

Ultrarövid impulzusú lézerek és tulajdonságaik

ANDRÁSIK ATTILA

Bevezetés

Napjainkban egyre nagyobb jelentősége van a korszerű technológiák megvalósításában a lézereknek, azon belül is az ultrarövid, 10^{-15} s, azaz femtoszekundumos időtartamú impulzusokat kibocsátó lézereknek. A Szegeden – a tervek szerint pár éven belül – megvalósuló Szuperlézer Kutatóközpont (ELI-ALPS: Electric Light Infrastructure-Attosecond Light Pulse Source) fő profilja a femtoszekundumosnál ezerszer rövidebb, attoszekundumos impulzusok előállítására lesz. Az azokkal végzett kutatási eredményeket nagy sikerrel lehet majd hasznosítani az alapkutatások, a gyógyászat, és az ipari alkalmazások területén is.

Jelen tanulmány célja a lézerek típusait, előnyeit ismertetni a hagyományos fényforrásokkal szemben, áttekintést adni az ultrarövid impulzusok mibenlétéről, és tulajdonságaik vizsgálatáról. Saját kutatásaim az ún. terjedési irány szögdiszperzió vizsgálatára irányultak, mely ultrarövid impulzusoknál nagyon fontos jelenség.

Amikor keresztülmegyünk egy ultrarövid lézerimpulzust egy prizmán, vagy egy optikai rácson, akkor a prizmából kilépő impulzus idő- és térbeli alakja megváltozik annak következtében, hogy a prizma az impulzus különböző színű komponenseit különböző irányokba téríti el. Fázismodulált impulzuserősítésen alapuló lézerekben az erősítő előtt az ún. mag impulzust időben ki kell nyújtani, míg az erősítés után pedig össze kell nyomni. E célra az ún. impulzuskompresszorokat, illetve nyújtókat használják. Ezen eszközökben rendszerint két egymással szembe fordított prizmat vagy rácsot alkalmaznak azért, hogy az impulzusok más-más színű komponensei a kompresszort, nyújtót elhagyva egy irányban haladjanak. Jól beállított prizmapár vagy rács pár esetén az impulzusok különböző színű komponensei időben és térben egymást átfedve haladnak. Ha azonban a beállítás nem tökéletes, akkor az egységet elhagyó impulzus komponenseinek terjedési iránya különböző lesz, azaz fellép a terjedési irány szögdiszperzió, mely a fent említettek szerint impulzusterjedést okoz. Ezért nagyon fontos a terjedési irány szögdiszperzió minél pontosabb mérése.

A terjedési irány szögdiszperzió mérésére általánosan elterjedt módszer a leképező spektrográfon alapul. A módszer nagyon jól használható, amennyiben egy függőleges törőélű prizma vízszintes síkban okozott terjedési irány szögdiszperzióját akarjuk kimérni. Azonban ha a prizma törőéle kicsit megdőlt, akkor már két – egy vízszintes és egy függőleges síkbeli – mérésre van szükségünk ahhoz, hogy a szögdiszperzió értékét megkapjuk. Ez időigényes, nehézkes, és rendszerint az egyik irányban leromlik a mérés pontossága. Az

SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékén kidolgozott új, a Fabry-Perot interferométeren alapuló mérési eljárás alkalmas arra, hogy kiküszöbölje a problémát. Így lehetővé válik egy időben, két dimenzióban mérni a szögdiszperziót, ezáltal a mérési folyamat jelentősen meggyorsítható.

Lézerekről általában

A lézereket kedvező tulajdonságaik miatt rendkívül széleskörűen alkalmazzák az alap- és alkalmazott kutatások, az ipar, a gyógyászat, a modern technika és a mindennapi élet számtalan területén. Lézereket használunk például a DVD lejátszóban az adatok leolvasására, lézerek segítségével kommunikál egymással a GPS készülék és a műhold, a modern ipari cégeknél lézerral gravíroznak különböző ábrákat fémekbe, illetve ezekkel vágják ki szeleteket belőlük. De a lézer ismerős lehet a szemműtétek, sebészeti beavatkozások kapcsán is, valamint. Lézert távolságmérésre is használnak pl. autók sebességének mérésénél.

