

OTDK dolgozat

OFF-AXIS PARABOLATÜKÖR ÉS NAGY INTENZITÁSÚ LÉZERNYALÁB EGYSZERŰ BEÁLLÍTÁSI MÓDSZERE ÉS ALKALMAZÁSAI

Készítette:

Gilinger Tibor,

Fizikus MSc szakos hallgató

Témavezető:

Dr. Osvay Károly, egyetemi docens,
SZTE TTIK Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Szeged

2024

Absztrakt.....	3
1. Elméleti áttekintés	4
1.1 Ultrarövid lézerimpulzusok fókuszálása lencsével	4
1.1.1 A klasszikus és femtoszekundumos optikai jelenségek.....	4
1.1.2 Nemlineáris optikai jelenségek.....	8
1.2 Gömbi tükrök és leképezési hibáik.....	9
1.3 A parabolatükör	11
2. Kísérletek, mérések	15
2.1 OAP beállítási procedúrájának kidolgozása	15
2.1.1 A kísérleti elrendezés felépítése	15
2.1.2 Kísérleti elrendezés optikai beállítása.....	17
2.1.3 A parabolatükör beállítása	18
2.2 OAP beállításának alkalmazása az MTA és TeWaTi laboratóriumokban	24
2.2.1 ELI-ALPS: MTA laboratórium NLTL nyalábvonal	24
2.2.2 SZTE TeWaTi laboratórium röntgenforrás nyalábvonal.....	26
2.3 Az új OAP-nyalábvonal beállítási módszer hatása a kísérletekre	27
2.3.1 Az NLTL kísérletei	27
2.3.2 A KTNL kísérletei	28
3. Összefoglalás és kitekintés.....	29
4. Irodalomjegyzék.....	30
Köszönetnyilvánítás	31

Absztrakt

A nagy intenzitású, ultrarövid lézerimpulzusoknak számtalan felhasználási területe létezik, mind a tudományos, felfedező kísérletekben, mind pedig az alkalmazásokban. Az egyik legfontosabb feladat ezen széles spektrális tartományú impulzusok lefókuszálása a célfelületre vagy céltárgyra. E feladatra a gyakorlatban elterjedt megoldás a refraktív optikák helyett a reflektív optikák használata, melyek alkalmazásával elkerülhetjük a nagy teljesítményű impulzusok optikai anyagon való áthaladását, valamint a fókuszáláskor fellépő színi hiba (fázisfront torzulás) hatását. A gömbtükrök - melyek a legegyszerűbb reflexiós elven működő fókuszálóelemek - alkalmazhatóságának korlátot szab a szférikus aberráció. Egy optikai aberrációktól mentes reflektív fókuszáló elem a parabolikus tükör, mely torzulás mentesen képes a lehető legkisebb pontba összegyűjteni a megfelelő irányból a felületére érkező lézernyalábot. A gyakorlatban ezen tükrőtípus ún. tengelyen kívüli (off-axis) változatát használják.

A parabolatükör tényleges használata iránti lelkesedést csökkenti, hogy az eszköz rendkívül érzékeny a beállítás pontosságára. Néhány mrad-nyi eltérés az ideális iránytól, illetve tizedmiliméternyi eltérés az ideális pozíciótól - egy gömbi tükörrel összevetve - jelentősen lerontja a fókuszolt minőségét. Egy off-axis parabolatükör hagyományos úton való beállítása rendkívül időigényes, a pozíció és irány folyamatos állítgatásával lehetséges. A munkám során kidolgoztam egy hatékony és megfelelően pontos eljárást, mellyel tetszőleges off-axis parabolatükör, valamint a nagy intenzitású lézernyaláb együttesen beállítható. Ezen módszert alkalmazva két kísérleti elrendezésben is sikerült a fókuszált intenzitást maximalizálni. Egyrészt ultravékony folyadékhártya alkalmazásával lézeres iongyorsítást valósítottak meg az ELI-ALPS Lézeres Kutatóintézetben. Másrészt szalag céltárgy alkalmazásával pontszerű röntgenforrás fejlesztése folyik az SZTE TeWaTi laboratóriumában.

1. Elméleti áttekintés

Dolgozatomban első felében áttekintem a fókuszálással kapcsolatos jelenségeket. Bemutatom a lencsével, gömbi- illetve parabolatükörrel történő fókuszáláskor fellépő általános és az ultrarövid impulzusok esetén tapasztalható aberrációkat. Foglalkozom a nagy intenzitás következtében fellépő, ezen témakörhöz tartozó nemlineáris jelenségekkel, az impulzus paramétereire gyakorolt hatásukkal.

1.1 Ultrarövid lézerimpulzusok fókuszálása lencsével

1.1.1 A klasszikus és femtoszekundumos optikai jelenségek

Optikai lencsék egyik ismert leképezési hibája a kromatikus aberráció vagy színi hiba [1]. Ez a jelenség a diszperzió következménye. A hiba akkor látható, ha a lencsét kivilágító fénynyaláb nem monokromatikus, azaz több spektrális komponense van: A lencse anyagának törésmutatója a diszperzió következtében eltér az egyes hullámhossz komponensekre. Az eltérés miatt pedig az egyes komponensek a lencse optikai tengelyén más-más helyen fókuszálódnak.

A diszperziót jellemző mennyiségként az Abbe-féle számot szokás megadni, mely definíció szerint:

$$\nu = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C},$$

ahol n_d, n_F, n_C a d, F és C Fraunhofer-féle színekhez tartozó törésmutatókat jelölik. Szokás alkalmazni az Abbe-féle szám reciprokát ($V = 1/\nu$), melyet relatív diszperziónak nevezünk. Ezen mennyiség lencsék esetén arányos a vörös és kék komponensek fókuszpontjainak relatív távolságával, nevezetesen [2]:

$$V = \frac{\Delta f}{f}.$$

Az ultrarövid lézerimpulzusok általában széles spektrális tartományúak, hiszen a transzformlimitált impulzushosszt a spektrális szélesség szabja meg. Éppen ezért a színi hiba komoly problémát jelent ezen impulzusok fókuszálásakor. A probléma kiküszöbölésére ún. akromát lencsét alkalmaznak, melynek lényege, hogy két, megfelelően választott anyagú és fókusz távolságú lencsét illesztnek egymáshoz, melyek adott színek tartományban kicsiny

színi hibával rendelkeznek. Használatos még az apokromát, mely három darab lencsét tartalmaz. A helyzetet bonyolítja a nagy csúcsintenzitás megjelenése, ami miatt a klasszikus ragasztásos illesztés az akromátok, illetve apokromátok esetén nem jöhet szóba, ehelyett ún. légréses illesztést szükséges használni.

Egy másik, mind a klasszikus szférikus lencsék és tükrök esetén fellépő hiba a szférikus aberráció vagy gömbi hiba. A centrált (hengersizmetrikus) képalkotó eszköz különböző sugarú zónái más helyen hozzák létre a képet. A hiba az optikai tengelytől távol eső sugarak esetén válik jelentőssé. Lencsék esetén a hiba mértéke függ a lencse alakjától, az ún. alaki tényezőtől. Emellett fontos a lencse orientáltsága, azaz, hogy melyik oldalával helyezzük a nyaláb útjába: célszerű úgy beállítani, hogy a fénytörés a két felületen lehetőleg azonos mértékű legyen. A színi hiba korrekciójához hasonlóan ebben az esetben is alkalmazhatóak lencserendszerek, melyek a gömbi hibát csökkentik.

A nagy intenzitású, ultrarövid impulzusok lencsével történő fókuszálásakor további effektusok is létrejönnek, melyek módosítják a fókuszolt paramétereit, az impulzus időbeli és térbeli alakját a fókusz sík környezetében [3]. Az egyik ilyen jelenség az impulzus fázis- és csoportsebessége közötti különbséggel magyarázható. A fázissebesség a

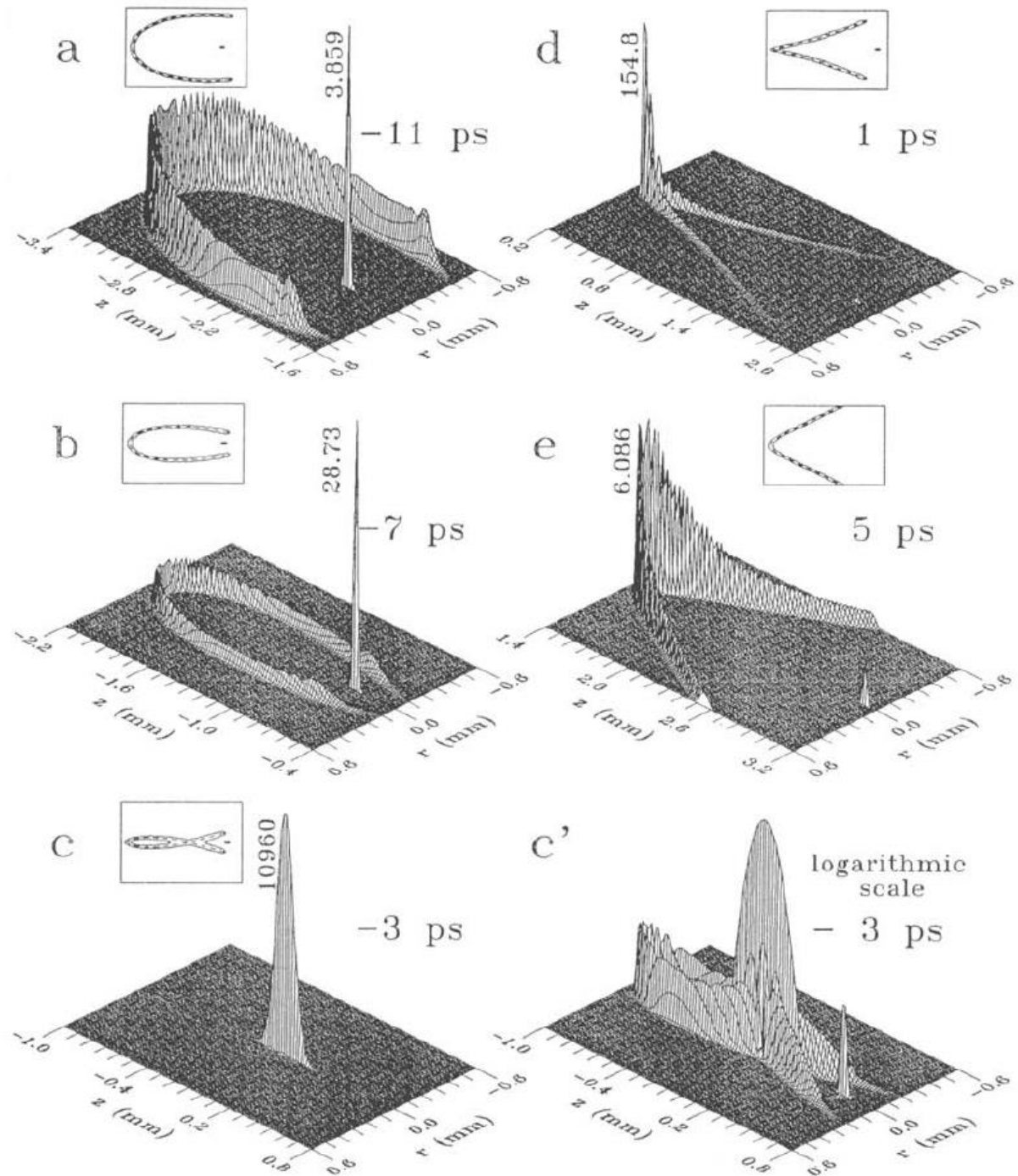
$$v_p = \frac{c}{n_0}$$

formula segítségével számolható, melyben c a vákuumbeli fénysebesség, míg n_0 a közeg törésmutatója a központi (λ_0) hullámhosszra. A csoportsebességet megadó összefüggés:

$$v_g = \frac{c}{n_0 - \lambda_0 \cdot n'(\lambda_0)},$$

melyben n' a törésmutató hullámhossz szerinti deriváltját jelöli. Mivel a lencsék anyagában a csoportsebesség kisebb, mint a fázissebesség, így az impulzusfront késik a fázisfronthoz képest. Megmutatható, hogy a késés a fénysugár optikai tengelytől mért távolságnak parabolikus függvénye. A fázisfront hengersizmetrikus az optikai tengelyre nézve, s ugyanez igaz az impulzusfrontra. A fázisfront alakja a fókuszpont közelében analitikusan megadható. Ábrázolva az impulzusalakot a fókuszolt környezetében több különböző időpontban látható, hogy a fókusz előtt az impulzusfront „patkó” alakot vesz fel (lásd 1. ábra) Az impulzusfrontnak előbb a tengelytől távolabbi részei fűződnek be a fókuszpontba, majd ezt követi az impulzusfront többi része, végül a tengelyen lévő pont is áthalad a fókuszponton. Így a fókuszpontban egy

hurok alakul ki a $t \in [-T_0, 0]$ intervallumban, amennyiben $t = 0$ jelöli a tengelyen haladó impulzusfront fókuszpontba érkezésének pillanatát.



