

Intenzív ultraibolya lézerimpulzusok intenzitáskontraszt javítása

Gilicze Barnabás

PhD értekezés tézisei

Témavezető:

Dr. Szatmári Sándor

egyetemi tanár

Kísérleti Fizikai Tanszék

Fizika Doktori Iskola

Szegedi Tudományegyetem, Fizikai Intézet

Szeged

2020

Az elmúlt évtizedekben a lézer technológia fejlődése nagyszámú új tudományos eredmény létrejöttéhez járult hozzá a fizika, az orvostudomány, a biológia és az anyagtudományok területén. Emellett a lézerek ipari alkalmazása is dinamikus növekedést mutat többek között a mikro és nano anyagmegmunkálásban. A tudományos kutatásban elért eredmények jelentős része a lézerekkel elérhető csúcsintenzitáshoz illetve az ehhez kapcsolódó széles spektrális tartományt lefedő másodlagos forrásokhoz köthető. Az ezen kísérleteknél használt impulzusok csúcsintenzitásának növelésén túl a tudományos kutatásban egyre növekvő szerepet kap az impulzusok tér- és időbeli minőségének javítása. Különös jelentősége van a főimpulzust időben megelőző, több nagyságrenddel kisebb előimpulzusnak ugyanis ez előplazmát kelthet, ami jelentősen befolyásolja a fény-anyag kölcsönhatási kísérletek eredményét.

A kísérleti munkám során nagyintenzitású ultraibolya rövid impulzusok kontrasztjavítását tűztem ki célul. Ezen impulzusok alkalmazása számos kölcsönhatás esetén (a rövidebb hullámhosszból fakadó nagyobb

fotonenergia és jobb fókuszálhatóság miatt) előnyös és az infravörös tartományba eső rövid impulzusok komplementer fényforrásaként tekinthető. A disszertációmban bemutattam a legelterjedtebb nagyintenzitású lézerrendszerek felépítését és az ezekben sikerrel alkalmazott kontrasztjavító eljárásokat. Bár az elmúlt időszakban számos kontrasztjavító eljárást vezettek be az impulzusok időbeli tisztasága még mindig nem elegendő a jelenleg rendelkezésre álló impulzusok csúcshintenzitásának figyelembe vételével.

Az ultraibolya tartományban működő rövid impulzusú KrF excimer lézerrendszerekkel 10^{19} W/cm² intenzitást lehet elérni 10^9 alatti intenzitáskontraszt mellett. A nagyintenzitású KrF lézerrendszerek kontrasztjavítására korábban sikeresen alkalmazták a plazma tükör technikát amivel 2 nagyságrend kontrasztjavulást és 50%-ot megközelítő reflexiót értek el. Ugyancsak nagyintenzitású ultraibolya impulzusok kontrasztjának javítására vezették be a nemlineáris Fourier-szűrés technikát, amellyel 3 nagyságrendnyi kontrasztjavulást és 40%-os energia transzmissziót értek

el. A kutatásaim során célul tűztem ki a plazma tükör nagyjelű reflexiójának a növelését és a reflektált impulzusok térbeli karakterizálását. Továbbá célul tűztem ki a nemlineáris Fourier-szűrés által elérhető kontrasztjavítás korlátjának vizsgálatát, a technika továbbfejlesztését és egy nagyintenzitású KrF lézerrendszerbe való integrálását. A munkám során elért új tudományos eredményeket az alábbi tézispontokban foglalom össze.

1. Kísérletileg kimutattam, hogy ultraibolya rövid impulzusokkal kvarc céltárgyon keltett plazma reflexiója megközelíti a 70%-ot, amely a szakirodalomban publikált eddigi legmagasabb érték 248 nm hullámhosszra. A plazma tükör technikára alapozva kifejlesztettem egy kísérleti eljárást, amellyel nagyintenzitású KrF excimer lézerrendszerek intenzitáskontrasztja több mint két nagyságrenddel javítható. Kísérletileg megmutattam, hogy a nyaláb ideálishoz közeli fókuszálhatósága a reflexió során nem változik. Megállapítottam, hogy az adott kísérleti elrendezés mellett a reflexió értéke jó közelítéssel

független a nyaláb polarizációjától és attól, hogy az impulzucidő 500 fs vagy 220 fs. [1]

