Osvay, G. Kurdi, „Angular dispersion of femtosecond pulses in a Gaussian beam”, Optics Letters **27** (2002) 2034-2036.