1. ábra: Az analitikusan számolt impulzusalak a fókuszpont közelében, különböző időpontokban. r és z az optikai tengelytől, illetve a fókuszsíktól való távolság. [3]

A hurok kialakulásának következtében az impulzus időben „kiszélesedik” a fókuszpontban, a kiszélesedés pedig a

$$T_0 = \frac{a_0^2}{2cf_0^2} \lambda_0 f'(\lambda_0)$$

formula segítségével megadható, melyben az $f_0 = f(\lambda_0)$ a központi hullámhosszhoz tartozó fókusz távolság, f' a fókusz távolság hullámhossz szerinti első deriváltja, a_0 pedig a lencse apertúrájának a fele.

A transzformlimitált impulzus a lencse anyagán való áthaladás következtében időben kiszélesedik [4]. Az időbeli kiszélesedés oka a Group Delay Dispersion (GDD), azaz csoportkésleltetés diszperzió, melynek ismeretében Gaussos időbeli burkoló esetén megadható a kiszélesedés a következőképpen:

$$\tau = \tau_0 \sqrt{1 + \left(4 \ln 2 \frac{GDD}{\tau_0^2}\right)^2}$$

A képletben szereplő τ_0 az eredeti (transzformlimitált) impulzusidő. A GDD-t megadó összefüggést beírva, és a zárójelben lévő konstans szorzót közelítve kapjuk:

$$\tau = \tau_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_0}{c\tau_0} n''(\lambda_0) \cdot \Delta\lambda \cdot L\right)^2},$$

ahol $\Delta\lambda$ a spektrális szélesség hullámhosszban kifejezve, valamint L az adott fénysugár lencsében megtett úthossza. Összevetve az impulzus időbeli kiszélesedésének mértékét a két esetben, azt kapjuk, hogy szinglet lencse esetén a fázis- és csoportsebesség eltéréséből adódó kiszélesedés nagyságrendekkel nagyobb, mint a GDD-ből adódó kiszélesedés.

Az impulzus terjedésének hullámoptikai leírása megerősíti a hurok megjelenését. a geometrikai optikai modell pedig jól megjósolja az impulzusfront terjedését [5-11]. Utóbbi jelenséget kísérleti úton is vizsgálták, szemléletes módon igazolva az elmélet helyességét [12]. Az elméleti modellek azonban egy nem várt eredményt is szolgáltatnak, miszerint egy intenzitástüske terjed az optikai tengely mentén a fázissebességnél nagyobb sebességgel (lásd 1. ábra). Ezt a lokális intenzitásmaximumot széli hullám impulzusnak nevezzük.

A Young-féle hullámoptikai tárgyalásban az apertúra szélén elemi hullámok jönnek létre, ezek a széli hullámok. A széli hullámok és a zavartalanul terjedő hullám interferenciája hozza létre az előbb említett, különös tulajdonsággal rendelkező impulzust, innen ered az elnevezése. Megmutatható, hogy Gauss-nyalábbal való kivilágítás esetén, amennyiben a lencse apertúrája

elegendően nagy, a szélihullám impulzus eltűnik. Ennek magyarázata, hogy így az elektromos tér a lencse szélein elhanyagolhatóan kicsiny, és nem keletkeznek széli hullámok.

1.1.2 Nemlineáris optikai jelenségek

A nagy intenzitású lézerimpulzusok esetén több olyan jelenség fellép az impulzus és a közeg kölcsönhatása (így a lencsén való áthaladás) során, mely egyébként, a klasszikus optika keretein belül nem megfigyelhető [4]. A nagy intenzitás következtében megváltoznak a közeg optikai tulajdonságai, melyek tovább nehezítik az impulzus terjedésének leírását. A közegben terjedő nyaláb paraméterei megváltoznak mind térbeli, mind időbeli alakot tekintve. Ezen jelenségek tárgyalása a nemlineáris optika tárgykörébe tartozik.

Az egyik legfontosabb jelenség, hogy a törésmutató intenzitásfüggővé, ezáltal időfüggővé válik. Ennek leírása a következő formulával szokás:

$$n = n_0 + n_2 I(t) .$$

A formulában szereplő n_0 jelöli a törésmutató konstans részét, mely a klasszikus optikában is megjelenik, n_2 pedig a nemlineáris törésmutató. Általában n_2 értéke $10^{-13} - 10^{-16}$ nagyságrendbe esik, így a törésmutató nem elhanyagolható változásához a keltő tér intenzitásának $> 10^{13} \text{ W/cm}^2$ nagyságrendbe kell esnie.

A törésmutató intenzitásfüggése változó törésmutatót eredményez térben és időben is. Az időbeli változás az impulzus „csörpölődését”, a térbeli változás pedig egy mesterséges lencse hatását eredményezi a közegben. Ezen két jelenséget önfázismodulációnak, illetve önfókuszálódásnak nevezzük. A törésmutató változás hatására megváltozik az impulzus térbeli intenzitáseloszlása, valamint a spektrális-, és ezáltal időbeli karakterisztikája, mely jelentős impulzustorzulást eredményezhet.

Az önfázismoduláció hatásának vizsgálatához írjuk fel az impulzus fázisának időfüggését a közegben való terjedéskor:

$$\varphi(t) = \omega_0 t - n(I(t)) \cdot \frac{2\pi L}{\lambda_0} ,$$

ahol L a közegben megtett úthossz.

A fázis változását az időderivált, vagyis a pillanatnyi vivőfrekvencia adja:

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega(t) = \omega_0 - \frac{2\pi L n_2}{\lambda_0} \cdot \frac{dI(t)}{dt}$$

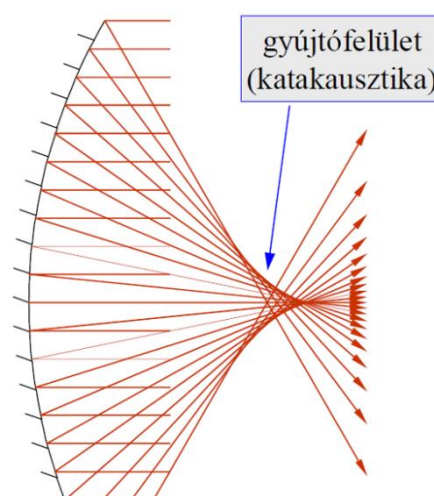
Mivel a törésmutató változás azonnal bekövetkezik az impulzus közegbe lépésekor, így a nyaláb különböző részei más törésmutatót „érzekelnek”, a fázis az impulzuson belül folyamatosan változik. Ennek következtében – hasonlóan a csoportsebesség diszperzióhoz (GVD) – a nyaláb két vége között fáziskülönbség alakul ki, a nyalábban különböző spektrális tulajdonságú komponensek jelennek meg, melyek terjedési tulajdonságai eltérőek. Ellentétben a GVD által okozott fázismodulációval, az önfázismoduláció esetén új frekvencia komponensek jelennek meg, melyek az impulzus spektrumának kiszélesedéséhez vezetnek. (A jelenséget gyakran fehérfénykeltés kíséri.) Az impulzus spektrális kiszélesedése az időbeli hossz rövidülését eredményezi, így a jelenséget gyakran felhasználják, pl. posztkompresszió elvégzésére (HCF).

Látható tehát, hogy a klasszikus leképezési hibák mellett más típusú aberrációk is fellépnek az ultrarövid, nagy intenzitású lézerimpulzusok fókuszálásakor, melyek tovább rontják a lencsék alkalmazhatóságát. Éppen ezért szokás a reflektív optikák alkalmazása a lencsék helyett, melyek esetén nem lép fel kromatikus hiba, valamint nem terjed közegben az impulzus, ezáltal egyszerűbben prediktálható az impulzus viselkedése, kevésbé változik meg a fókuszálás során.

1.2 Gömbi tükrök és leképezési hibáik

A legegyszerűbb reflektív, fókuszálásra alkalmas optika a gömbi tükör. Felépítése egyszerű: egy adott R görbületi sugarú felület, melyen bevonatot hoznak létre. A gyakorlati előnye a lencsékkel szemben, hogy nem lép fel színi hiba, hiszen a tükör felső rétege(i) reflektálja a fényt, így a fény nem terjed közegben. Hasonló okból kifolyólag nem lép fel az önfázismoduláció jelensége sem, így nagyobb intenzitású lézerimpulzusok esetén is használhatóak. Az alkalmazható intenzitás felső határát a bevonat minősége és milyensége szabja meg.

Ahogy az előző fejezetben már szerepelt, a gömbi tükrök esetén is megjelenik a szférikus aberráció jelensége: az optikai tengelytől távolodva a beérkező, tengellyel párhuzamos sugarak a paraxiális fókuszpont előtt metszik egymást (lásd 2. ábra). Az optikai tengelytől mért távolság (d) és a tükör



2. ábra: A szférikus aberráció szemléltetése homorú gömbtükörrel, a kirajzolódó katakauszika. [13]

görbületi sugarának (R) ismeretében a fókusz távolság (f) megadható a következőképpen:

$$f = \frac{R}{2} \left(2 - \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{R}\right)^2}} \right)$$

A formula alapján látható, hogy a hiba csökkenthető, amennyiben növeljük a görbületi sugarat (ami azonban megnöveli a tükör fókusz távolságát is), vagy csökkentjük a sugár tengelytől mért távolságát. Az utóbbi esetben tehát a beeső nyaláb méretét le kell csökkenteni a paraxiális tartományra. Azonban bizonyos impulzusenergia felett ez már nem tehető meg, hiszen az intenzitás olyan mértékűvé válik, hogy a tükör megsérül. Éppen ezért szokás a nagyintenzitású lézerimpulzusokat kitágítani – nagyobb felületen oszlik el az energia, csökken a felületre eső intenzitás (valamint csökken a nyaláb természetes divergenciája is).

Az egyszerű gömbtüköröket is alkalmazhatjuk on- illetve off-axis elrendezésben. Az on-axis kifejezés arra utal, hogy a fókuszáló optika a beérkező nyalábot a nyaláb tengelye mentén képezi le/fókuszálja. Ezzel konzisztensen off-axis elrendezésről beszélünk, ha az optikai elem a leképezést/fókuszálást a nyaláb tengelyén kívül végzi el.

A szférikus tükrök esetén az on-axis elrendezés hátránya, hogy a beérkező impulzusnak át kell haladnia a fókusz síkon, ezáltal érintkezik a fókuszpontba helyezett céltárggyal is. Egyrészt a céltárgy és a hozzá tartozó tartó/továbbító szerkezet kitakarja a nyaláb bizonyos részeit. Másrészt (a kísérlettől és a céltárggyalól függően) az impulzus elegendően nagy intenzitás esetén megváltoztatja/roncsolja a céltárgyat, módosítja a kísérlet paramétereit. Bizonyos esetekben alkalmazható ez az elrendezés, amennyiben a beérkező nyaláb mérete elegendően nagy, s így a céltárgyra „hátról” eső intenzitás (valamint a céltárgy berendezés maga) kicsiny.