A lézer mozaikszó, az angol Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation kifejezésből ered. Alapvetően minden lézer működésére ugyanarra az atomfizikai jelenségre vezethető vissza, amelynek neve populáció inverzió. A lényege, hogy egy aktív közegnek nevezett anyag részecskéit optikai, elektromos vagy más gerjesztés útján magasabb energiaállapotba juttatjuk. Az aktív közegben (és más anyagokban is) a részecskék csak meghatározott energia szinteken létezhetnek. Ha a hordozó, többségi tömbanyaghoz szennyezést adunk hozzá, akkor annak energiaszintjei egy kicsit eltérnek a tömbanyagtól. A gerjesztett állapotba került részecskék nagyon rövid időn belül visszalépnek a szennyező anyag energiaszintjére. Ezután – az előzőnél hosszabb idő alatt – visszalépnek a tömbanyag alapállapotára. Megfelelő erősségű gerjesztés esetén a szennyező anyag szintjén a részecskesűrűség magasabb lesz, mint az alapállapotban. Ezt nevezzük populáció inverciónak. Ekkor a beérkező fényrészecskék (fotonok) az aktív közegen való áthaladásuk során további fotonokat „rántanak el” magukkal, ugyanis a beérkező foton a szennyező nívón lévő részecskéket az alapállapotra való visszalépésre kényszeríti. Ezért ezt a fénykibocsátást kényszerített emiszióknak nevezzük (emisszió=kibocsátás). Mindezek azt eredményezik, hogy megfelelő gerjesztéssel, és megfelelő hullámhosszúságú fényel megvilágítva az aktív közeget, a fény erőssége nem csökken, hanem növekszik az áthaladás során. Ha ezt a rendszert két nagy visszaverő képességű tükör közé rakjuk, akkor lézer rezonátort kapunk, és a tükrökből kicsatolt, nem visszavert fény lesz a lézer fénye.

A lézerek legfontosabb típusai működés szerint: impulzusüzemű lézerek: fényfelvillanások sorozataként működnek; kvázifolytonos lézerek: ezeknél nagyon gyors ismétlődésű impulzusok sorozata a lézerfény; folytonos üzemű lézerek: amelyeknél állandó, folytonos fényt bocsát ki a lézer. Színskála szerint

léteznek egyszínű, azaz monokromatikus, és többszínű, azaz folytonos spektrumú lézerek. Aktív közeg anyaga, működése szerint léteznek szilárdtest, gáz, folyadék, dióda és további más típusú lézerek.

Előnyös tulajdonságaik, amelyek miatt széleskörűen alkalmazzák őket, a jó koherenciájuk (a nyalábokat jól össze lehet adni), a nyaláb kis széttárása, a nagy intenzitás és a jól meghatározható színskála.

Kutatócsoportunk az SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékén ultrarövid impulzusú szilárdtest (titán-zafír kristály) lézerekkel foglalkozik. Főbb kutatások: a lézerimpulzusok energiájának, teljesítményének növelése; tulajdonságaik, mint például diszperzió, impulzucidő vizsgálata; stabilitásuk növelése (CEP mérések); optikai rácsok készítése; optikai elemek (lencsék, tükrök) roncsolódásának vizsgálata; optikai szálak vizsgálata. Ezek közül kutatási témám a diszperzió, azon belül is a terjedési irány szögdiszperzió vizsgálata volt.

Ultrarövid impulzusok jellemzése

Az ultrarövid impulzusok felfoghatók, mint különböző frekvenciájú monokromatikus, azaz egyszínű hullámok összege, melyek adott maximális kitéréssel (a továbbiakban amplitúdóval), és spektrális fázissal rendelkeznek. Tegyük fel, hogy az impulzust alkotó spektrális komponensek síkhullámok. Egy a z-tengely mentén haladó, ω körfrekvenciájú monokromatikus síkhullám térerőssége:

$$E = E_0 \cos(\omega t - kz + \varphi) \quad (1)$$

ahol E_0 a hullám amplitúdója, k a hullámszám, és φ a kezdő fázis, t az idő. Az impulzus, ahogy fentebb említettük, különböző frekvenciájú egyszínű (monokromatikus) síkhullámok összegeként állítható elő, azaz:

$$E'(z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} E_0(\omega) e^{i(\omega t - kz + \varphi(\omega))} d\omega \quad (2)$$

Vegyük észre, hogy ebben az esetben a különböző frekvenciájú hullámoknak eltérő az amplitúdója, és a kezdőfázisa. Sokszor nem csak a térerősség időfüggését szoktuk megadni egy impulzus esetében, hanem az intenzitását is, amely a térerősségből az alábbi módon számolható:

$$I(t) = E(t) * E^*(t) \quad (3)$$

ahol $E^*(t)$ az $E(t)$ térerősség komplex konjugáltja. Az impulzus időbeli alakjának jellegzetes vonásait a $\varphi(\omega)$ spektrális fázisfüggvénynek az impulzus ω_0 központi frekvenciája körül kapott Taylor sor:

$$\varphi(\omega) = \varphi(\omega_0) + \frac{d\varphi}{d\omega}(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \frac{d^2\varphi}{d\omega^2}(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6} \frac{d^3\varphi}{d\omega^3}(\omega - \omega_0)^3 \quad (4)$$

együtthatóival jellemezzük:

$$\varphi_1 = \frac{d\varphi}{d\omega}; \varphi_2 = \frac{d^2\varphi}{d\omega^2}; \varphi_3 = \frac{d^3\varphi}{d\omega^3} \text{ stb. (5)}$$

