

PhD értekezés tézisei

**ULTRARÖVID, ULTRAIBOLYA LÉZERIMPULZUSOK ÉS
MAGAS HARMONIKUSOK DIAGNOSZTIKÁJA**

Szerző:

Barna Angéla

Témavezetők:

Dr. Földes István

tudományos tanácsadó, címzetes egyetemi tanár

Dr. Gingl Zoltán

tanszékvezető egyetemi docens

Fizika Doktori Iskola

Szegedi Tudományegyetem – TTIK – Kísérleti Fizikai Tanszék

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont – Részecske- és Magfizikai Intézet

Szeged

2015

1. Bevezetés

Az ultrarövid lézerimpulzusokkal vizsgált ultragyors jelenségek vizsgálata napjainkban a fizika egyik legdinamikusabban fejlődő területe. Minél rövidebb időskálán vizsgáljuk a természetben lejátszódó, nagyon gyors folyamatokat, annál több információt nyerhetünk róluk. Így az atom- és molekulafizikai folyamatok egyes fázisait láthatóvá tudjuk tenni az ultrarövid lézerimpulzusokat generáló lézerek segítségével.

A fizikai, kémiai és biológiai folyamatok nagy időbeli felbontású vizsgálatára a femtoszekundumos lézerek adnak lehetőséget. A fényimpulzusokkal történő mikroszkopikus, azaz molekulán belüli atomok mozgásának detektálása mellett lehetőség nyílik arra, hogy tudatosan befolyásoljuk a biológiai, kémiai folyamatokat.

Az excimer lézerrendszerek esetén a szilárdtestlézerekkel szemben 10-100-szor kisebb méretű fókuszolt érhető el a rövidebb hullámhossz illetve a kevesebb nemlinearitás miatt. Tehát a rövid hullámhosszú lézerrendszerek esetén nagy fókuszált intenzitás érhető el, ugyanis a fókuszált intenzitás a lézer hullámhosszának harmadik hatványával arányos. A KrF lézerimpulzus szilárdtesttel történő kölcsönhatásakor fellépő plazmatükör-effektus a nagyintenzitású lézerek esetén kontrasztnövelő eljárásaként alkalmazható. Növelve a lézerimpulzus intenzitását a lézerimpulzusok magas frekvenciájú spektrális tartományba való konvertálásával magasrendű harmonikusok (high-order harmonic generation, HHG) kelthetők gázokban, illetve szilárd anyag felszínén keletkező plazmában is. A nagy időbeli feloldóképesség mellett a rövid hullámhosszak következtében nagy térbeli felbontást kapunk.

Doktori értekezésem ebbe az irányba kíván beilleszkedni a magas harmonikusok vizsgálatával, illetve az ezek létrehozásához szükséges lézeres infrastruktúra fejlesztésével, ugyanis számos kísérlet során a KrF lézer paramétereinek kontrollálása nagy jelentőséggel bír, úgymint a lézerimpulzus energiája, időbeli kontrasztja, illetve annak időbeli és irány szerinti stabilitása. Munkám során az ezen diagnosztikai problémák megoldására alkalmas eszközök tervezését, illetve megvalósítását tűztem ki célul. Részt vettem egy nemzetközi kísérletsorozatban, ahol a relativisztikus intenzitással szilárdtesten keltett (ROM) harmonikusokba való konverziós hatásfokot vizsgáltuk. Célunk a néhány ciklusú lézerrel keltett, egyedülálló attoszekundumos impulzusba való konverzió meghatározása volt.

A dolgozatomban bemutatott eredmények a Szegedi Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszék és a MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Plazmafizikai Osztálya által közösen alapított Nagyintenzitású Lézerlaboratóriumban (HILL), és kis részben a garchingi Max-Planck Kvantumoptikai Intézetben egy közös kísérlet során születtek.