Az off-axis elrendezés megoldás az előbb említett problémákra, hiszen a fókuszálás iránya ki van fordítva a beérkező nyaláb tengelyéhez képest. Ebben az esetben viszont problémát jelent, hogy a szférikus tükör optikai tengelyétől távol, azzal szöget bezáró sugarak érkeznek a felületre, mely asztigmatizmust eredményez.

Látható tehát, hogy a szférikus tükrök nem alkalmasak a nagyintenzitású lézerimpulzusok lefókuszálására, sem on-, sem off-axis elrendezésben. Felmerül a kérdés, hogy milyen felülettel rendelkező tükröt érdemes alkalmazni, mely esetén az aberrációk alacsonyabb mértékben, vagy egyáltalán nem jelennek meg.

1.3 A parabolatükör

A reflektív optikák egyik fontos fajtája a parabolatükör, melynek tükröző felülete egy forgási paraboloid. A parabolatükör nagy előnye, hogy az optikai tengellyel párhuzamosan érkező sugarakat a fókuszpontba gyűjti össze, szférikus aberráció mentesen. A fókuszpont méretét ez esetben (tökéletesen kollimált, nem diffraktáló nyaláb) a diffrakciólimit határozza meg. Tehát a lencsékkel ellentétben a parabolatükröt nem csak kromatikus, de szférikus aberrációmentesség is jellemzi (valamint az önfázismoduláció sem lép fel). A parabolatükör egy másik előnye a szférikus tükrökhöz képest, hogy on- és off-axis elrendezésben is használhatóak, csupán a tükröző felületet definiáló parabolaszületet kell jó megválasztani. A felhasználás módja egy adott tükrökre így rögzített – csupán a megfelelő szögben érkező, párhuzamos fénysugarak fókuszálása aberrációmentes. A gyakorlatban a legtöbbször az off-axis típusú parabolatükröket (OAP) használják. A valóságban a hibamentes fókuszálás elérése nem triviális.

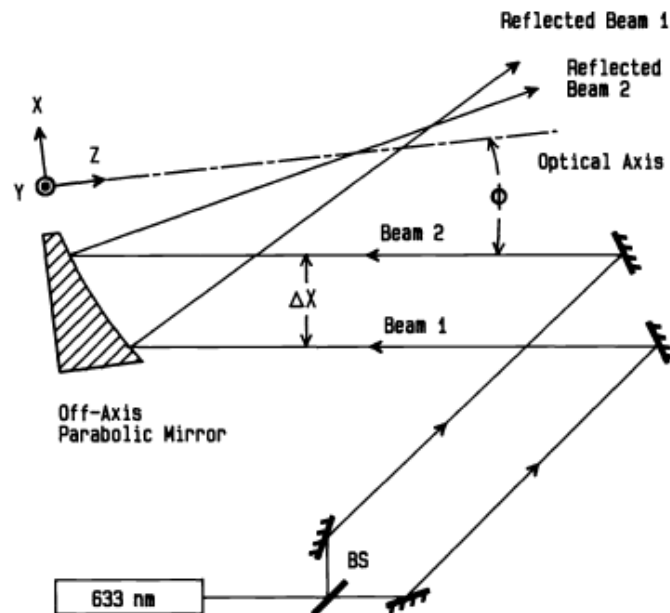
A gyakorlatban használt lézernyalábok kollimáltsága nem egy kézenfekvő tulajdonság, azonban kellő precizitással megközelíthető a diffrakciólimitált divergencia. A nagyobb gondot a parabolatükrök beállításra való érzékenysége jelenti. Amennyiben adott egy kollimált nyaláb, a parabolatükör tengelyének és a nyaláb tengelyének kollinearísnak kell lennie a jó lefókuszálás eléréséhez (vagyis a két tengelynek egybe kell esnie). Amennyiben a parabola valamilyen irányban, csupán kis mértékben ki van forgatva a beeső nyalábhoz képest, úgy jelentős mértékben megjelenik mind a szférikus aberráció, mind az asztigmatizmus. Adódik tehát a kérdés, hogy milyen módszer segítségével lehet egy ilyen parabolatükröt gyakorlatilag mrad és tizedmiliméter pontossággal beállítani. Emellett a gyakorlati felhasználása során a tükrök elhelyezkedése is fontos a rendszeren belül, hiszen egy kísérleti elrendezésben általában előre definiált (sokszor néhány 10 μm pontossággal) a fókuszpont helye, ahol a lézer-anyag kölcsönhatásnak történnie kell.

A probléma megoldásának számos formája ismert (pl. [14]), melyek azonban többnyire idő- és energiaigényes procedúrák. Egyes esetekben, bizonyos pontossággal az OAP a saját geometriája segítségével (pl. tükrök hátlapjának kialakítása – legyen merőleges a bejövő nyaláb tengelyére) beállítható, azonban az aberrációk nagy mértékű kiküszöböléséhez már precízebb módszereket kell alkalmazni. A legelterjedtebb eljárás az ún. szukcesszív approximáció. A módszer egyszerű: a parabolatükröt behelyezzük a nyalábútba, s ezt követően a fókuszfoltot folyamatosan monitorozva igyekszünk a parabolatükör eltolásával, forgatásával (mind az asztal síkjában, mind a tükrök tengelye körül), döntésével nagyobb intenzitást és szebb profilt elérni.

A fókuszolt monitorozása történhet egy kamera segítségével, ahol a CCD vagy CMOS chipre eső foltot detektáljuk. Kellően nagy intenzitás esetén lehetséges a fókuszpontban keletkező plazma fényességéhez mérten optimalizálni a rendszert. Ez igen egyszerűen hangzik, azonban a valóságban, valós körülmények között nem az, valamint rendkívül idő- és figyelemigényes.

A szukcesszív approximáció problémája, hogy a beállítás folyamatának sorrendjét, lépéseit nem adja meg, csupán az eredményt vizsgálhatjuk, mely nem mindig egyértelmű. A folyamat közben csupán annyit érzékelünk, hogy az adott forgatás, mozgatás javított-e a fókuszolt intenzitását, illetve profilján, vagy sem. Azt már nem tudjuk, hogy ezt követően melyik más koordinátán szükséges módosítani. Nehezíti még a beállítást az, hogy a mozgatással változtatjuk a parabola fókuszpontjának a helyét, így a kamerás megoldásoknál sokszor szkennelni kell a fókuszolt környezetében. Emellett az alkalmazott tükörtartók nagy része esetén az állító csavarokkal döntés közben ki is mozgatjuk az OAP középpontját az előző pozíciójából, tehát több koordinátát egyszerre változtatunk. Összefoglalva, a módszer gyakorlati szempontból nem hatékony, sokszor nem is ad elegendően pontos eredményt.

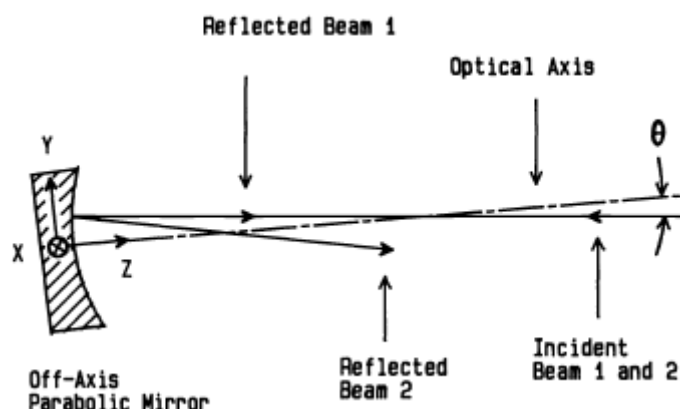
Az idők során kutatócsoportok kidolgoztak különböző eljárásokat a beállítás folyamatának megkönnyítése érdekében. A Yeon H. Lee [15] által publikált módszer esetén két, egymással



3. ábra: Az elrendezés felülnézetből. [15]

párhuzamos nyaláb szükséges a beállítás elvégzéséhez. A kutató He-Ne lézer nyalábját osztotta ketté, majd ezen két nyalábot párhuzamosította egymással, illetve az optikai asztal síkjával úgy, hogy a két nyaláb távolsága közelítőleg a parabolatükör átmérője legyen (lásd 3. ábra). Az OAP-ot a nyalábok útjába helyezve először a vertikális, majd a horizontális irány került beállításra.

Vertikális esetben a távpontot a visszavert sugarak asztallap síkjával bezárt szöge jelentette, azaz, hogy mennyire térnek ki a horizontális síkból (lásd 4. ábra).



4. ábra: Az elrendezés oldalnézetből. [15]

A horizontális irány beállításához egy síktüköröt használt, melyet a két nyaláb keresztezésének pontjába helyezett, majd az innen az OAP-ra visszareflektált nyaláb megfigyelésével, és a tükrök állításának iterálásával végezte el az optimalizálást. A módszer segítségével néhány mrad pontossággal beállítható a parabolatükör, azonban az elrendezés előkészítése (két lézernyaláb párhuzamosítása, magasság ellenőrzése, síktükör beállítása) is időt igényel.

Egy másik esetben [16] öt, egymással párhuzamosított lézernyalábot alkalmaztak, hasonló ötlettől vezérelve. Ebben az esetben nagyobb hangsúlyt fektettek a beállítólézerek hangolására, melynek, és az öt nyaláb által nyújtott több referenciaadatnak köszönhetően precízebb beállítást értek el. A folyamat megfelelően gyors elvégzéséhez azonban speciális eszköz szükséges, mely öt, egymással párhuzamos lézernyalábot szolgáltat. Enélkül, nyalábosztással és -tereléssel létrehozni az öt nyalábból álló elrendezést szintén időigényes folyamat.

Lehetséges megoldás az M^2 nyalábparaméter mérése, és ennek használata a beállítás jósági tényezőjeként [17]. A paraméter a fókuszolt vizsgálatával határozható meg. Merve a fókuszolt nagyságát két, egymásra merőleges tengely mentén, az adott tengelyre az M^2 értéke meghatározható a következő formula segítségével:

$$M^2 = \frac{\pi d d_0}{4 \lambda f}.$$

Az összefüggésben szereplő d a nyaláb átmérője a fókuszban, d_0 a nyalábátmérő a Near Field-ben, λ a hullámhossz, és f az OAP fókusz távolsága. A különböző aberrációk a fókuszoltot, és így az M^2 paramétert növelik, így a paraméter minimalizálásával az aberrációk is minimalizálhatóak.

A különböző fókuszolt vizsgálati módszerek esetén nem elhanyagolható tény az, hogy a rövid impulzusú lézerek esetén a fókuszoltban megjelenő intenzitás kis energiákon is nagy (könnyen 10^{16} W/cm^2 nagyságrendű is lehet). Ennek következtében pedig felléphetnek a fentebb már említett nemlineáris jelenségek, melyek hatására a fókuszolt maga is torzul, ezáltal pedig a mérés részben vagy egészében ellehetetleníti, félrevezető eredményeket szolgáltat.

Az eddig ismert módszerek mind a „lézer” szemszögéből közelítették meg az off-axis parabola beállítását: először a lézernyaláb beállítása, majd a beállított nyaláb útjába a parabolatükör behelyezése, s hozzáigazítása a nyalábvonalhoz. Ez a természetes, „soros” gondolkodásmód azonban nem minden esetben vezet optimális eredményre, s létezhetnek jobb megoldások is más szemszögből tekintve a problémára. Ez igaz az OAP beállításra is, az általam kidolgozott procedúra is egyfajta fordított gondolatmeneten alapszik, melyet a következő fejezetben ismertetek.