A rövid ultraibolya impulzusokkal keltett plazma reflexióját ~ 30 -as f-számú fókuszálás mellett anti-reflexiós bevonattal ellátott sík kvarc céltárgyon vizsgáltam. A 70%-ot megközelítő reflexiót s és p polarizált nyaláb esetében is $1 \cdot 10^{15}$ - $5 \cdot 10^{15}$ W/cm² intenzitás esetén lehetett mérni 500 fs impulzushossz esetén valamint 12° -os beesési szög mellett. A plazma tükör működést 220 fs-os kompresszált impulzusra is demonstráltam, ahol a reflexió értéke valamivel kisebb $\sim 55\%$ -os értéket ért el, ami az impulzus tér- és időbeli minőségi romlásának tulajdonítható. A nyaláb távoli zónabeli eloszlását a reflexió előtt és után is megmértem. A fókuszfolt mérete a diffrakció-limitált elvi foltméret 1,5 ill. 1,75-szöröse volt. A nagy- és kisjelű reflexió hányadosából adódó több mint 2 nagyságrendbeli intenzitáskontraszt javulás, a reflektált nyaláb jó térbeli tulajdonságainak figyelembe vételével egy hatékony impulzusszűrési eljárást eredményez nagyintenzitású ultraibolya KrF lézerrendszerek esetén.

2. Elméleti modellt dolgoztam ki a nemlineáris Fourier-szűrés kontrasztjavítását korlátozó optikai leképezés térbeli kontrasztjának vizsgálatára. Az általam írt szimuláció segítségével megmutattam, hogy a korábban használt kísérleti elrendezésre illesztett leképezés esetén a térbeli kontraszt limit 10^3 értékű. A leképezés térbeli kontrasztjának javítására a tárgy térfrekvenciás komponenseinek a leképező rendszerhez való illesztését javasoltam egy kis nyílásszögű leképezés és egy második tárgy apertúra alkalmazásával. Kimutattam, hogy az így előállított tárgy leképezés utáni térbeli kontrasztjának elméleti értéke nagyobb, mint 10^8 [2].

Az optikai képalkotást a lineáris rendszereket leíró térfrekvenciás analízis segítségével vizsgáltam. Az általam fejlesztett szimuláció alkalmas térben koherens és inkohere ns megvilágítást is kezelni. A kísérleti esetnek megfelelő 500 cm^{-1} levágási frekvenciájú esetben a kép térbeli kontrasztjára a szimuláció által kapott érték megegyezik a kísérletileg tapasztalt $\sim 10^3$ értékkel. Megmutattam, hogy a leképezés nyílásszögének

növelésével javul, a leképezési hibák által okozott fázishibák növekedésével pedig romlik a leképezés kontrasztja. Az optikai leképezés kontrasztjának javítása céljából megvizsgáltam a leképező rendszer pupillafüggvényének apodizációját, ami a számolásaim szerint több nagyságrendnyi javulást eredményez. A technikai egyszerűségénél fogva előnyösebbnek bizonyult a tárgy nagy térfrekvenciás komponenseinek csökkentése. Ehhez az eredeti gyűrű alakú éles tárgyat először egy kis nyílásszögű optikai elrendezéssel leképezzük, majd az így előálló eloszlás 10^{-3} normált intenzitás szint alatti részeit egy második apertúrával kitakarjuk. Ezt a modulált térfrekvenciás komponensekkel bíró tárgyat, a szimuláció szerint 10^8 értéket meghaladó kontraszttal lehet a továbbiakban - normál paraméterekkel rendelkező optikai leképező rendszerekkel - leképezni.

3. Kísérletileg kimutattam, hogy az optikai látható tartományban a nemlineáris Fourier-szűrési elrendezés részét képező leképezés térbeli kontrasztja nagyobb, mint 10^7 értékre javítható a leképezendő tárgy nagy térfrekvenciás komponenseinek a

modulációjával. Kísérletileg meghatároztam a nemlineáris Fourier-szűrő intenzitásfüggő transzmissziógörbéjét. Kimutattam, hogy a szűrő bemeneteként szolgáló tárgy térfrekvenciás modulációjával a kisjelű transzmisszió a korábbi 10^{-3} értékről (a mérőrendszer által detektálható legkisebb értékre) 10^{-5} alá csökken. Ezen eredményre alapozva kísérleti eljárást fejlesztettem ki ultraibolya rövid impulzusok 5 nagyságrenddel történő kontrasztjavítására. Kísérletileg karakterizáltam a nemlineáris Fourier-szűrő kimenetén megjelenő nyaláb térbeli tulajdonságait [2].

