

Nemlineáris és femtoszekundumos optika

Szakmai záróbeszámoló

OTKA K 47078

Az ultrarövid, 100 fs hosszú fényimpulzusokat előállító lézerek 90-es évek elején, a 10 fs és rövidebb impulzusú lézerek a 90-es évek második felében kezdődött, napjainkban is gyorsuló elterjedésével egyre nő az érdeklődés az anyagok lineáris illetve nemlineáris optikai tulajdonságainak minél teljesebb ismerete iránt. Ez érthető, hiszen egyrészt az impulzusok időtartama néhány optikai ciklust tesz ki, ugyanakkor a korábban csak különleges és óriási lézerberendezésekkel létrehozható nagy fényintenzitást ezek az „asztali” (table-top) femtoszekundumos lézerek viszonylag könnyen produkálják, sőt, túl is szárnyalják. Mindezeket túl a femtoszekundumos fényforrások általánosabbá válásával szükséges ezen fs lézerimpulzusokkal való mérési technikák kidolgozására, vagy a meglévők finomítására.

A pályázat keretein belül végrehajtott kutatások jelentős része különböző nemlineáris optikai kísérleteken alapul, a kétfotonos abszorpciós együttható mérésétől kezdve a porcelánok roncsolási tartományának megállapításáig. Külön említést érdemel a lineáris femtoeszekundumos mérési módszer kifejlesztése illetve az annak segítségével végzett nagy pontosságú diszperziómérés és törésmutató meghatározás. A femtoszekundumos fényforrásokkal és mérésekkel kapcsolatosan végzett további kutatásainkból kiemelendő az ultrarövid impulzusok hordozó-burkoló fázis csúszásának (CEP csúszás) mérésére kidolgozott egyedülállóan új, lineáris eljárás.

A kísérleteket és a méréseket alapvetően az Optikai és Kvantumelektronikai Tanszéken rendelkezésre álló titán-zafir femtoszekundumos lézeroscillátor által közvetlenül kibocsájtott, illetve annak TW teljesítményűre erősített impulzusaival hajtottuk végre. A projekt végrehajtása során szakmai konzultációkat valamint kisebb közös kísérleteket végeztünk hazai (MTA SzFKI Kristályfizikai Főosztály, Herend Porcelánmanufaktúra Rt.), illetve külföldi kollégákkal (Max Born Institute, Berlin).

A kutatás során a pályázatban eredetileg 6-10 referált folyóiratbeli cikk valamint hazai és nemzetközi konferenciákon összesen 8-12 konferencia-anyag tervezett elkészítésével szemben ténylegesen 12 referált folyóiratbeli cikket jelentettünk meg, valamint 24 konferenciaanyagot mutattunk be. Ezen túl számtalan (O)TDK dolgozat, három diplomamunka valamint egy PhD disszertáció készült el.

I. Lineáris optikai mérés

Semleges gázok nyomásfüggő törésmutatójának mérése és általános diszperziós formulái
(Referált folyóiratbeli cikk: 2, nemzetközi konferencia: 6, magyar konferencia: 1)

Spektrálisan és térben bontott interferometria segítségével megmértük az Ar, He, Kr, N₂, Ne, Xe és levegő gázokban és keverékeikben terjedő femtoszekundumos lézerimpulzusok diszperzióját. A gázok nyomását 0.05 mbar és légköri nyomás között változtattuk egy 4.5 m hosszú csőben. A kísérleti elrendezés alapját képező Mach-Zehnder interferométer mérőkarjában vezetett impulzusok oda-vissza veretve, 9 m-t tettek meg a változtatható nyomású csőben.

A szélessávú impulzusok fáziseltolódásának első három deriváltját, sorrendben a csoportkésleltetést (group delay, GD), csoportkésleltetés-diszperziót (group delay dispersion, GDD) és a harmadrendű diszperziót (third order dispersion, TOD) határoztuk meg minden gázra 800 nm-es központi hullámhossznál normál körülmények (1000 mbar, 0°C) között.

Méréseink szerint a gázok és gázkeverékek diszperziója 0.7 % pontossággal teljesíti a Lorentz-Lorenz formulát. A szakirodalomban található, látható és közeli infra tartományokra vonatkozó törésmutató-értékek és az általunk mért nyomásfüggő diszperziós értékek kombinációjára alapozva új Sellmeier-típusú törésmutató-formulákat is számoltunk. Ezek kéttagú a szabvány-formulák 4.1×10^{-9} (Ne) és 4.3×10^{-7} (Xe) közötti abszolút pontossággal adják meg a törésmutató-értékeket az UV tartománytól a közeli infravörös tartományig.