2. Kísérletek, mérések

2.1 OAP beállítási procedúrájának kidolgozása

2.1.1 A kísérleti elrendezés felépítése

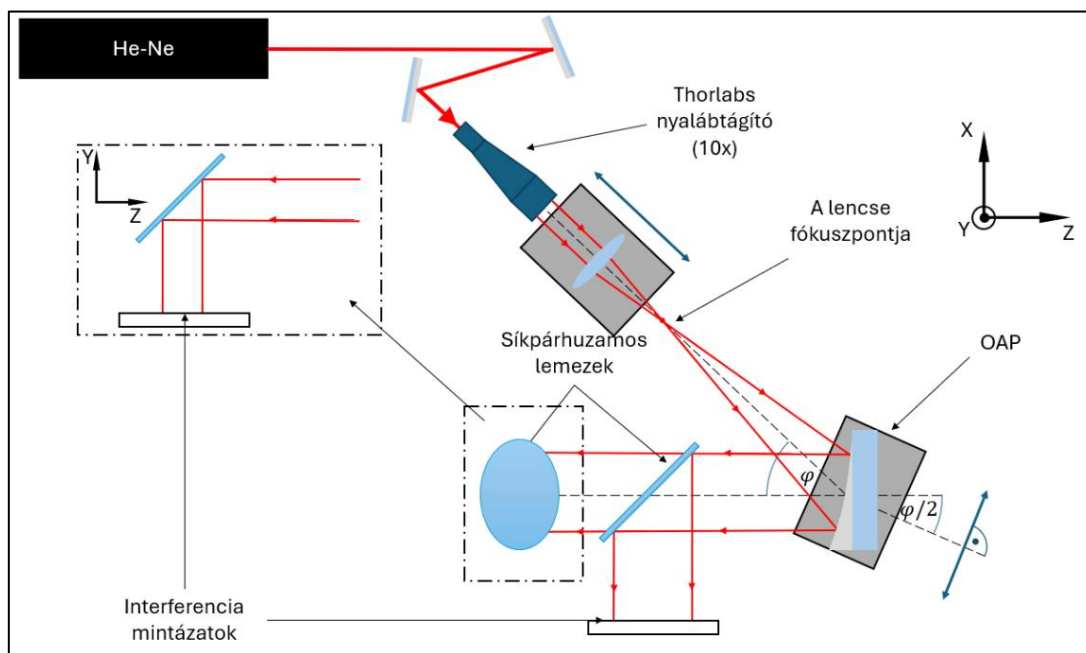
Az előző fejezetben ismertetett OAP beállítási eljárások időigényessége mellett további problémát jelent a pozicionálás kérdése. Hiszen a legtöbb kísérleti elrendezésnél az interakciós pont, azaz ahol a lézerimpulzus és a céltárgy találkozik, fix helyzetű, a diagnosztikák és a rendszer további részeinek elhelyezkedése ezen paraméter függvénye. Így hát elengedhetetlen ezen pozíció rögzítése, ami azonban korántsem triviális. Belegondolva, az eddig tárgyalt procedúrák csupán arra összpontosítanak, hogy a lehető legjobb, aberrációmentes fókuszálást valósítsák meg, arról nem esik szó, hogyan biztosítható az OAP fókuszpontjának és a kijelölt interakciós pontnak az átfedése. Természetesen lehet azt mondani, hogy az OAP fókuszpontjának vizsgálatául szolgáló diagnosztikát kell úgy megépíteni, hogy az előre kijelölt pontban lehessen megfelelő fókuszfoltot elérni, ez azonban még tovább bonyolítja az eddig is komplikált eljárást.

A parabolatükör újszerű beállításának ötletét is részben az előbb említett probléma adta: közelítsük meg a beállítási procedúrát „hátról”, vagyis előbb definiáljuk az interakciós pontot, majd az OAP-ot helyezzük úgy, hogy a fókuszpontja egybeessen ezen ponttal. Az interakciós pont kijelöléséhez alkalmazhatunk lényegében bármilyen fókuszáló eszközt, mint lencse, lencserendszer, objektív stb., melyet valamilyen lézerrel (pl. He-Ne) kivilágítunk. A fókuszáló optikát elhagyó lézernyaláb fókuszfoltja jelöli ki a kölcsönhatási pontot, így célszerű rövid fókuszú optikát választani, hogy a folt kellőképpen kicsiny legyen. A fókuszstíkot elhagyó divergens lézernyaláb a parabolatükörré esik, majd azt elhagyva „visszafelé” terjed a rendszerben.

A módszer esetén így a OAP fókuszpont és az interakciós pont átfedése biztosított, amennyiben a parabolatükör beállítása megfelelő. A kérdés azonban, hogy a fókusz irányából terjedő nyaláb segítségével hogyan állítható be a tükör helyzete. A válasz egyszerű: a fókuszpont definíció szerint az optikára beeső, (egymással és az optikai tengellyel) párhuzamos sugarak metszéspontja, így az állítás fordítottja is teljesül, vagyis a fókuszpontból érkező sugarak a parabolatükröt párhuzamosan hagyják el. Tehát az eljárás esetén megoldandó feladat az off-axis parabolát elhagyó lézernyaláb kollimációjának ellenőrzésére egyszerűsödik.

A kollimáció ellenőrzéséhez általunk alkalmazott módszer a nyaláb interferenciáján alapszik. Ismeretes, hogy síkpárhuzamos lemezre beeső, majd az első és a hátsó felületről visszavert fénysugarak között fáziskülönbség jön létre. Ez a fáziskülönbség a két sugár interferenciája esetén megadja a relatív eredő térerősséget, így az intenzitást is. Amennyiben kiterjedt, kollimált nyaláb esik a lemezre, úgy a reflektált interferenciamintázat (a lemez vastagságából és a beesési szögből, valamint a lemez anyagából adódó fáziskülönbség függvényében) egy homogén folt. Ez egyszerűen belátható, hiszen az első és hátsó oldalról visszavert nyalábok térbeli profilja nem változik, pontról pontra azonos optikai úthosszkülönbséggel, így fáziskülönbséggel találkoznak. Amennyiben a beeső nyaláb nem kollimált, úgy az interferenciamintázat megváltozik (hiszen a fáziskülönbség pontról pontra eltérő lesz), s a nyaláb aberrációit jellemző foltot eredményez.

A módszer kidolgozásához egy külön kísérleti elrendezés került megépítésre, mely elegendő mozgásteret adott a mérés különböző paramétereinek változtatásához. A mérési elrendezés sematikus vázlatát az 5. ábra mutatja.



5. ábra: Az OAP beállításához készített elrendezés vázlata.

A beállítólézerként egy frekvenciastabilizált He-Ne lézer szolgált, melynek jó idő- és térbeli koherenciatulajdonságai szükségesek az interferometrikus vizsgálatokhoz. A lézernyalábot két tükör segítségével tereltem az OAP irányába, ügyelve arra, hogy az optikai asztallal párhuzamosan haladjon. A lézernyaláb útjába helyeztem egy nyalábtágító eszközt (Thorlabs GBE10-B), mellyel a He-Ne nyalábméretét a tízszeresére növeltem. Erre azért volt szükség, hogy a nyalábtágítást követő fókuszálást végző lencse apertúráját nagyobb részt kitöltsem, ezzel

növelve a parabolatükörre jutó nyalábméretet. A lencsét és a parabolatükört egy-egy vezérelhető lineáris eltolóra (PI) helyeztem. A lencse alatti eltoló az optikai tengellyel párhuzamos, a tükör alatti eltoló a tükör két tengelyének (bejövő nyaláb és a fókusz iránya) szögfelezőjével merőleges irányban lett elhelyezve.

Síkpárhuzamos lemezként két azonos tulajdonságú, optikai minőségű ($\lambda/10$ felületi minőség és 0,15 arcmin párhuzamosság), 4 hüvelyk átmérőjű vákuum ablaküveget használtam. A két lemezt egymásra merőleges, vízszintes és függőleges tengely mentén elforgattam úgy, hogy az OAP-ról visszavert nyaláb $\sim 45^\circ$ -os szögben érje a felületeket. A két különböző, egymásra merőleges síkból való kidöntés azért szükséges, hogy a hullám terjedésére merőleges két független irányban egyszerre legyen vizsgálható a hullámfront torzulás. Az interferenciamintázatot két fehér ernyőn fogtam fel, s a dokumentáció megkönnyítése érdekében egy-egy kamerával rögzítettem a kapott képeket.

2.1.2 Kísérleti elrendezés optikai beállítása

Mivel a cél a parabolatükör precíz beállítása volt (néhány 10 μ rad az irány- és 10 μ m a pozíció megkövetelt pontossága), így az optikai rendszer más elemeit is a lehető legprecízebben kellett beállítani. A nyalábtágító berendezés finomhangolásához kihasználtam a laboratórium (ELI-ALPS MTA labor) fizikai méreteit, és a megnövelt átmérőjű He-Ne nyaláb kollimációját a nyalábméret összehasonlításával ellenőriztem, kb. 20 m-es távolságú pontok között. Következő lépésként a fókuszáló lencse ($f = 100$ mm) lineáris eltolóját állítottam a nyalábúttal párhuzamos pozícióba. Ehhez a két végállás között mozgattam, s közben egy a nyaláb magasságába felállított íriszt figyeltem. Amennyiben a két végállásban az íriszen centrált volt a He-Ne foltja, úgy a tengely megfelelő irányban állt. Az eltolón elhelyeztem a lencsét és pozicionáltam úgy, hogy mind az áthaladó, mind a reflektált nyaláb tengelye egybeessen a beeső nyaláb tengelyével.

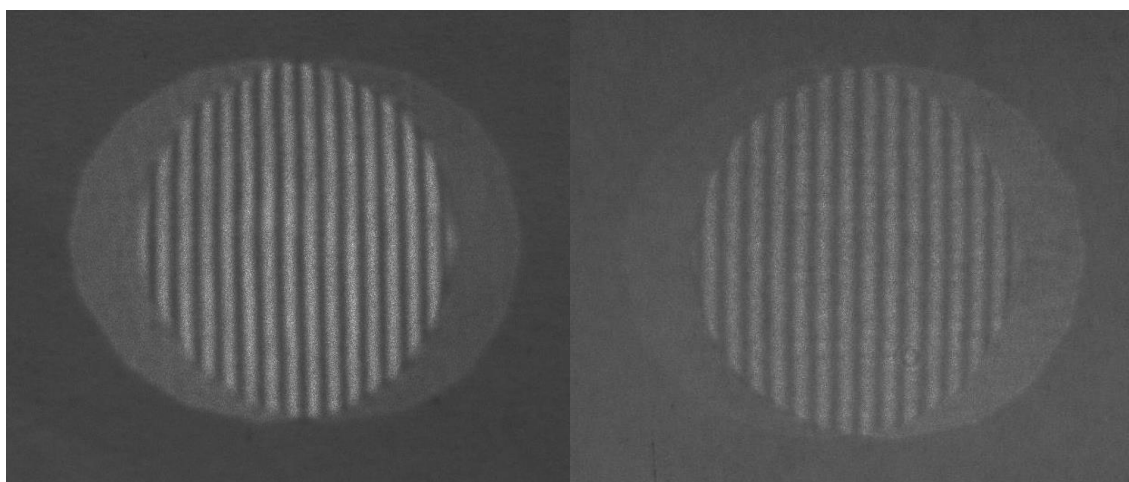
A lencsén fellépő szférikus aberráció csökkentése érdekében a lencse elé egy íriszt helyeztem, mellyel a belépő apertúra méretét csökkentettem. Mivel az íriszt elegendő mértékben nyitva hagytam, így a széleken való elhajlásból adódó interferencia hatása nem befolyásolta a mérést. A vizsgálataimat két különböző apertúra mellett végeztem.

Ezt követően az OAP alatti eltoló tengelyét állítottam be geometriai módszerek segítségével. A beállítást követte a parabolatükör elhelyezése. A beeső nyalábhoz viszonyítva kimértem az OAP névleges fókusz távolságát és a tengelyirányt, majd ehhez pozicionáltam a tükröt. Végül a

reflektált nyaláb útjába helyeztem a két planparallel lemezt, elhelyeztem az ernyőket és a kamerákat.