2. Tudományos háttér

Az elmúlt évtizedben a széles spektrumtartománnyal rendelkező koherens lézerek a különböző kémiai, fizikai és biológiai folyamatok nagy időbeli felbontását tették lehetővé. Célunk a minél rövidebb lézerimpulzus keltése, ugyanis az impulzus hossza határozza meg a folyamatok vizsgálatának időbeli felbontását, emellett a rövid idő alatt egyre nagyobb csúcsteljesítményt tudunk elérni. A molekuláris és atomi folyamatok femtoszekundumos (10^{-15} s), attoszekundumos (10^{-18} s) időtartamúak, így vizsgálatukhoz rövid lézerfény-felvillanásokra, azaz lézerimpulzusokra van szükség. Az alap- és az alkalmazott kutatásokban is fontos szerepet játszik a különböző lézerrendszerek fejlesztése, illetve azok alkalmazása.

Ahhoz, hogy ezeket a gyors folyamatokat vizsgálni tudjuk, illetve az azokba történő beavatkozáshoz a lézerimpulzusok kontrollálására van szükség. A nagyintenzitású lézerrendszereket alkalmazó kísérletek során számos lézerparaméter monitorozása, szabályozása, szinkronizálása válhat szükségessé. A lézerimpulzusok időbeli- és térbeli kontrasztjának javítása mellett az impulzusok energiája is fontos paraméterként említendő. Az attoszekundumos impulzusok keltésénél például nélkülözhetetlen az energia monitorozása. A laborunkban (HILL) végzett lézer-anyag kölcsönhatások során is fontos szerepet játszik a femtoszekundumos lézerimpulzus energiájának mérése. A harmonikusok keltésével kapcsolatos kísérleteknél mind az impulzus időbeli kontrasztja, mind az energia monitorozása meghatározó. A mérendő impulzusok rövid időtartama miatt a mérőáramkör gondos tervezést igényel, ugyanis az elektronikai áramkörök jelentős része lassabb a mérendő impulzus hosszánál. Emellett a laboratóriumban megjelenő zajok eliminálása is szükségessé válik a pontos mérési eredmények kinyerésének céljából. Az anyagmegmunkálás során az energia monitorozása mellett a lézerimpulzus irány szerinti stabilitása is nagy jelentőséggel bír. A valós lézernyalábok stabilitása több tényező függvénye, úgymint a hőmérsékletváltozás vagy a mechanikai rezgések. A lézerekkel végzett kísérletek során ezen befolyásoló tényezők nem hagyhatók figyelmen kívül. Amennyiben a lézernyaláb stabilitása a megkívánt pontosságnak nem tesz eleget, akkor a nyalábszabályozó rendszerek alkalmazása válik szükségessé. Számos tanulmány íródott a különböző lézerek irány szerinti stabilitásának vizsgálatáról, főként a hosszútávú driftek eliminálása céljából. Ez a KrF lézerrendszerekkel végzett kísérletek során is igen fontos. Mivel a KrF lézererősítő telítési energiája viszonylag alacsony, ezért a nagy lézerenergiához nagyméretű nyalábra van szükségünk. A legtöbb

kereskedelmi forgalomban kapható detektor főként szilárdtestlézerek kisméretű nyalábjainak detektálására alkalmas, ezzel szemben az ultraibolya tartományban érzékeny nagyméretű detektorok jóval ritkábbak. A lézerimpulzusok térbeli stabilitása mellett számos kísérletnél az impulzus időbeli szinkronizálása is fontos kritérium.

3. Célkitűzések

Célul tűztem ki az ultraibolya tartományban működő lézerrendszer paramétereinek monitorozását, illetve azok szabályozását a különböző laboratóriumi kísérletek során. A KrF lézerrendszer impulzusának irány szerinti és időbeli stabilizálására, illetve az energia monitorozására alkalmas eszközöket készítettem, emellett a ROM harmonikusokba jutó konverziós hatásfokot vizsgáltam:

- Első célom egy olyan energiamonitor megépítése volt, amely a nagyintenzitású KrF lézerimpulzusok energiájának mérésére alkalmas. A korábbi energiamérőkkel szemben ezen eszköz az optikai szálak kommunikációnak köszönhetően érzéketlen az elektromos zajokra, emellett USB porton keresztül csatlakoztatható a számítógéphez, digitális formában tárolhatóak, illetve értékelhetőek ki a mérési eredmények. Ezen energiamonitort alkalmazva elvégeztem a plazmatükör-kísérletet. A kísérlettel arra akartam választ kapni, hogy a plazmatükör alkalmazható-e kontrasztnövelő eljárásként KrF lézerrendszerek esetében, azaz az elő- és a végerősítő közé integrálható-e anélkül, hogy a (telítésben működő) végerősítő energiája lényegesen lecsökkenne.
- Második célom az ultrarövid, KrF lézernyaláb irányának stabilizálása volt, ugyanis a lézerimpulzusok iránystabilitása elengedhetetlen a magas harmonikusok keltése során és a plazmaspektroszkópiában, amikor rövid fókusztávolságú parabolatükörrel mikrométernél kisebb méretű foltba fókuszáljuk a nyalábot. Mivel a mechanikai rezgések és a hőmérsékletváltozás miatt a lézernyaláb iránya megváltozhat, így annak fókuszálhatósága romlik, ezért a célom egy aktív vissz szabályozó rendszer kiépítése volt. Ehhez egy detektoregységet fejlesztettem, amely detektálja a nyaláb térbeli elhelyezkedését és egy automata visszacsatoló rendszerrel motorvezérelt tükrök segítségével szabályozza a KrF lézerimpulzus irányát, biztosítva ezzel a nyaláb irány szerinti stabilitását.

- Az energiamonitorozással és detektortechnikával kapcsolatos ismereteimet használtam fel, amikor egy, a Max-Planck Kvantumoptikai Intézetben végzett kísérletsorozatba bekapcsolódva célul tűztem ki a szilárdtest lézerrendszerrel keltett ROM harmonikusokba jutó energia meghatározását. Részt vettem a kísérleti elrendezés megtervezésében, beépítettem a relativisztikusan oszcilláló tükör mechanizmusával keltett harmonikusokba jutó energia méréséhez szükséges detektáló egységet, majd egy abszolút kalibrált röntgen-fotodióda segítségével meghatároztam a 17 nm-től a 80 nm-ig terjedő spektrumtartományban keletkező harmonikusok konverziós hatásfokát.

4. Tudományos eredmények

Munkám kísérleti jellegű volt. A kísérleteim során elért eredményeimet a következő tézispontokban foglaltam össze:

1. **Megépítettem egy optikai szálakommunikációval rendelkező, a számítógéphez USB porton keresztül csatlakozó energiamérő eszközt a nagyintenzitású, KrF lézerimpulzus energiájának monitorozására, amelyet lézer-anyag kölcsönhatások vizsgálatánál alkalmaztam. [T1]**

Az általam tervezett energiamonitor a 248 nm hullámhosszú, néhány száz femtoszekundumos KrF lézerimpulzusok energiájának mérésére alkalmas, tehát képes rövid impulzusok fogadására, azaz a lézer energiájával arányos jel megmérésére. A mérőeszköz egy analóg és egy digitális csúcserők-mérő és -tartó áramkört tartalmaz, amely a rövid impulzusok detektálását biztosítja. Ezen módszerrel a mérési adatok digitális formában tárolhatók, illetve értékelhetők ki egy számítógép segítségével. Az általam kifejlesztett energiamonitorral az energiaméréseket 0.42%-os statisztikus hibával sikerült elvégezni. Az eddigi energiamonitorokkal szemben újítást jelent az USB porton keresztüli számítógéphez történő csatlakoztatás, illetve az optikai szálakon keresztüli kommunikáció, amellyel sikerült elérni azt, hogy a monitor érzéketlen legyen a lézerplazma kísérletekből és az excimer lézerekből eredő elektromágneses impulzusok interferenciájára, a földhurkokból származó elektromos zajokra.