II. Nemlineáris optikai mérések

II.1. Nemlineáris kristályok kétfotonos abszorpciójának mérése

(Referált folyóiratbeli cikk: 1, nemzetközi konferencia: 2, magyar konferencia: 1)

Napjaink egyik gyorsan fejlődő kutatási területe az ibolyántúli (UV) hullámhosszakon üzemelő femtoszekundumos ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$), nagyintenzitású lézerimpulzusokkal végzett lézer-anyag kölcsönhatások vizsgálata. Az ezekhez szükséges UV impulzusokat gyakran látható, vagy közeli infravörös tartományban működő lézerek segítségével, nemlineáris optikai úton (frekvencia kétszerezéssel vagy összegzéssel) állítják elő. Az eljárás egyik fő problémája, hogy a nemlineáris optikai kristályban végbemenő kétfotonos abszorpció jelentősen csökkenti a keletkező UV impulzus intenzitását. E folyamat erősségére jellemző koefficiensre irodalmi adat csak BBO és KDP kristályokra, és csak 211 -216 nm valamint 264 -267 nm tartományokra lelhetők fel. Méréseinkkel meghatároztuk BBO, KDP, CLBO, LTB nemlineáris optikai kristályok kétfotonos abszorpciós együtthatóját 248 nm-en.

Fényforrásunk egy KrF excimer lézer-rendszer volt, mely 650 fs hosszú, 10 mJ energiájú impulzusokat szolgáltatott. A nyaláb egy homogénnek tekintett részének kiválasztása után mértük a kristályok transzmisszióját a bemenő intenzitás függvényében. Kísérleteinkben a bemenő intenzitást $0,2 \text{ GW/cm}^2$ és 80 GW/cm^2 között változtattuk. A felső határ jóval magasabb, mint a korábbi kísérletekben alkalmazott intenzitás. A kristályok felületének reflexiós tényezőjét és a lineáris abszorpciós együtthatót nagyon alacsony intenzitású impulzusok használatával mértük meg.

II.2. Fehér porcelán hordozók spektroszkópiája és lézeres megmunkálása

(Referált folyóiratbeli cikk: 2, nemzetközi konferencia: 2)

A szilárd anyagok lézeres roncsolási küszöbvel kapcsolatos kezdeti vizsgálatainkból mintegy véletlenül nőtt ki egy önmagában is érdekes téma, a fehér porcelánfelületek lézeres megmunkálásának lehetősége. A fehér porcelánhordozó anyag és a szuszpenziók spektroszkópiái vizsgálata alapján az infravörös tartományban, $9,2 - 10,6 \mu\text{m}$ hullámhosszon működő lézerrel felület átalakító / módosító hatás az anyagok besugárzásával elérhető. Vizsgálataink során $10,6 \mu\text{m}$ hullámhosszon sugárzó SYNRAD CO_2 -lézert alkalmaztunk: ebben a tartományban a rendelkezésünkre bocsátott szuszpenziók még elegendő abszorpcióval rendelkeznek.

6-10W, 1-8 perces besugárzásokat végeztünk „mátrix” alakban: két besugárzási pont között vagy az expozíciós időt vagy a lézer intenzitását változtattuk illetve különböző elő- és utókezeléseket alkalmaztunk. A rétegvastagság, valamint az alkalmazott szuszpenziók hatására különböző mintákon létrehozott azonos mátrixokból nyert eredmények összevetéséből következtettünk. Az üvegesedett szuszpenziók megfelelő reflexiója (cseppek mérete és egyenletes eloszlása) máz esetén $10\text{W} / 4 \text{ perc}$, tömőanyag esetén $9-10\text{W} / 1-6 \text{ perces}$ besugárzása mellett tapasztalható. A javítómázzal- illetve tömőanyaggal kezelt, valamint a kezeletlen porcelán eseteire külön-külön érvényes, hogy hasonló elváltozások különböző besugárzási idő / intenzitás sorozatok mellett előidézhetőek. A hosszabb ideig

tartó, különböző teljesítmény szerinti „hangolással” finomabb szerkezeti elváltozások hozhatók létre.