2.1.3 A parabolatükör beállítása

Első lépésként a lencsét távolítottuk a parabolatükörtől annak érdekében, hogy a „defókuszáltság” okozta hiba domináljon a kapott interferenciaképeken. Egyszerűen belátható, hogy amennyiben egy olyan nyaláb esik a döntött síkpárhuzamos lemezt, mely megfelelőképpen divergens, úgy a kapott interferenciamintázaton sok, egymással párhuzamos sötét-világos vonal látható. Mivel a geometriai előbeállítása az elrendezésnek megfelelően sikerült, így visszakaptuk a várt mintázatokat, melyek a 6. ábrán láthatóak.

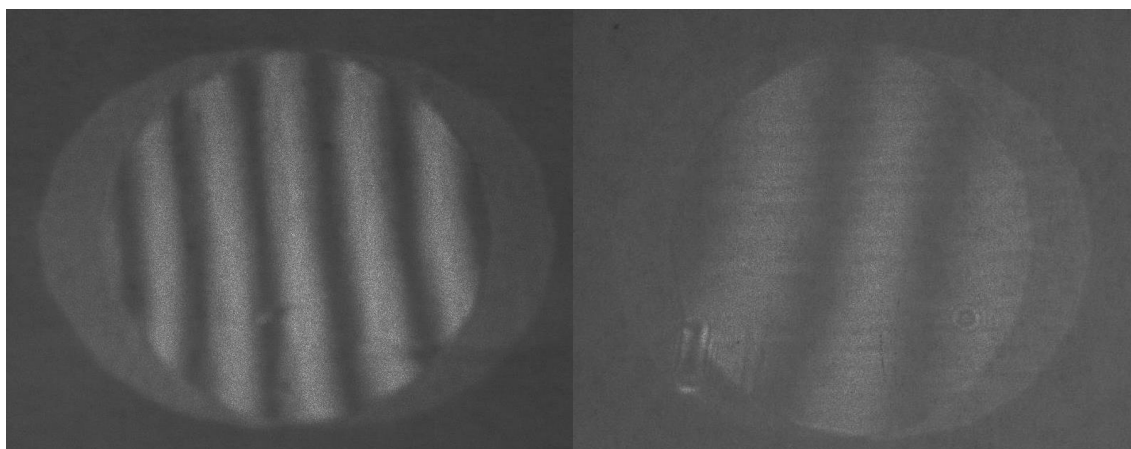


6. ábra: A kapott mintázatok a távoli lencse-parabolatükör pozíció esetén. Bal oldalon a függőleges, jobb oldalon a vízszintes tengely mentén kidöntött lemeztől reflektált nyaláb képe (horizontális, illetve vertikális mintázatok).

A váltakozó sötét és világos vonalak a beesési szög változása miatti eltérő optikai úthosszak következményei, melyet a különböző sugarak megtesznek. A vonalak a lemez azon tengelyével párhuzamosak, mely mentén a lemez ki lett döntve a nyaláb tengelyére merőleges pozíciójából. Ez egy fontos tulajdonság, mely abból ered, hogy az említett tengellyel párhuzamos egyenesekre beeső sugarak szakaszonként azonos fáziskülönbséggel rendelkeznek a reflexiót követően. Ezzel szemben erre merőlegesen a nyaláb tágulása miatt az adott egyenesre illeszkedő sugarak mentén változik a beesési szög, s így a sugarak közötti fáziskülönbség.

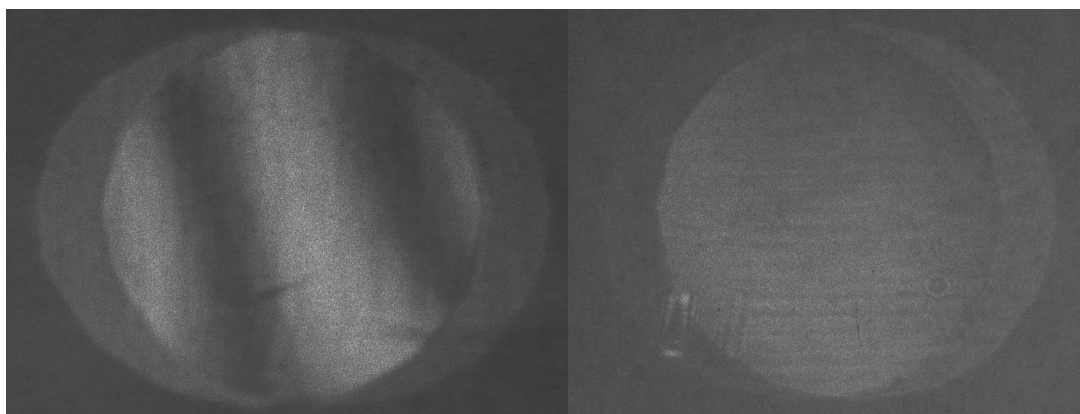
Közelítve a lencsét a vonalak ritkulnak és kissé torzulnak, illetve elfordulnak az eredeti irányhoz képest, ahogyan az a 7. ábrán is látható. Az elfordulás oka a reflektált nyaláb terjedési irányának eltérése az elődefiniált iránytól. Azaz, más szóval az OAP ki van forgatva vertikálisan és horizontálisan is. A hatás megjelenése annak tudható be, hogy a defókuszáltság csökkentésével a kisebb szögeltérések is jelentőssé válnak. A vonalak számának a két vizsgált

megfigyelési irányban azonosnak kell lennie, amennyiben a két síkpárhuzamos lemez elforgatottsága azonos (praktikusan 45°). Amennyiben utóbbi feltétel fennáll, de a mintázat mást mutat, úgy a jelenség további aberrációk jelenlétére utal.



7. ábra: A lencse-OAP távolság csökkentésével kirajzolódó, dőlt vonalak a horizontális (bal oldal), illetve vertikális (jobb oldal) mintázatokon.

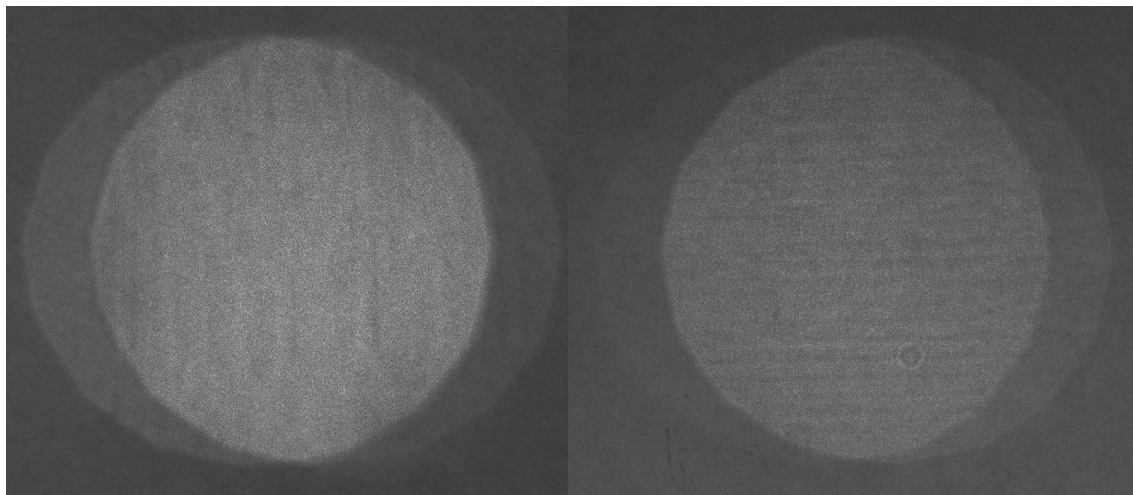
Tovább csökkentve a lencse és a parabolatükör közötti távolságot, a ritkuló vonalak egyre inkább torzulnak és elfordulnak, majd egy ponton „átfordulnak” az eredeti irányra merőlegesen, s tovább az eredeti iránnyal ismét párhuzamosan, majd elkezdenek sűrűsödni. Ez az átfordulás jelenti a lencse fókuszpontjának áthaladását az OAP fókuszsíkján. A rendszerben lévő asztigmatia miatt a két vizsgált irányban a vonalak ritkulása nem azonos értékű, az „átfordulás” előbb az egyik, majd a másik mintázaton jelentkezik (8. ábra). A homogén folt helyett a különböző iránybeli és pozícióbeli eltérések miatt kapunk egy torzult, középen egy-két világos és sötét sávból álló mintázatot.



8. ábra: A vertikális mintázat az átfordulás pillanatában (jobb oldal), illetve az ekkor látható horizontális mintázat (bal oldal)

Következő lépésként visszatértem az erősebben defókuszált esethez (7. ábra), majd az OAP eltolójának mozgatásával, valamint a tükörtartó csavarjainak segítségével (az OAP döntésével és forgatásával) igyekeztem kikorrigálni a fellépő torzulásokat. Ezt követően visszatértem a

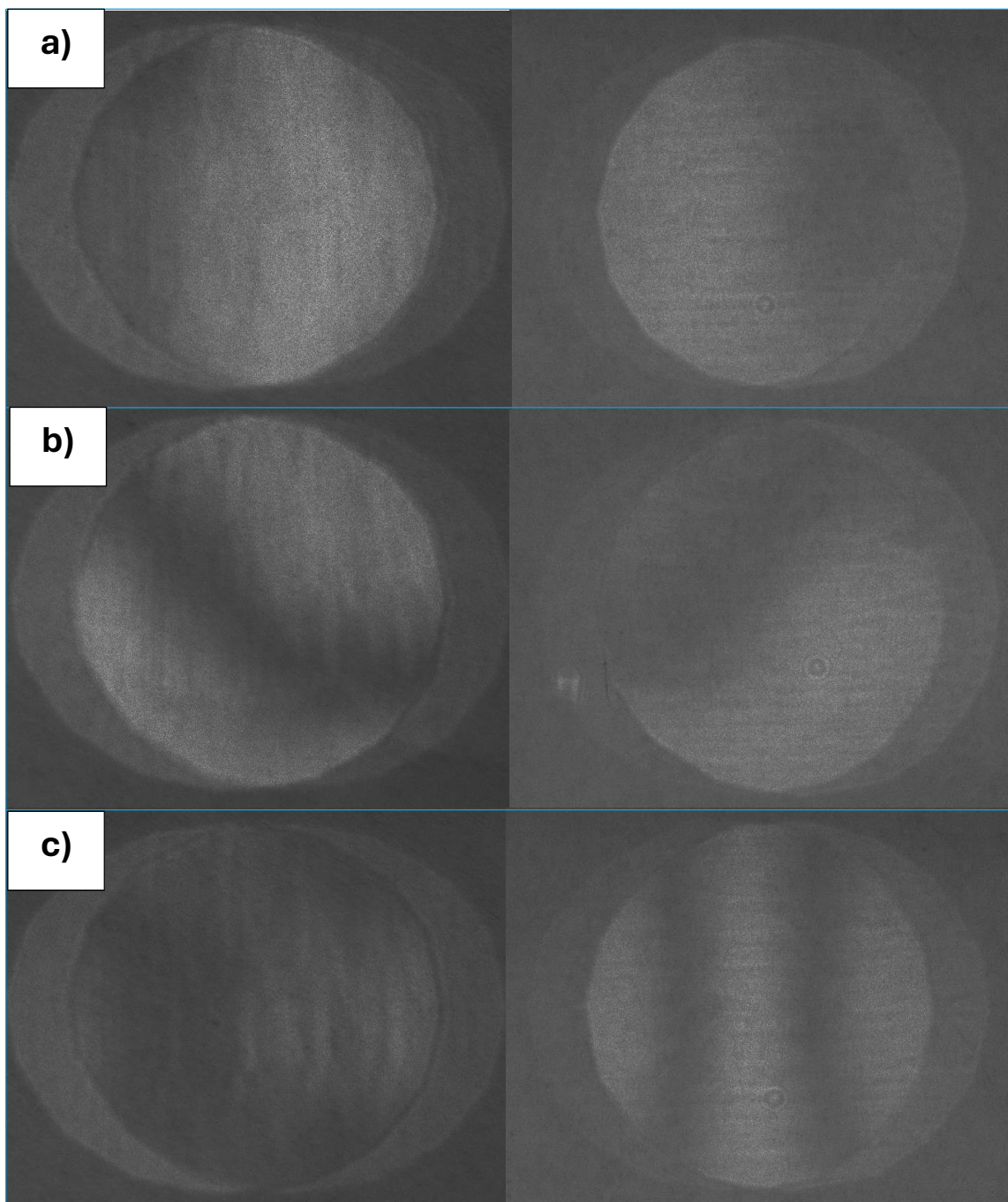
fókuszközeli pozícióba, majd itt ismét kiküszöböltem a fellépő hibákat. Az iterációk elvégzésével megkaptam a várt homogén kivilágítású foltokat a két tengely mentén (9. ábra).