A φ_1 -et csoportkéleltetésnek nevezzük, mely tag az impulzus időbeli késéséért felelős, azaz az időbeli alakját nem változtatja meg. Ezzel ellentétben a φ_2 , azaz a csoportkéleltetés-diszperzió (GDD) az impulzus időbeli megnyúlását okozza, illetve ún. időbeli csörpöt is okoz. Ez utóbbi azt jelenti, hogy az impulzus vivőfrekvenciája időben változik. Ha a GDD értéke negatív, akkor az impulzus elején vannak a nagyobb frekvenciájú komponensek, viszont ha az értéke pozitív, akkor a végére kerülnek. Ha a Taylor sor harmad és magasabb rendű tagjai elhanyagolhatóak, akkor az impulzus τ időbeli félérték szélessége:

$$\tau = \tau_0 \sqrt{1 + \left(\frac{4 \ln(2) \cdot \varphi_2}{\tau_0^2}\right)^2} \quad (6)$$

ahol τ_0 az impulzus ún. transzform limitált időbeli hossza. Ez az az időtartam, ami akkor áll elő, amikor a Taylor-sorfejtésben a másodrendtől felfelé minden együttható zérus, azaz ez az a legrövidebb időtartam, ami az adott spektrum mellett előállhat.

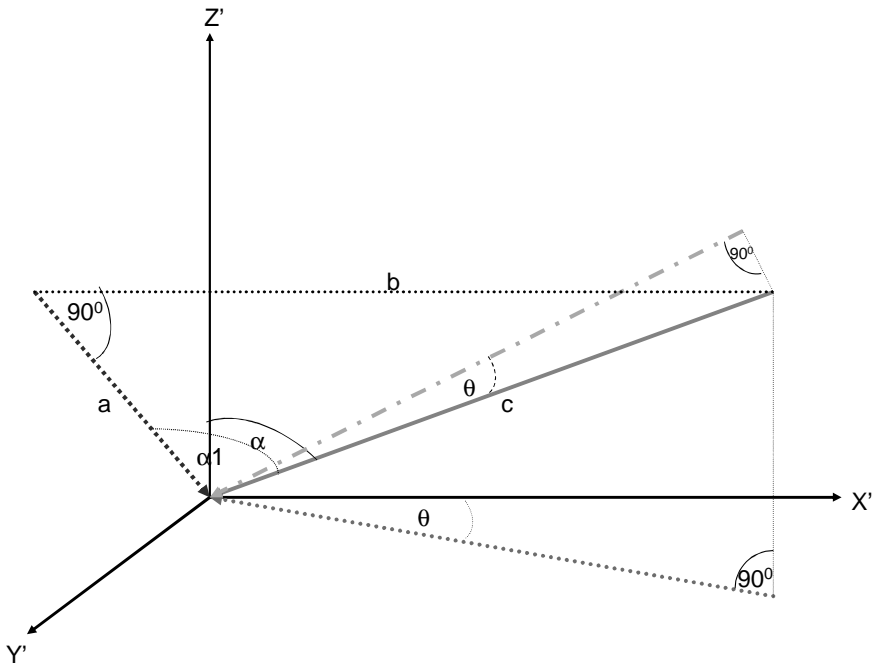
Az ultrarövid lézerpulzusokat jellemezhetjük az impulzus által tárolt energiával, amelyet Joule-ban adhatunk meg, az elektromágneses tér térerősségével, melyben az impulzus terjed (Volt/méter), az impulzusidővel (ultrarövid impulzusok esetén femtoszekundumos /szekundumos/nagyságrendű), az impulzus csúcsteljesítményével (Watt, Joule/sec) és az impulzus csúcsintenzitásával (Watt/ cm²).

A diszperzió vizsgálata különösen nagy jelentőséggel bír. Diszperzió a fizikai mennyiségek változásának mértékét értjük a hullámhossz függvényében. Az anyagi diszperzió vizsgálata a kimért fázis Taylor-sorfejtésének együtthatóinak vizsgálata. míg a szögdiszperzió egy optikai elemen való áthaladás során a különböző színű komponensek irányai közötti szög változása a szín függvényében. Kutatásaim során az ultrarövid impulzusok szögdiszperziójának változását vizsgáltam vízszintes és döntött prizmán való áthaladás során.