Lézeres kezelés esetén az anyagra eső sugárzás erőssége – a sugárzás elnyelődése miatt – a behatolás mélységével exponenciálisan csökken. A felszín alatti mélységi rétegek felmelegedése részben a felszíntől származó hővezetés útján, részben pedig a még teljesen el nem nyelt lézersugárzás hatására történik. A lézersugár behatolási távolságánál mélyebben fekvő-, illetve a hevített térfogatrész mellett lévő anyag felmelegedése kizárólag a forró anyag irányából, hővezetés útján történik – máz, tömőanyag esetén – kb. 500-600 μ m mélységig. A repedésmentes besugárzási határ 1.9 MW/m² intenzitás esetén 8 perc. A besugárzott folt közepének hőmérséklete ekkor kb. 900°C. Ennél nagyobb dózis esetén észlelhető hajszálrepedések keletkeznek.

A porcelán anyagok spektroszkópiai vizsgálatán túl egy kísérletsorozatban állapítottuk meg azon lézeres- és anyagi paramétereket, melyek mentén a porcelán felülete egy pontonként úgy olvasható meg, hogy az újraszilárduló felület morfológiája az eredetihez nagyban hasonlít.

II.3. Gázok nemlineáris törésmutatójának meghatározása

(Referált folyóiratbeli cikk: folyamatban, nemzetközi konferencia: 1 + 2 folyamatban)

Extrém fényintenzitások esetén az anyagok törésmutatója az intenzitással arányosan változik, ahol az arányszámot nemlineáris törésmutatónak (n_2) nevezzük és az adott anyagra jellemző. Bizonyos kísérletekben és lézerrendszerekben, ahol nagyintenzitású lézerimpulzusok gázközegben terjednek, a nemlineáris törésmutató ismerete feltétlenül szükséges. Ezenfelül a nagyteljesítményű lézerrendszerekben a nyaláb terelését úgy kell megtervezni, hogy az n_2 -vel kapcsolatos jelenségeket, például az önfázis-modulációt és az önfokuszálódást minél inkább elkerüljük; továbbá a modern lézerspektroszkópia számos alkalmazása profitálhat belőle, például fehér-kontinuum keltésen, filamentáció vagy akár impulzus-kompresszió keresztül. Egyetlen méréstől eltekintve, amely 0.2 és 3 bar közötti N₂-re, O₂-re és levegőre vonatkozik, nincsenek több nagyságrendet átölelő eredmények az n_2 nyomásfüggésére.

Kísérleteinkben közvetlen módon mértük meg az Ar, He, Kr, N₂, Ne, Xe és levegő nemlineáris törésmutatójának nyomásfüggését spektrálisan és térben bontott interferencia segítségével.

A mérési összeállítás egy vákuumkamrában összeállított, 9 m karhosszúságú, nemkollineáris Mach-Zehnder interferométeren alapult. A fókuszálatlan, 1 cm átmérőjű nyalábátmérővel rendelkező, 1 mJ energiájú, 40 nm sávzélességű impulzusokat 1:10 intenzitásarányban két részre osztottuk a mérő- és referenciakar között. A vákuumkamrát elhagyó nyalábok intenzitását az optimális interferencia érdekében kiegyenlítve az egyesített, interferáló impulzusokat egy leképző spektrográfba irányítottuk. A gázok nyomását 0.05 mbar és 1 bar között változtatva a nemlineáris törésmutatókat meghatároztuk a spektrálisan és térben bontott interferogramok segítségével.

III. Femtoszekundumos fényforrások kutatása

III.1. Ultrarövid impulzusok alakjának formálása akusztóoptikai eszközökkel

(Referált folyóiratbeli cikk: 1)

Megvizsgáltuk tömbi akusztóoptikai (AO) eszközök alkalmazhatóságát ultrarövid impulzusok alakjának formálására. Az alakformálás célja az impulzusok átalakítása elektronikusan vezérelhetően előre meghatározott időbeli lefutású impulzusokká. A kimeneti impulzusalak valamilyen kísérleti alkalmazás által megkívánt, komplex, általában több maximummal rendelkező impulzusalak, vagy egyszerűen az eredetinelő időben rövidebb