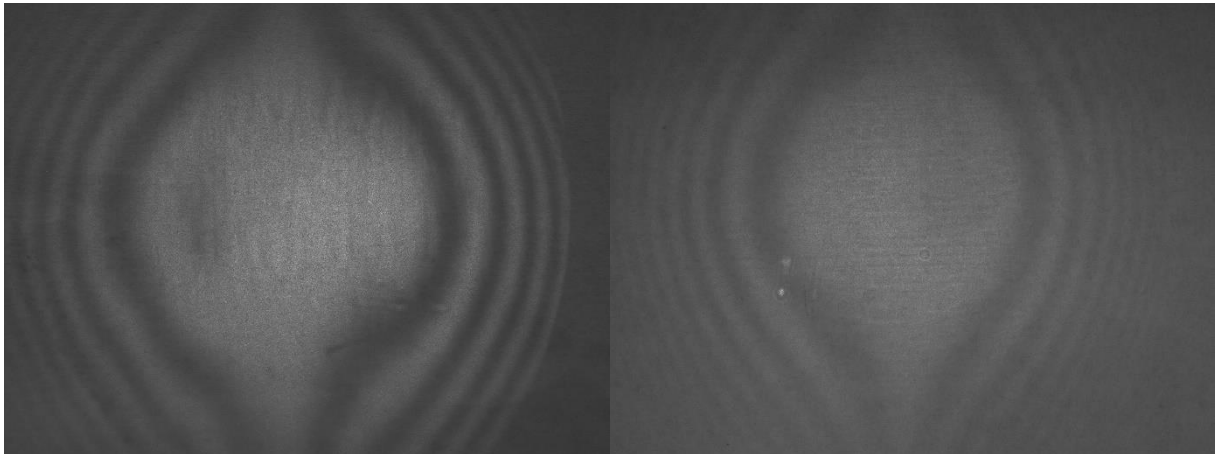
9. ábra: A kollimált nyaláb esetén kapott homogén kivilágítású foltok.

A kollimációt klasszikus módon is leellenőriztem, vagyis két, egymástól távoli pontban lemértem a nyaláb méretét, mely mérési eredmények hibahatáron belül megegyeztek, igazolva az interferometrikus módszerem helyességét.

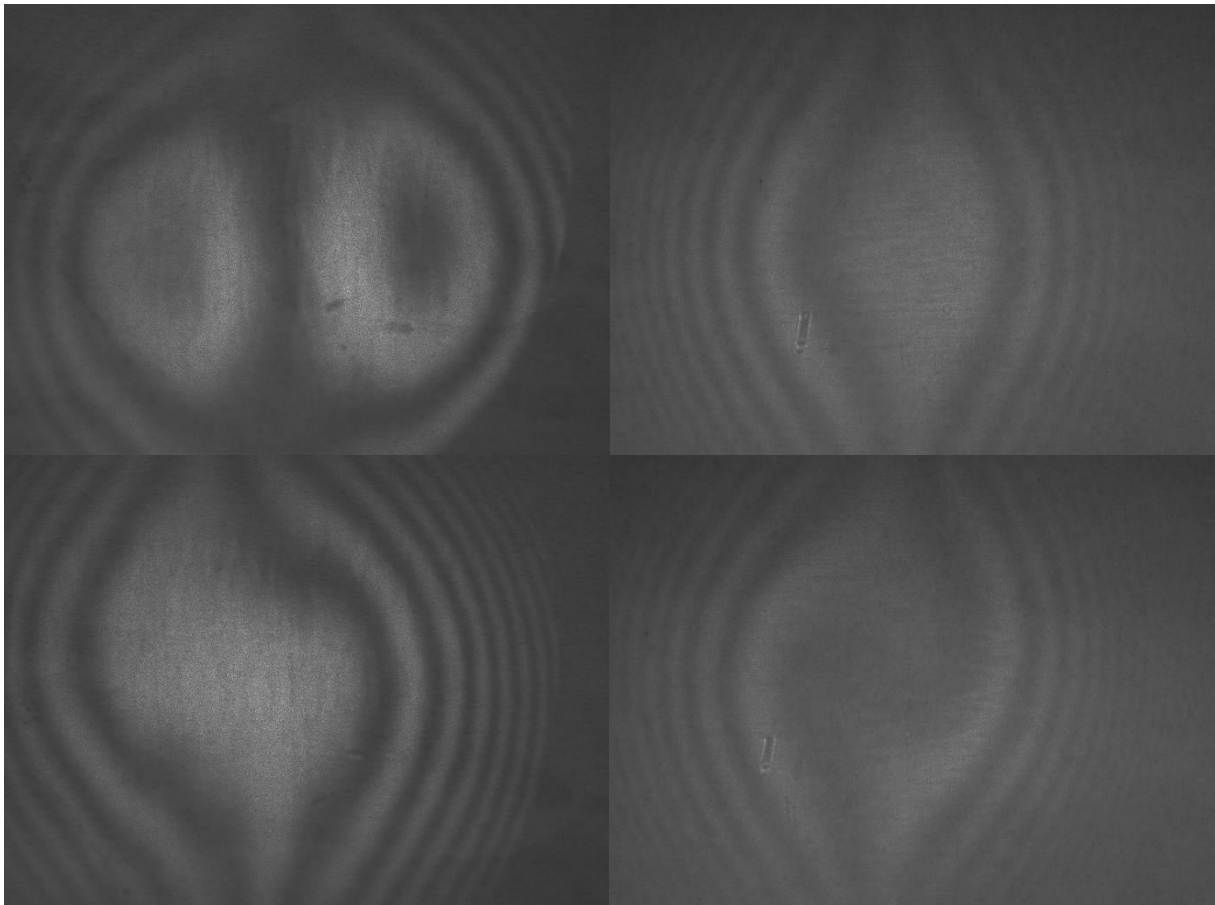
Miután sikerült beállítani a parabolatüköröt, megfigyeltem és rögzítettem a különböző paraméterek változtatása esetén kapott interferenciamintázatok képeit. Változtattam az OAP horizontális (10.a), vertikális (10.b) döntését, az eltolóval a pozíciót (10.c), egymástól külön (azaz mindig csupán egy paramétert, majd visszatértem az eredeti pozíciókba). Emellett megvizsgáltam a szférikus aberráció hatását, melyet a lencse okoz a tengelytől távoli sugarak leképezésével. Ehhez megnőveltem a lencse apertúráját a lencse előtti írisz kinyitásával. Az interferenciaképek szélein megjelenő sötét-világos íves sávok mellett a centrumban a homogén folt megmaradt (11. ábra), így elmondható, hogy bizonyos mértéken belül ez a hiba nem rontja le a beállítás minőségét. A nagy apertúra mellett készítettem felvételeket a parabolatükör horizontális, valamint vertikális döntésével nyerhető mintázatokról is, ezek a 12. ábrán láthatóak.



10. ábra: A különböző pozícióparaméterek változtatásával nyerhető interferenciaképek (bal – horizontális, jobb - vertikális): a) horizontális döntés; b) vertikális döntés; c) eltolás.



11. ábra: A lencse belépő apertúrájának növelésével kapott interferenciaképek, beállított OAP esetén.



12. ábra: A szférikus aberrációval terhelt rendszer az OAP horizontális (fent), illetve vertikális (lent) döntése esetén (bal oldal – horizontális mintázat; jobb oldal – vertikális mintázat).

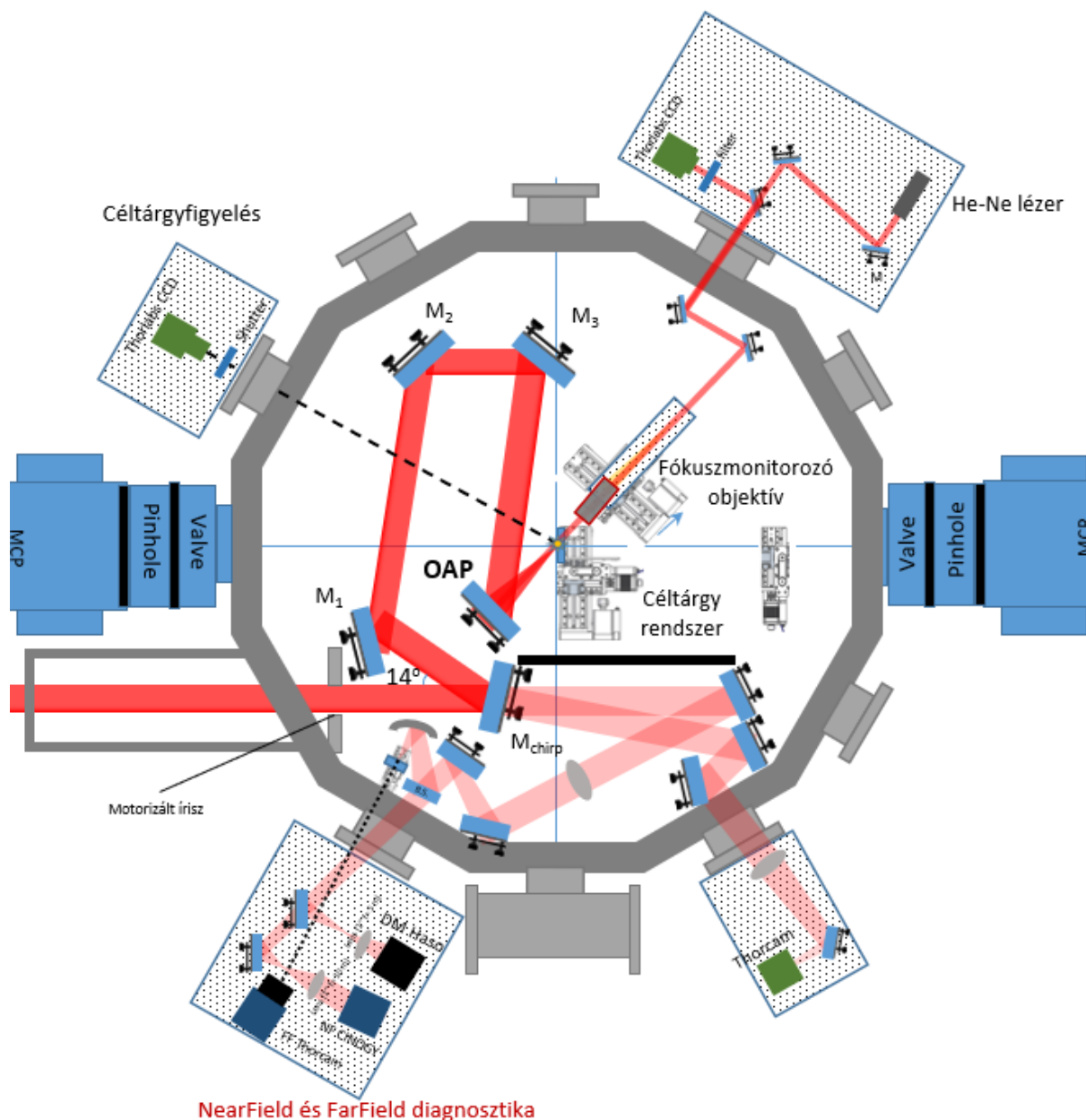
Az esetek tanulmányozása és az ismételt kísérletek segítségével a következő eljárást dolgoztam ki az off-axis parabolatükör fent leírt elrendezéssel történő beállítására:

1. A fentebb ismertetett elrendezés kialakítása, a He-Ne lézer, valamint az eltoló és lencse beállítása.
2. Az OAP pozíciójának és irányának kimérése a beeső nyalábhoz viszonyítva, ezek alapján a parabolatükör elhelyezése.
3. A síkpárhuzamos lemezek elhelyezése és beállítása, az ernyők elhelyezése.
4. A lencse mozgatása az eltoló segítségével a vonalas struktúra megjelenéséig.
5. A lencse mozgatása azon irányba, mely esetén az interferenciaképeken megjelenő vonalak ritkulnak. A mozgatást addig kell végezni, míg az egyik interferenciaképen a vonalas struktúra teljesen eltűnik, illetve átfordul a centrum körül.
6. Átfordulás esetén a parabolatükör megfelelő irányú mozgatásával (horizontális mintázaton a horizontális döntés és eltolás, vertikális mintázaton a vertikális döntés – amennyiben a magasság nem jó, úgy annak állítása is opció lehet) korrekciók elvégzése.
7. Az előbbi két lépés iterálása – hiszen a döntések és eltolás következtében az OAP kimozdul az adott tengely menti fókuszpozícióból, így újra ellenőrizendő a vonalak viselkedése.
8. Az átfordulás megszüntetése (közelítőleg homogén folt elérése) után a két mintázat változásának összehangolása – a lencse lineáris mozgatsakor a két képen látható vonalak egyszerre ritkuljanak, ériék el a homogén fázist, majd sűrűsödjenek. Ehhez célszerű a horizontális döntés, azaz az OAP függőleges tengely körüli forgatása által a horizontális mintázatot hozzáhangolni a vertikálishoz.
9. Amennyiben sikeres az előző lépés, annak ellenőrzése, hogy a lencse mozgatásával a két mintázat azonosan változik, és egyszerre érkeznek a homogén fázisba. Ezt követően esetlegesen a homogén folton látható hibák korrigálása, amennyiben fennállnak.
10. Megjegyzendő, hogy az állítás során feltételezzük, hogy az OAP a tükörtartóba megfelelően van befogatva, azaz nincs elforgatva a saját tengelye körül. Amennyiben ez a feltétel nem teljesül, a beállítás során nem vétünk hibát. Pusztán a parabolatükört elhagyó kollimált nyaláb nem marad párhuzamos az optikai asztallal, hanem kilép a síkból. Amennyiben ez az eltérés kis mértékű, úgy a probléma egyszerűen korrigálható a későbbi nyalábterelő tükrök segítségével.

2.2 OAP beállításának alkalmazása az MTA és TeWaTi laboratóriumokban

2.2.1 ELI-ALPS: MTA laboratórium NLTL nyalábvonal

A Nemzeti Lézeres Transzmutációs Laboratórium (NLTL) iongyorsítási és neutronkeltési kísérleteit az ELI-ALPS kutatóközpont MTA laboratóriumában végzi. A laboratóriumban elhelyezkedő, az NLTL birtokában lévő nyalábvonal végén található a céltárgy kamra, melyben a lézer-anyag kölcsönhatás végbemegy (13. ábra).



13. ábra: A céltárgy kamra sematikus ábrája.

A céltárgy kamrában a lézer egy hosszabb vákuumcsövön keresztül érkezik az első nyálábtürelő tükörré (M_{chirp}), melyről a további síktükrökre (M_1 , M_2 , M_3) jut, majd végül az off-axis

parabolatükörre (OAP) érkezik. A parabolatükör az impulzusokat a fókuszpontba gyűjti össze, melynek egybe kell esnie a kamra középpontjával. Az OAP fókuszáló tengelyével kollineárisan helyezkedik el egy lineáris, vezérelhető (x, y, z irányú) eltolókra szerelt 10x nagyítású objektív, mely eredetileg két célt szolgál. Egyrészt vizsgálható vele a fókuszolt minősége (kis intenzitású impulzusok esetén), valamint szilárd céltárgyak esetén „célzó” objektívként használatos – ehhez pedig egy kamrán kívüli He-Ne lézer nyalábját használjuk, mely kollineáris az OAP-ot elhagyó nyaláb tengelyével.

A nyalábvonal beállítását segítő diagnosztikai ág az első terelő tükrön (M_{Chirp}) átszűrődő, alacsony energiájú impulzusokat használja fel. A későbbiekben, az OAP és a fő lézernyaláb útvonalának egyszeri beállítását követően fontos szerepe van ezen diagnosztikai ágnak a beállított útvonal megőrzésében.

A lézer-anyag kölcsönhatása során a céltárgyból kilépő, felgyorsított ionok vizsgálatához felépített Thomson-spektrométerek a kamrában átellenesen helyezkednek el, s a kamra középpontjára néznek. Emiatt is fontos az OAP fókuszpontjának a kamra centrumába helyezése, hogy a létrehozott nagyenergiájú ionok a spektrométerekbe jussanak.

A parabolatükör beállításához felhasználtam az objektívet, illetve a He-Ne lézernyalábot. Az objektív szolgált a fókuszpontot definiáló eszközként (a korábbi lencsével ellentétben), melyet ebben az esetben fixen a kamra középpontjában kellett tartanom, így a beállításhoz nem mozgathattam a parabolatükör tengelye mentén. Ennélfogva szükséges volt az OAP alatti lineáris eltolót az objektív-OAP tengellyel párhuzamosan beállítani, hogy képes legyek a tükör tengelyirányú mozgatására. A parabolatükör keresztirányú mozgatása manuálisan lett elvégezve a procedura során, ez azonban nem okozott gondot. Egy másik változtatás az eredetileg kidolgozott eljáráshoz képest, hogy nem volt szükséges a nyalábtágítás elvégzése, mivel a 10x nagyítású objektív elegendően divergáló nyalábot állított elő a fókuszpontja mögött a parabolatükör apertúrájának megfelelő mértékű kitöltéséhez.

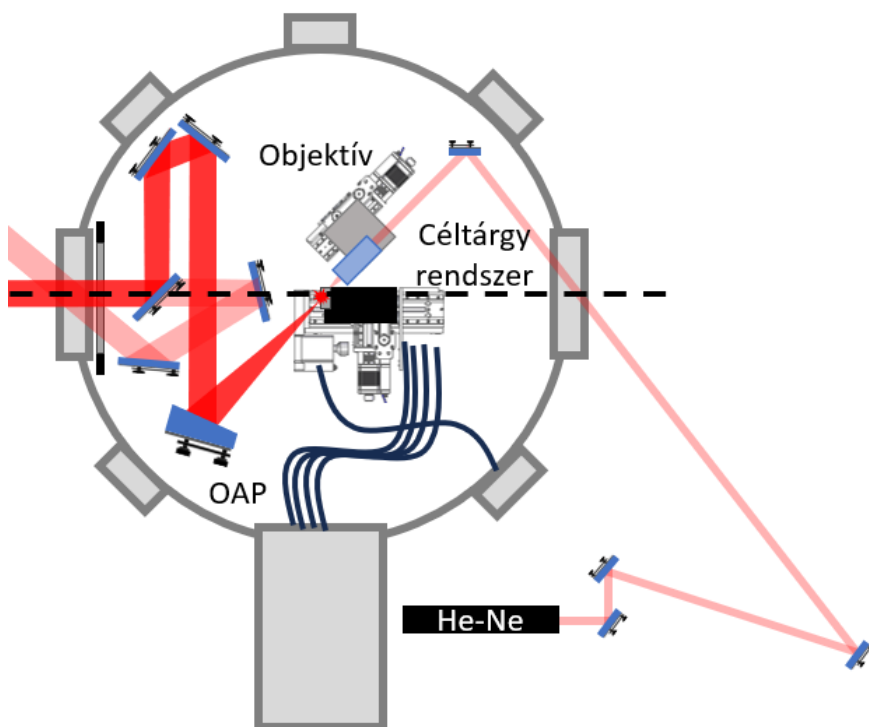
A parabolatükör beállítása az előző alfejezetben leírt pontokhoz hasonlóan történt. Elsőként a He-Ne lézert állítottam be a síktükrök segítségével. Mivel a fő lézernyalábnak a céltárgyakat 45° -os beesési szög mellett kellett érnie, így nyilvánvalóan a „beállítólézernek” is tartania kellett ezt az irányt (a későbbiekben a beállítólézer definiálja a fő lézer irányát). Következő lépésként az objektív beállítása következett, melyet úgy pozicionáltam, hogy a fókuszpontja egybeessen a kamraközépponttal. Ezt követte az OAP, majd a síkpárhuzamos lemezek és az

ernyők behelyezése. Végül pedig az interferenciamintázatok alapján a parabolatükör iteratív beállítása.

A rendszerben visszafelé terjedő, immáron kollimált beállító lézernyalábot a síktükrök segítségével (M3, M2, M1) centráltam a céltárgykamrában és az azt megelőző kamrában (CC2) lévő íriszekre. Ezt követően a CC2 kamrában lévő tükrökkel egy még távolabbi kamrába juttattam a nyalábot. A cél a minél nagyobb távolság elérése volt a céltárgy kamrától viszonyítva, hiszen ezt követően, a fő nyaláb és a beállító lézer „összelövése” annál pontosabb, minél hosszabb szakaszokat használunk fel erre. A céltárgy kamrában lévő diagnosztikai rendszer (és a hozzá tartozó, CC2-ben lévő motorizált tükrök) felhasználásával pedig a fő nyaláb minden esetben a megfelelő nyalábútra terelhető, így az előbb leírt beállítási és összelövési procedúrát egy hosszabb kísérletsorozat előtt egyszer elegendő elvégezni.

2.2.2 SZTE TeWaTi laboratórium röntgenforrás nyalábvonal

A Szegedi Tudományegyetem Optika- és Kvantumelektronika Tanszékén található TeWaTi lézertudományi laboratóriumban működő TW osztályú lézerrendszerhez kiépülő kísérleti elrendezés célja a lézerindukált röntgenkeltés vizsgálata. Hosszú távon egy a lézer által működtetett röntgen-CT berendezés kiépítése a cél, mely a Kooperációs Technológiák Nemzeti Laboratórium (KTNL) keretein belül valósul meg. Az általam tervezett kísérleti elrendezés hasonló módon épül fel,



14. ábra: A TeWaTiban lévő kísérleti kamra felépítése.

mint az MTA laboratórium NLTL céltárgy kamrája. A lézer anyag kölcsönhatás ebben az esetben is egy vákuumkarmában történik, melynek sematikus vázlata a 14. ábrán látható.

A kamrában elhelyezett objektív ebben az esetben is több célt szolgál: az alkalmazott szalagcéltárgy pozicionálását segíti, alkalmas a fókuszolt vizsgálatára, valamint segítségével a fő lézernyaláb fókuszálását végző OAP is beállítható. A kölcsönhatás, és így a parabolatükör fókuszpontjának helye nem teljesen megkötött, csupán a bemeneti-kimeneti átvezetések által kijelölt szimmetriatengely (a 14. ábrán fekete, szaggatott vonal) mentén kell elhelyezkednie. Ez némi mozgásteret nyújt a beállítások elvégzése során. A lézer beesési szöge ebben az esetben is 45° -ban volt meghatározva, ezt tehát figyelembe kellett venni a He-Ne nyalábút kiépítése során.