A prizma terjedési irány szögdiszperziója

Modell a terjedési irány szögdiszperzióról

Jelöljük θ -val a prizma döntésének szögét. Az ezt megelőző esetben döntetlen prizma vizsgáltuk meg a problémát, melynek következtében csak egy síkban, a prizma törőélére merőleges diszperziós síkban kaptunk szögdiszperziót. Ha megdöntjük a prizmat egy vízszintes tengelye körül, akkor, amennyiben a Z' - X' sík a diszperziós sík, a Z' - Y' sík a rá merőleges ún. merőleges sík, az X' - Y' sík pedig a prizma felülete, az origó pedig az a pont, ahol a nyaláb behatol a prizma, a diszperziós síkkal is szöget fog bezárni a beeső nyaláb. Ez a szög θ -val egyenlő. $\theta = 0$ esetén a nyaláb beesési szöge α -val egyenlő. $\theta > 0$, vagy $\theta < 0$ esetén jelöljük a merőleges síkkal bezárt szögét α_1 -gyel (1. ábra). Az ábra alapján felírhatjuk a (7)-es összefüggést:



1. ábra: A beérkező nyaláb és a síkokkal bezárt szögek

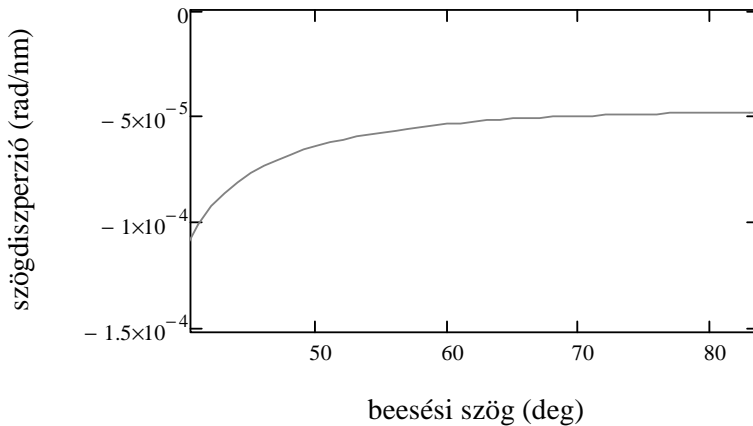
$$\sin(\alpha_1) = \sqrt{1 - \cos(\theta)^2 \cos(\alpha)^2} \quad (7)$$

A következő összefüggés adódik a döntetlen prizmára érvényes összefüggés, a (7), és az (1. ábra) alapján:

$$\sin(\delta 1\theta(\lambda, \theta)) = \sin(\phi) \sqrt{n(\lambda)^2 - 1 + (\cos(\alpha) \cos(\theta))^2 - \cos(\phi) \sqrt{1 - (\cos(\alpha) \cos(\theta))^2}} \quad (8)$$

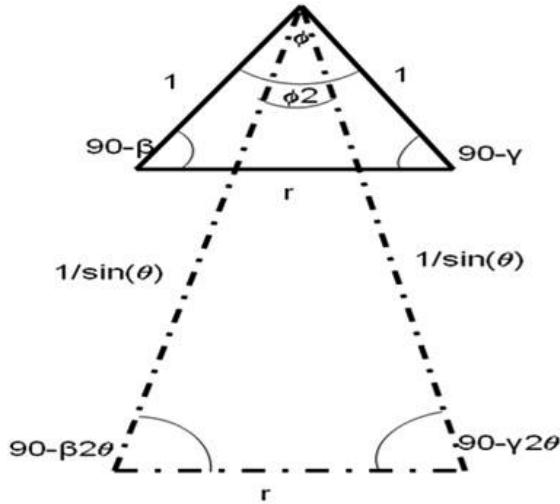
$$\sin(\delta 1(\lambda, \theta)) = \frac{\sin(\delta 1\theta)}{\cos(\theta)} \quad (9)$$

$\delta 1\theta$ az X'-Y'-Z' diszperziós síkban a megtört kimenő nyaláb szöge, $\delta 1$ pedig a laborhoz viszonyított X-Y-Z koordináta rendszer diszperziós síkjában a megtört nyaláb szöge. A diszperziós síkban a szögdiszperzió a (2. ábra) szerint alakul a beesési szög függvényében, és 5 fokban megdöntött prizma esetén.



2. ábra: 5 fokban döntött prizma szögdiszperziója a diszperziós síkban, a beesési szög függvényében

Merőleges síkban a beesési szög mellett a nyaláb a prizma θ törőszögét is „másnak látja”, mint a diszperziós síkban. Ezt a megváltozott törőszöget nevezzük $\phi 2$ -nek, mely a hullámhossznak, a beesési szögnek, és a θ szögnek is függvénye lesz. A (3. ábrán) látható a „rég”i, és megváltozott törőszög, és a nyaláb útja a prizma belsejében, mely r-rel van jelölve.