impulzus. Az AO eszközöket eddig kétféleképpen használták alakformálásra: transzverális modulátorként, vagy kollineáris elrendezésben diszperzív fáziskompENZÁLÓként. Mindkét megvalósítás hátránya, hogy az AO közegben az akusztikus impulzusok terjedési sebessége sokkal kisebb a közegbeli fénysebességnél, emiatt az optikai impulzusok ismétlődési frekvenciája nagyban korlátozott (általában maximálisan néhány 100 kHz). Az általunk kidolgozott módszer fázisban egymáshoz rögzített diszkrét akusztikus frekvenciájú, folytonos akusztikus nyalábokkal dolgozik. Ez a módszer nem korlátozza az ismétlődési frekvenciát, a kollineáris eszközökhöz képest egyszerűbben használható, mert a diffraktált nyaláb térben jól szétválik a nem diffraktált nyalábtól, hátránya viszont, hogy szögdiszperzió jelentkezik a hasznos nyalábban. Mértük az alakformált nyalábban jelentkező szögdiszperzió mértékét és kétféle, csatornák közötti (30 $\mu\text{rad}/\text{nm}$) és csatornán belüli (130 $\mu\text{rad}/\text{nm}$) szögdiszperziót azonosítottunk. Bemutattuk egy módosított kísérleti elrendezést, aminek segítségével mindkét fajta szögdiszperzió nagyban lecsökkenthető.

III.2. Eljárás lézerrendszer magasabb rendű diszperziójának kompenzálására (Referált folyóiratbeli cikk: 1, nemzetközi konferencia: 2)

Ha valamely optikai közegen széles spektrumú fény (rövid impulzus vagy fehér fény) halad keresztül, akkor a törésmutató hullámhosszfüggése (diszperzió) miatt a nyaláb térbeli és időbeli alakja megváltozik. Ez az oka például a prizma fénybontó hatásának, és az ultrarövid impulzusok terjedés során bekövetkező időbeli szétfolyásának. A szubpikuszekundumos impulzusok szétfolyása mind az alap kutatás során, mind az optikai távközlésben komoly gondot okoz, emiatt a diszperzió leküzdésére nagy hangsúlyt fektetnek. Az alábbiakban az optikai elemek diszperziójának kompenzálására kidolgozott módszerünket mutatjuk be, melynek alapja a törésmutató hőmérséklet-változással történő szabályozása. A fázis modulált impulzuserősítés sémát használó lézerrendszereknek van két olyan pontjuk (az impulzusnyújtóban illetve a kompresszorban), ahol a különböző spektrális komponensek térben elkülönülten, de egymással párhuzamosan haladnak. Ezen helyek bármelyikén elhelyezett olyan üveghasáb (termikus hasáb), amiben térbeli hőmérsékletprofil hozunk létre (pl. úgy, hogy középen fűtjük, a szélein viszont hűtjük a hasábot), az üveg hőmérsékletfüggő törésmutatóján keresztül a rajta áthaladó impulzus spektrális fázisát fogja befolyásolni. Kiszámoltuk bizonyos fázistolások eléréséhez szükséges hőmérsékletprofil különböző anyagú üveghasábokra, ami alapján kiválasztottuk a kísérleteinkben használt üvegtípust. A termikus hasábot lézerrendszerünk kompresszorában helyeztük el, majd SSRI módszerrel mértük különböző hőmérséklet profilok közötti váltáskor jelentkező fázisváltozást. A mért hatás jó összhangban volt a számolások alapján várt fázisváltozással.

III.3. Eljárás az impulzusnyújtó és -kompresszor diszperziójának beállítására (Referált folyóiratbeli cikk: 1, nemzetközi konferencia: 1)

Kidolgoztunk egy új, a spektrális interferenciacsíkok alakjának vizsgálatán alapuló módszert, mely nagymértékben megkönnyíti a fázis modulált impulzuserősítésen (CPA) alapuló lézerrendszerek eredő diszperziójának minimalizálását. E célból kifejlesztettünk egy hullámoptikai modellt a spektrális interferenciacsíkok alakja és a vizsgált optikai rendszer diszperzióját jellemző fázisderiváltak közötti kapcsolat leírására. Kimutattuk, hogy az állandó fázisú pont környezetében pozitív csoportképletelés-diszperzió elliptikus, míg negatív diszperzió hiperbolikus csíkokat eredményez. Amennyiben harmadrendű-diszperzió is jelen van, akkor félig hiperbolikus, félig elliptikusak a csíkok. A modell helyességét kísérletileg is ellenőriztük az SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékén működő TeWaTi lézerrendszer diszperziójának minimalizálása során.