A nagy térbeli kontraszttal leképezni kívánt gyűrű alakú tárgy térfrekvenciás eloszlását egy kis nyílásszöget megengedő elő-leképezéssel moduláltam és az így kapott kép 10^{-3} intenzitás szint alatti részeit pedig egy újabb apertúrával takartam ki. Az így nyert csökkentett térfrekvenciás komponensekkel bíró új tárgy leképezése során 10^7 -t meghaladó térbeli kontraszt értéket mértem, tehát több mint 5 nagyságrenddel növeltem a leképezés kontrasztját a látható tartományban. Kísérleti úton

megvizsgáltam a nemlineáris Fourier-szűréssel elérhető kontrasztjavulást a nagyjelű és a kisjelű transzmisszió mérésével. A tárgy térfrekvenciás komponenseinek modulációjával kiegészített elrendezés kisjelű transzmissziója $<10^{-5}$ értékre javult. A kapott értéket az energiamérő rendszer dinamikus tartománya szabta meg; a $\sim 4 \cdot 10^{12}$ W/cm² intenzitás alatti impulzusok kimenő energiáját nem tudtam detektálni. A szűrt nyaláb térbeli tulajdonságait tekintve a távoli zónában szabályos Gauss eloszlást követ és a foltméret a diffrakció által megszabott elvi érték 1,75-szöröse.

4. Speciális fényforrást fejlesztettem ki nagyintenzitású és nagykontrasztú ultraibolya impulzusokkal történő fény-anyag kölcsönhatás vizsgálatára. Megépítettem egy ultraibolya rövid impulzusokra szabott, három KrF excimer erősítőmodulból álló erősítőláncot, amelyben az intenzitáskontraszt javítása céljából az első erősítő után egy nemlineáris Fourier-szűrési elrendezést integráltam. Az erősített impulzusok karakterizálásával megmutattam, hogy 10^{12} intenzitáskontraszt mellett megfelelő nyílásszögű

fókuszálás esetén elméletileg 10^{19} W/cm² intenzitás érhető el [3].

A rövid impulzusú festéklézerrendszer által generált impulzusokat frekvenciakétszerezés után egy - lépésekben növekvő keresztmetszetű - három fokozatú KrF erősítőláncban erősödnek, ahol a kimeneten a nyáláb méret eléri a $\sim 4 \times 4$ cm²-t. A nemlineáris Fourier-szűrési elrendezést a két erősítési átmenetben használt előerősítők közé integráltam. A hatékonyabb kontrasztjavítás érdekében a térfrekvencia modulációt biztosító előleképezés a második erősítési átmenet részét képezi. A szűrés után előálló szub-mJ energiájú, extrém nagy kontraszttal rendelkező impulzusokat a második előerősítő és a két résznyalábos multiplexelési elrendezéssel kiegészített végerősítő a 100 mJ energiaszintre erősíti. Az impulzus időbeli karakterizálását másodrendű autokorrelátorral és a spektrális intenzitás mérésével végeztem. A térbeli karakterizálást a közeli és távoli zóna vizsgálatával végeztem. A 700 fs időbeli hosszúságú és 2-szeresen diffrakció-limitált, reguláris térbeli eloszlású impulzusok fókuszált intenzitása egy $f/2$ -es fókuszálás

esetén elméletileg meghaladja a 10^{19} W/cm² intenzitást. A kísérleti tapasztalat szerint az intenzitáskontrasztot meghatározó erősített spontán emisszió a mérés határain belül kizárólag a nemlineáris Fourier-szűrés után keletkezik, melynek energiája erősen függ a szűrés után alkalmazott erősítés mértékétől. A kimenő energia 100 mJ és 50 mJ közötti megválasztása esetén az intenzitáskontraszt a fókusz síkban 10^{11} - 10^{12} értékű.

A fenti kutatási eredményeim az alábbi publikációkban kerültek közlésre:

[1] B. Gilicze, A. Barna, Z. Kovács, S. Szatmári, I. B. Földes, "*Plasma mirrors for short pulse KrF lasers*," Rev. Sci. Instrum. 87, 8, 083101 (2016).

[2] B. Gilicze, R. Dajka, I. B. Földes, S. Szatmári, "*Improvement of the temporal and spatial contrast of the nonlinear Fourier-filter*," Opt. Express 25, 17, 20791 (2017).

[3] B. Gilicze, Z. Homik, S. Szatmári, "*High-contrast, high-brightness ultraviolet laser system*," Opt. Express 27, 12, 17377 (2019).