3. ábra: A régi és „megváltozott” törőszögek kiszámítása

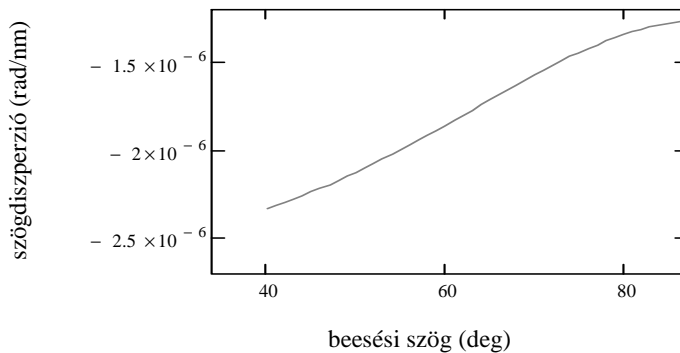
A koszinusz, és szinusztételek felhasználásával a ϕ_2 -re a következőt kapjuk:

$$\sin(\phi_2) = \frac{\sin(\phi)\sin(\theta)\sqrt{n(\lambda)^2 - (\sin(\theta))^2}}{\sqrt{n(\lambda)^2 - (\sin(\alpha))^2}} \quad (10)$$

A kimenő nyaláb szöge:

$$\sin(\delta_2(\lambda, \theta)) = \sin(\phi_2)\sqrt{n(\lambda)^2 - (\sin(\theta))^2} \quad (11)$$

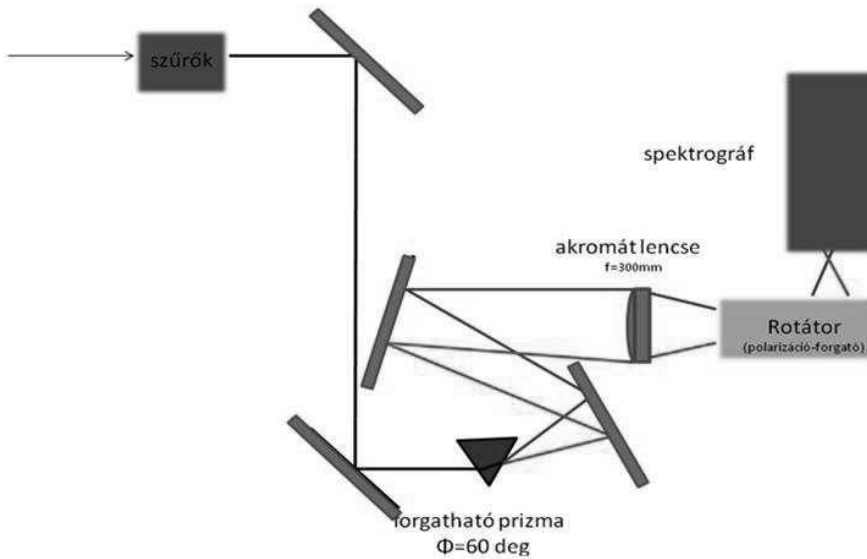
A prizma szögdiszperziója pedig a (4. ábra) szerint alakul a beesési szög függvényében, 5 fokban megdöntött prizma esetén.



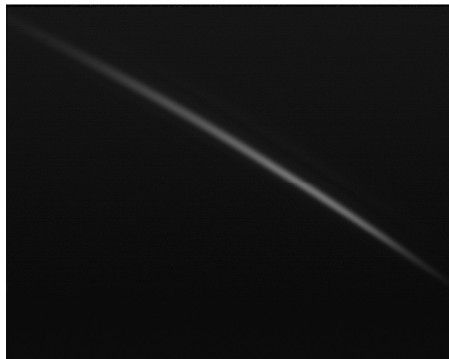
4. ábra: Döntött prizma szögdiszperziója merőleges síkban, a beesési szög függvényében

A terjedési irány szögdiszperzió mérésére használatos eszközök

A terjedési irány szögdiszperzió mérésére széleskörűen használt eszköz a leképező spektrográf. Működésének lényege, hogy a prizával komponenseire bontott impulzust egy akromát lencsével leképezzük egy résre, majd a rés képét különböző optikai elemeken keresztül egy CCD kamera detektorára képezzük le. A rés képe megjelenik a számítógép képernyőjén, amit összeköttöttünk a kamerával. Minél inkább döntött a rés képe a vízszinteshez képest, annál nagyobb a szögdiszperzió mértéke. Az (5. ábrán) az elrendezést, a (6. ábrán) a rés képét láthatjuk.