Kísérletileg igazoltuk, hogy az optikai szálak diszperziójának mérésére kifejlesztett, szintén a spektrális interferometrián alapuló eljárás (az állandó fázisú pont módszere) alkalmas a CPA rendszerek nagy diszperzióval rendelkező egységei (impulzusnyújtó és -kompresszor) csoportkélesztés- és harmadrendű-diszperziójának nagy pontosságú kísérleti meghatározására is (3% illetve 10 % a mérés hibája).

A mérési elrendezés egy Mach-Zehnder típusú interferométer volt, melyet a vizsgálandó lézerrendszer fényútjának kiegészítésével állítottunk elő. Az oszcillátorból érkező impulzus egy részét a nyújtó előtt kicsatoltuk, mely így referencia impulzusként szolgált. Ha csak a nyújtó vagy a kompresszor diszperziós együtthatóit akartuk meghatározni, akkor a tárgykarban csak ezen egységek helyezkedtek el. Amennyiben a teljes rendszer diszperziójára voltunk kíváncsiak, akkor a tárgykarbeli impulzus végighaladt a teljes rendszeren, és a kompresszor után egyesült a referencia impulzussal.

Amikor a kompresszor illetve a nyújtó diszperzióját mértük, a nagy diszperzió miatt a rendkívül sűrűen elhelyezkedő interferenciacsíkok feloldásához az interferométer kimenetére egy nagy spektrális felbontású monokromátort (Yobin-Yvon, H-20) helyeztünk, melynek kilépő síkját egy CCD kamerára (EDC-2000N) képeztük. Az így kialakított spektrográf spektrális felbontása 0,1 nm volt. A teljes rendszer diszperziójának minimalizálásakor viszont egy általunk épített, kisebb (0,5 nm) spektrális felbontóképességgel, de nagyobb szabad spektrális tartománnyal rendelkező spektrográfot használtunk.

III.4. Negatív- majd pozitív fázismodulációjú fs impulzusok erősítése (NPCPA)

(Referált folyóiratbeli cikk: 2, nemzetközi konferencia: 2)

A nemlineáris törésmutató 2D-SBI módszeren alapuló méréséhez elengedhetetlenül szükséges, hogy a lézerrendszer nagy energiájú, és szélessávú lézerimpulzusokat szolgáltasson. A berlini Max Born Intituttal együttműködve kifejlesztettük az ún. negatívan- és pozitívan fázismodulált impulzus erősítési technikát (NPCPA). Az eljárás azon alapul, hogy a lézerrendszer első erősítőjén keresztülhaladó impulzust - a szokásoktól eltérően - negatív fázismodulációval látjuk el. Az így elő-erősített impulzusok spektruma erősen a kék irányba tolódik el. A második erősítő előtt megfordítjuk a fázismoduláció előjelét, amivel a második erősítőben a spektrum a vörös irányba tolódik el. A két effektus eredőjeként a hagyományos, csak pozitív fázismoduláción alapuló erősítéssel szemben 30 % - 50 % sáv szélesség-növekedést demonstráltunk. A módszer nagy előnye, hogy meglévő, bonyolult lézerrendszerekben is nagyon könnyen megvalósítható. Az eredményeket eddig egy folyóiratcikkekben és két nemzetközi konferencián mutattuk be.

IV. Femtoszekundumos impulzusokon alapuló mérőeszközök kutatása

IV.1. Kicsiny diszperziók mérésére szolgáló spektrálisan és térben bontott interferometriai eljárás kidolgozása és hibaanalízise

(Referált folyóiratbeli cikk: 1, nemzetközi konferencia: 1, magyar konferencia: 1)

A nagyintenzitású, ultrarövid impulzusok közegbeli terjedésük során különböző mértékben kiszélesednek, ami azt eredményezheti, hogy a céltárgyra érkező impulzusok intenzitásának értéke bizonytalan, a vártnál kisebb lehet. Ezért kidolgoztunk egy olyan eljárást, amellyel az egyes anyagok diszperziója nagy pontossággal megmérhető. A spektrálisan és térben bontott interferencia (spectrally and spatially resolved interferometry, röviden SSRI) egy rendkívül hatékony módszer bármely diszperzív mintán áthaladó lézerimpulzus relatív fázistolódásának mérésére.