A beállítási procedúra az előző alfejezetben, az NLTL céltárgy kamrájában alkalmazottak szerint történt meg. Az OAP-ot elhagyó kollimált nyaláb és a fő lézernyaláb összelövése két, egymástól ~ 3 m távolságra lévő írisz segítségével lett elvégezve.

2.3 Az új OAP-nyalábvonal beállítási módszer hatása a kísérletekre

2.3.1 Az NLTL kísérletei

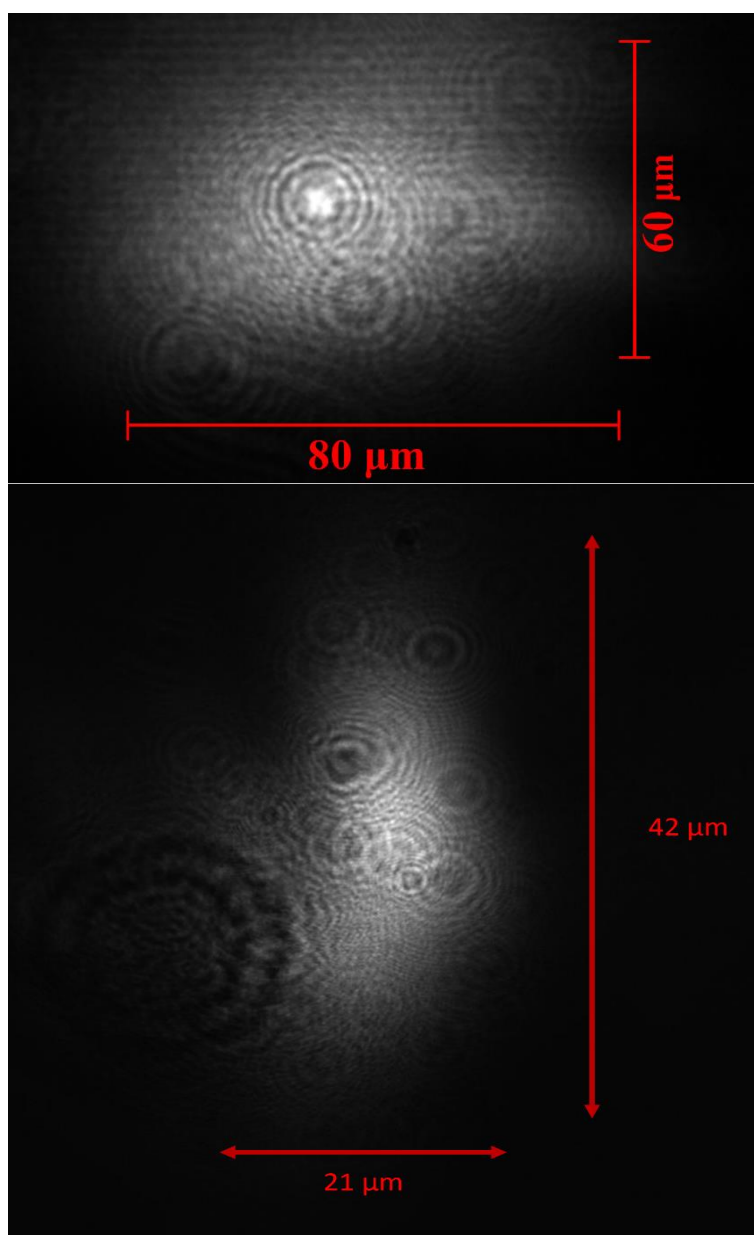
Az általam kidolgozott beállítási módszernek több előnye is kirajzolódott a lézeres iongyorsítási és neutrongenerálási kísérletek során.

Az OAP elhelyezésének javulásával nagy mértékben nőtt a fókuszpontban detektálható intenzitás. Az ezt igazoló mérést az objektívvel végeztük el úgy, hogy leképeztük a fókuszoltot egy ThorCam CS165MU1(/M) CMOS típusú kamerára. Az előző mérésekkel összevetve a fókuszolt félértékszélessége csökkent, a fókuszba jutó energia pedig nőtt, az intenzitás 2-3 szorosára emelkedett. Az intenzitásnövekedés az iongyorsítás hatásfokán is javított: az előző mérésekhez képest nagyobb cutoff energia vált elérhetővé ugyanazon impulzusparaméterek használata mellett.

A kölcsönhatás javulása mellett leegyszerűsödött és pontosabbá vált a fő lézer nyalábvonalának beállítása is. Ez pedig hatékonyabbá és gyorsabbá tette a kísérleti kampányok előtti előkészületeket: a több napos iterációs állítások helyett az egész nyalábút kb. 4-6 óra alatt beállíthatóvá vált. Továbbá a kísérleti időszakok közben is változtatható paraméter lett a céltárgyra való beesési szög, valamint a fókusz távolság (hiszen az OAP cseréje sem jelent problémát, a módszer az összes ilyen típusú tükörrel kompatibilis).

2.3.2 A KTNL kísérletei

A lézeres röntgenforrás terén végzett előkísérletek során is szembevető fejlődést mutattak a kísérleti eredmények. Az OAP interferometrikus beállítását megelőzően egy lencsével történt a lézernyaláb lefókuszálása. Ebben az esetben a fókuszfolt intenzitásának félértékszélessége $80 \times 60 \mu\text{m}$ volt, ezzel szemben az OAP behelyezését és beállítását követően mért foltméret $42 \times 21 \mu\text{m}$ -re csökkent le (15. ábra). Ezáltal jelentős intenzitásjavulást tapasztaltunk a fókuszpontban. Mindemellett a módszer egyszerűsége miatt a kísérlet egyéb paraméterei, mint a fókusztávolság, illetve a beesési szög, a kölcsönhatás pozíciója könnyen változtathatókká váltak.



15. ábra: Az objektív segítségével felvett fókuszfoltok egy lencse (fent), illetve a beállított OAP (lent) esetén. (Az alsó felvétel el van forgatva 90°-kal a felsőhöz képest.)

3. Összefoglalás és kitekintés

Munkám során áttekintettem a nagyintenzitású, ultrarövid lézerimpulzusok fókuszálásának elméleti hátterét, kitérve a felmerülő aberrációkra, illetve a különböző optikák alkalmazhatóságára. Tanulmányoztam az off-axis parabolatükrök esetén eddig ismert és publikált eljárásokat, kitérve azok hiányosságaira és hatékonyságára.

Az általánosan elterjedt OAP beállítási módszerekkel ellentétben, megfordítva a gondolatmenetet, sikeresen kidolgoztam egy eljárást, melynek segítségével „visszafelé” haladva állítható be a parabolatükrök, valamint a többi optikai berendezés. Az így csupán kollimációellenőrzésre redukálódott optimalizálási feladatot optikailag átlátszó, plánparallel lemezek segítségével, interferometrikus módon végeztem el. A módszer kidolgozásához előbb egy különálló mérési elrendezést építettem, melynek használatával tanulmányoztam a különböző interferencia mintázatokat. Ezt követően összeállítottam a beállításhoz szükséges lépések sorrendjét.

A módszert implementáltam két működő kísérleti elrendezésben: az ELI-ALPS MTA laboratóriumában lévő NLTL nyalábvonal, illetve az SZTE TeWaTi laboratóriumában lévő kísérleti röntgenforrás esetén. Az eljárás további előnye, hogy a fókuszálás optimalizálása mellett a fő lézer nyalábútjának beállítása is megtörténik, így biztosítva az optimális közeli kísérleti körülményeket ezen szempontokból. Az elvégzett kísérletek igazolták a módszer helyességét, látható javulás következett be mindkét kísérleti elrendezésben.

Az NLTL munkatársai által készített, és az „European Physical Journal Plus” nemzetközi folyóiratban elfogadott, *Towards a 10^{10} n/s neutron source with kHz repetition rate, few-cycle laser pulses* című tudományos publikációnak szerves részét képezte a TDK dolgozatomban leírt OAP beállítási procedura ismertetése, mely hozzájárult a cikkben megemlített eredmények eléréséhez.

A későbbiekben szeretném elvégezni az eljárás során a plánparallel lemezek által létrehozott interferencia mintázatok vizsgálatát sugárkövető szoftveres szimuláció segítségével. Ez pontosíthatná az eljárás menetét, illetve biztosabb távpontokat adna az egyes mintázatok értelmezéséhez, növelve a hatékonyságot és a gyorsaságot.

4. Irodalomjegyzék

- [1] M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics* (6. kiadás, Pergamon Press, 1980)
- [2] W. Demtröder: *Laser Spectroscopy Vol. 1. Basic principles* (Springer 2008)
- [3] Zs. Bor and Z.L. Horváth: *Distortion of femtosecond pulses in lenses. Wave optical description*, Optics Communications 94 (1992) 249-258
- [4] Jean-Claude Diels and Wolfgang Rudolph: *Ultrashort Laser Pulse Phenomena*, (2. kiadás, 2006)
- [5] Z. L. Horváth and Zs. Bor: *Diffraction of short pulses with boundary diffraction wave theory*, Physical Review E, Volume 63, 026601
- [6] Zoltán L. Horváth, József Klebniczki, Gábor Kurdi, Attila P. Kovács: *Experimental investigation of the boundary wave pulse*, Optics Communications 239 (2004) 243–250
- [7] Z.L. Horváth and Zs. Bor: *Focusing of femtosecond pulses having gaussian spatial distribution*, Optics Communications 100 (1993) 6- 12
- [8] Z.L. Horváth and Zs. Bor: *Behaviour of femtosecond pulses on the optical axis of a lens. Analytical description*, Optics Communications 108 (1994) 333-342
- [9] Z. Bor: *Distortion of femtosecond laser pulses in lenses*, Optics Letters, January 15, 1989 / Vol. 14, No. 2 /
- [10] Z. Bor: *Distortion of Femtosecond Laser Pulses in Lenses and Lens Systems*, Journal of Modern Optics, 35:12, 1907-1918
- [11] Zoltán L. Horváth, Balázs Major, Attila P. Kovács, and Zsolt Bor: *Pulse front distortions caused by primary aberrations*, J. Opt. Soc. Am. B Vol. 30, No. 7 / July 2013 /
- [12] Zsolt Bor, Zoltán Gogolak and Gábor Szabó: *Femtosecond-resolution pulse-front distortion measurement by time-of-flight interferometry*, Optics Letters / Vol. 14, No. 16 / August 15, 1989
- [13] Horváth Zoltán: *Hullámtan és optika* (diasor, 2020)
- [14] Christopher Bond, Cyril A. Pipan: *How to align an off-axis parabolic mirror*, SPIE Vol. 1113 Reflective Optics II (1989)
- [15] Yeon H. Lee: *Alignment of an off-axis parabolic mirror with two parallel He-Ne laser beams*, Optical Engineering 31(1 1), 2287-2292 (November 1992).
- [16] Der-Chin Chen: *Portable Alignment Device for an Off-Axis Parabolic Mirror Optical Axis Adjustment*, International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing Vol. 13, No. 1, pp. 33-37 / January 2012 / 33
- [17] E. A. Orlenko and T. Yu. Cherezova, Yu. V. Sheldakova, A. L. Rukosuev, and A. V. Kudryashov: *Off-axis parabolic mirrors: A method of adjusting them and of measuring and correcting their aberrations*, Journal of Optical Technology Vol. 72, Issue 4, pp. 306-312 (2005)

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni témavezetőmnek, Dr. Osvay Károlynak, hogy a TDK dolgozatom elkészítéséhez iránymutatást adott, s hogy bármikor fordulhattam hozzá kérdéseimmel.

Köszönettel tartozom volt kollégámnak, Nagy Bencének, aki nagy segítségemre volt az eljárás kifejlesztésének kezdeti szakaszaiban.

Hálásan köszönöm családomnak a gondoskodást és támogatást, amellyel végig kísérték tanulmányaimat, s hogy mindig számíthattam rájuk, még a legnehezebb pillanatokban is.

A kutatást a Nemzeti Lézeres Transzmutációs Laboratórium keretein belül a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal – Innovációs és Technológiai Minisztérium támogatta.