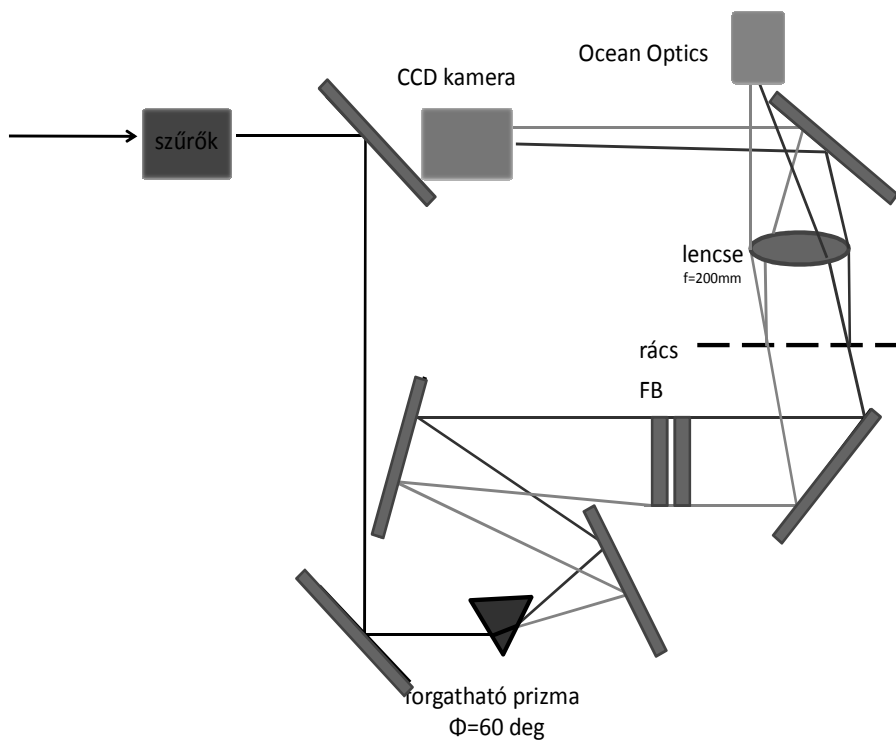


5. ábra: Leképező spektrográf rajza

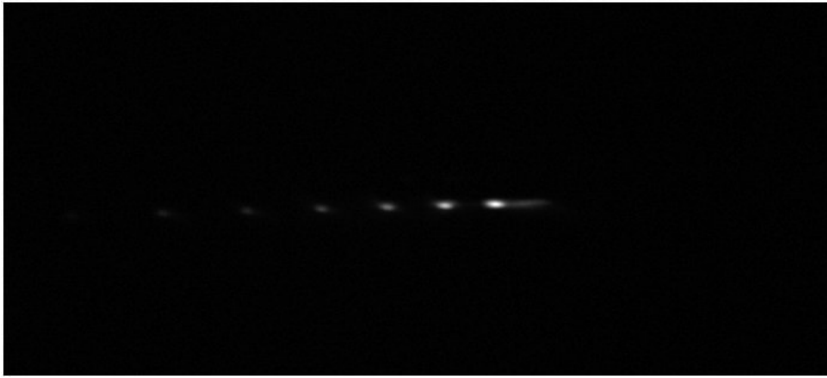


6. ábra: Leképező spektrográf CCD kameráján látható kép

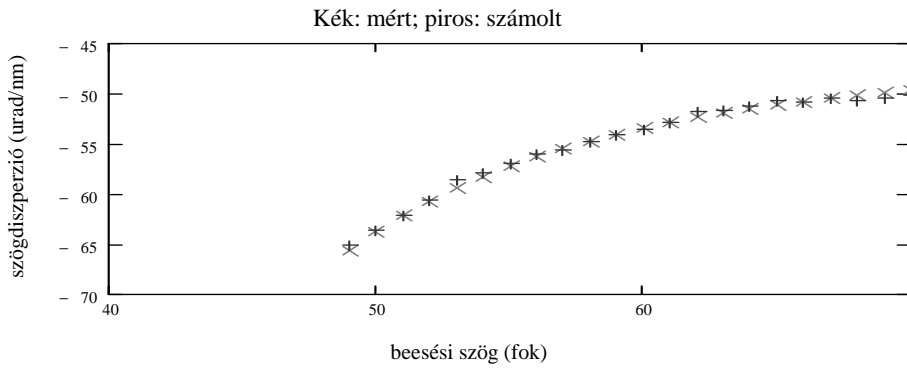
A másik eszköz az ún. Fabry-Perot interferométeres elrendezés. A Fabry-Perot interferométer működésének lényege, hogy a tükrői távolságától függően csak bizonyos jól meghatározott színű komponenseit engedi át az impulzusnak. Az elrendezésben a Fabry-Perot interferométer (továbbiakban FP) által átengedett komponenseket egy ún. transzmissziós optikai rácson ejtjük át, amely elhajlítja a hullámhosszak szerint a fényt a vízszintes síkon, két irányban. Az 1. rendben elhajlított nyaláb egy tükorről visszaverve egy lencse által ráfókuszálódik a CCD kamera detektorára. Az elhajlítottan, 0. rendet a lencse egy spektrométerre fókuszálja le, ahol a komponensek hullámhosszát lehet ellenőrizni. Az elrendezés a (7. ábrán) látható, a CCD kamera képe pedig a (8. ábrán). Az elrendezés előnye a leképező spektrográffal szemben, hogy egyszerre, egy lövésből mind a vízszintes, mind a függőleges síkban tudja mérni a szögdiszperziót, míg a spektrográfnál el kellett forgatni a nyalábot.