Az eljárás tulajdonképpen egy nyálábosztáson alapuló kétsugaras interferométer (pl. Michelson, Mach-Zehnder) és egy leképző spektrográf kombinációjából áll. A

interferométerbe érkező szélessávú nyalábot kétfelé osztjuk, a diszperzív mintát, tartalmazó kart nevezzük mérőkarnak, míg a másik kart, amihez a mérőkarbeli impulzus fáziseltolódását viszonyítjuk, referenciakarnak. Az interferométer végén a nyalábokat újraegyesítjük az egyik kar hosszának finomhangolásával. A nyalábok között függőleges irányban kicsiny szöget állítunk be, amellyel az egyesített impulzusok interferenciacsíkjainak sűrűségét szabályozhatjuk. Az interferáló impulzusokat spektrográfba irányítva az immár spektrálisan is bontott interferogramokat CCD kamera segítségével rögzítjük.

Szokványos kísérleti körülmények között a relatív fáziseltolódást csak a közeg okozza, a fázisfüggvény deriváltjai, sorrendben a csoportkésleltetés (group delay, GD), csoportkésleltetés-diszperzió (group delay dispersion, GDD) és harmadrendű diszperzió (third order dispersion, TOD) szoftveres kiértékeléssel könnyen kiszámolhatók.

Az interferogramok modellezésével vizsgáltuk meg a különböző hibaforrások hatását a módszer pontosságára. Munkánk során kiderült hogy a pontosságot nagymértékben befolyásolja a spektrográf hullámhossz-kalibrációjának pontossága, a fényforrás sáv szélessége, a mechanikai vibrációk valamint a kamera elektromos zaja, míg kevésbé jelentek problémát a kisebb optikai zajok (pl. diffrakció szennyeződések) és a nyalábok görbületi sugarának eltérése. Optimalizáltuk az interferenciacsík-sűrűséget. Az elérhető legnagyobb pontosságnak GDD és TOD esetén 0.1 fs^2 illetve 2 fs^3 adódott.

IV.2. Lineáris optikai eljárás ultrarövid impulzusok hordozó-burkoló fázisának sáv szélességtől független mérésére

(Referált folyóiratbeli cikk: 1, nemzetközi konferencia: 3, magyar konferencia: 1 nemzetközi szabadalmi bejelentés: 1)

Kidolgoztuk és demonstráltuk az ultrarövid lézerympulzus-sorozatok hordozó-burkoló fázisa (carrier-envelope phase, CEP) csúszásának egy új, lineáris mérési eljárását. A módszer a már ismertetett spektrálisan és térben bontott interferometrián (SSRI-n) alapul, ahol az interferométer tárgykarjába egy fényvisszacsatoló kört építünk. Ebben az elrendezésben — mivel az interferenciacsíkok térbeli pozíciója az interferáló terek CEP-különbségétől függ — a visszacsatoló körben tárolt impulzusok és a referenciakarban terjedő impulzus interferenciaképei egymás láthatóságát rontják a CEP-csúszástól függő mértékben. Számítógépes szimulációink, melyek kiterjednek többek között a CEP-csúszás zajára, a detektor véges expozíciós idejére és a diszperzióra is, azt mutatják, hogy az interferenciacsíkok láthatósága egyértelműen függ a CEP-csúszástól, és nulla CEP-csúszásnál a láthatóságnak szélsőértéke van.

Elméleti megfontolásainknak megfelelően felépítettünk egy kísérleti elrendezést a vázolt CEP-csúszást mérő eljárás kísérleti demonstrálása céljából. A hordozó-burkoló fáziscsúszás mérésére — a mi elrendezésünkön kívüli, független műszerként — egy f -to- $2f$ interferométer szolgált. Interferencia-csíkszereket vettünk fel, és értékeltük ki a láthatóságukat a CEP-csúszás függvényében, a fényvisszacsatoló körnek az ismétlési frekvenciától való különböző elhangolásainál. A kísérlet beállításával számítógépes szimulációkat is lefuttattuk, és összevetettük a kapott kísérleti és szimulációs eredményeket. Az eltérés nem éri el a 0,01-es láthatóság-különbséget, amit 0,3 rad-os a CEP-csúszás (ill. 4 MHz-es CEO-frekvencia) pontosságként értelmezhetünk ebben az első, demonstrációs kísérletben.

Mivel ez az eljárás — a jelenleg használt módszerekkel szemben — kizárólag lineáris optikai jelenségeken alapul, ezért független az impulzusok sáv szélességétől, így nem igényel sem nagy intenzitásokat, sem a sáv szélesség nemlineáris kiszélesítését, elvileg tetszőlegesen keskeny sáv szélességű és kis teljesítményű oszcillátorokra is alkalmazható.