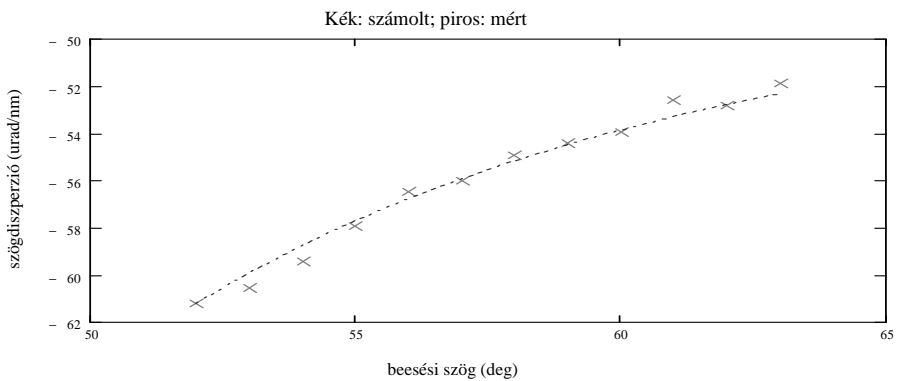
7. ábra: Szögdiszperzió mérőeszköz rajza Fabry-Perot interferométerrel



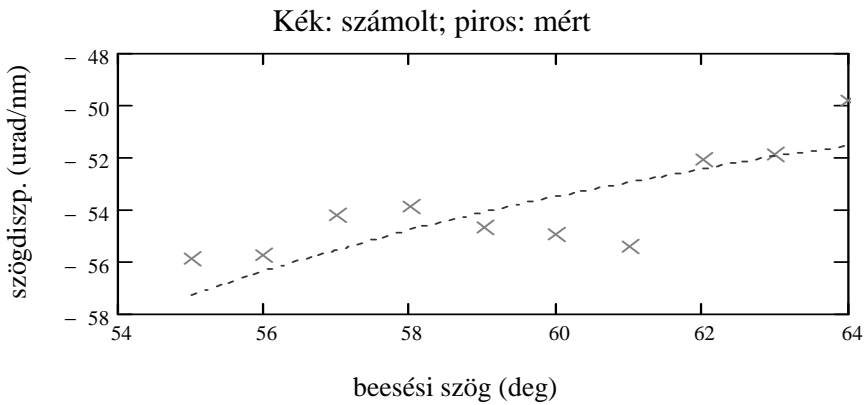
8. ábra: Fabry-Perot interferométeres berendezés CCD kameráján megjelenő kép



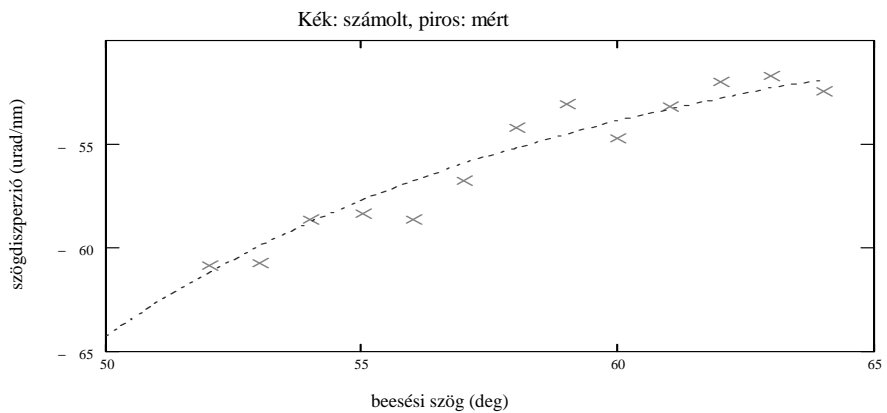
9. ábra: Mérési eredményeim a leképező spektrográffal készítve, vízszintes síkban



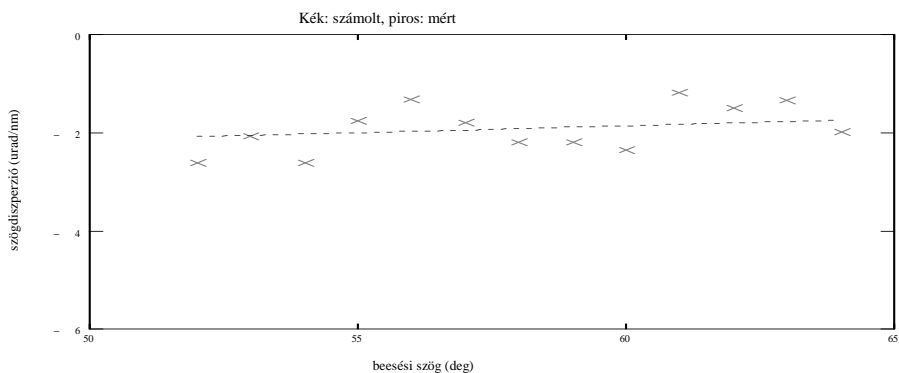
10. ábra: Mérési eredményeim a leképező spektrográffal készítve, vízszintes síkban, 5 fokkal döntött prizámra



11. ábra: FP berendezés mérési eredményei vízszintes prizma



12. ábra: Mérési eredményei 5 fokban döntött prizma vízszintes síkban



13. ábra: Mérési eredményei 5 fokban döntött prizma merőleges síkban

A (9, 10, 11, 12, és 13. ábrák) rendre a leképező spektrográf vízszintes prizmára, leképező spektrográf 5 fokban döntött prizma vízszintes síkjára az FP-s elrendezés vízszintes prizmára, FP 5 fokban döntött prizma vízszintes síkjára, és FP 5 fokban döntött prizma függőleges síkjára vonatkozó mérési eredményeimet tartalmazza összehasonlítva az elméleti eredményekkel. A mérési eredmények és az elmélet jó egyezést mutattak, különösen a leképező spektrográf esetén. A döntött és döntetlen prizma szögdiszperziója között nincs jelentős különbség. A prizmat csak 5 fokban döntöttem meg, mert a valóságban ennél nagyobb eltérés a vízszintestől nem valószínű.

Összefoglalás

Munkám során modellt alkottam a döntött prizma szögdiszperziójáról, amelyet kísérletileg is ellenőriztem: megépítettem mind a leképező spektrográfon, mind az FP-n alapuló kísérleti elrendezést, elvégeztem a méréseket mindkét eszközre. Az eredmények követik a modell által nyújtott adatokat. A mérési eredményeket nézve elmondható, hogy a leképező spektrográf pontosabb adatokat tesz lehetővé, mint az FP, viszont az FP-vel mindkét síkban lehetővé vált a szögdiszperzió mérése, míg a leképező spektrográffal a függőleges síkban nem lehetett mérni. Az FP elrendezés hordozható berendezés, szemben a leképező spektrográffal, mivel ahhoz további kiegészítő eszközökre van szükség (pl. nyaláb forgató).

Ajánlott irodalom

Andrásik Attila: *Terjedési irány szögdiszperzió mérése leképező spektrográffal és Fabry-Perot interferométerrel.* (TDK dolgozat) Szeged: Szegedi Tudományegyetem, 2012.

Ultrashort pulsed lasers and their properties

ATTILA ANDRÁSIK

The applications of lasers, especially the ultrashort pulsed lasers with a pulse duration less than 10^{-15} sec, have nowadays a great importance for the using of modern technologies. The Electric Light Infrastructure Attosecond Laser Pulse Source (ELI-ALPS) project planned to settle in Szeged in 2 years in the future has a main profile of preparation of pulses with a duration less than thousand times smaller than femtosecond pulses (attosecond pulses). The results of the researches with these pulses will be utilized well in the field of fundamental investigations, medicine and industrial applications.

My research has trended to investigate the angular dispersion, especially the propagation direction angular dispersion of femtosecond pulses.

When an ultrashort pulse propagates through a prism, or an optical grating, the pulse coupled out changes in its spatial and temporal shape, because the prism or grating turns the pulse's various spectral component in various direction from the original direction. In the laser amplifiers based on phase modulated pulse amplifying you must stretch the seed pulse to be amplified, and after the amplification you must compress it. For this purpose they use pulse stretcher and compressor, two or one well adjusted prism pair, or grating pair included in, to ensure the pulse's various spectral components propagate to the same direction, and spatially, and temporally overlapped. The propagation direction angular dispersion occurs, when the prisms, or gratings do not adjusted well, and it causes pulse distortions. Because of these it is highly important to measure the propagation direction angular dispersion much more accurately.

For measure these angular dispersion there are two devices, the imaging spectrograph, and the Fabry-Perot interferometer device. The last device is able to measure in two perpendicular plane. The purpose of my research is to compare the two mentioned methods with respect to accuracy and practical way.

My measuring was implemented in the HELIOS Laboratory of the Department of Optics and Quantum Electronics, University of Szeged.