- 2. Az általam kifejlesztett energiamérővel megvizsgáltam a plazmatükör-effektust KrF lézer esetén, és megmutattam, hogy akár 50%-os konverzió is elérhető. Szintén felhasználtam az energiamérőt az argon gázban keltett rezonáns 3. harmonikus vizsgálatánál. [T2, T3]**

Az újonnan kifejlesztett mérőeszközt a HILL laboratóriumban végzett kísérleteknél alkalmaztam, úgymint a plazmatükör-kísérletnél és a gázharmonikusok keltésével kapcsolatos kísérletben is. A KrF lézerimpulzus egy erősítőn való kétszeri áthaladását követően elvégeztem a plazmatükör-kísérletet. Megvizsgáltam, hogy milyen intenzitásnál optimális a reflexió. A plazmatükör-effektussal, mint kontrasztnövelő eljárással, ~50%-os energia-reflexiót kaptam 12°-os beesési szög esetén. A gázharmonikusok keltésével kapcsolatos kísérletben a 600 fs impulzushosszúságú KrF lézerimpulzust egy vákuumkamrába bevezetett argon gázfelhőbe fókuszáltuk. Meghatároztuk a 248 nm hullámhosszú lézerimpulzus rezonáns, 83 nm hullámhosszú harmadik felharmonikusának konverziós hatásfokát a vendégkutatók által kifejlesztett szilícium- és gyémántdetektor segítségével, ami ~0.23%-nak adódott, egy hármas faktorialisan kevesebbnek, mint a korábban más módszerrel végzett kísérletekben.

- 3. Megterveztem és megépítettem egy automatikus nyalábstabilizáló rendszert a KrF lézerimpulzus irány szerinti stabilitásának biztosítására. A nagyintenzitású KrF lézerrendszerekkel végzett kísérletek során a rövid idejű fluktuációnak és a hosszú idejű driftnek köszönhetően a lézernyaláb iránya megváltozhat. Az automatikus nyalábstabilizáló rendszer ~5 μ rad pontossággal képes azt visszaállítani az eredeti pozícióba. [T4]**

A KrF lézernyalábot visszaszabályozó rendszerrel megvalósítottam a lézernyaláb hosszú idejű driftjének kompenzálását, amely a hőmérsékletváltozás hatására bekövetkező mechanikai deformációkból származtatható. A stabilizáló rendszer a nyaláb térbeli elhelyezkedésének függvényében egy automata visszacsatoló rendszerrel, motorvezérelt tükör segítségével szabályozza a KrF lézerimpulzust a kívánt pozícióba. A lövésről lövésre megjelenő fluktuáció ~12 μ rad volt (14% illesztési hiba). A hosszútávú drift szimulálásával a visszaszabályozás után ~14 μ rad (15% illesztési hiba) volt a nyaláb irány szerinti eloszlása. A magára hagyott

rendszerben hat nap elteltével pedig ~ 61 μrad nagyságú szöget mozdult el a nyaláb, amit a nyalábszabályozó rendszer ~ 5 μrad pontossággal az eredeti pozícióba visszaállított. A nyaláb természetes divergenciája ~ 15 μrad 7%-os illesztési hibával. A diffrakció-limitált KrF lézerimpulzus parabolatükörrel való fókuszálásakor asztigmia léphet fel, amelynek az eliminálása elengedhetetlen. A nyalábstabilizáló rendszer a lézerimpulzus irány szerinti visszaállításának pontossága közel egy nagyságrenddel jobb, mint amit az F/3-as parabolatükörrel való optimális fókuszálás megkövetel.

- 4. Egy nemzetközi kísérletben sikerült meghatározni a garchingi Max-Planck Kvantumoptikai Intézetben található multi-terawattos titán-zafír lézerrendszerrel (ATLAS) végzett lézer-plazma kölcsönhatás során keletkező ROM harmonikusokba jutó $\sim 10^{-4}$ konverziós hatásfokot. Ebben a kísérletben az én szerepem az abszolút kalibrált röntgen-fotodiódás mérések elvégzése és a mérések feldolgozása volt. [T5]**

Összeállítottam és a kísérleti elrendezésbe építettem a ROM harmonikusokba jutó energia méréséhez szükséges detektáló egységet, majd ezt követően megmértem a harmonikusokba jutó energiát egy IRD AXUV100 abszolút kalibrált röntgen-fotodióda, egy foszforernyővel ellátott MCP detektor és egy CCD kamera segítségével. A kamera által felvett nyalábképek extrapolálását követően a fotodióda által szolgáltatott jeleket felhasználva 10 db lövés kiértékelésének átlagából $\eta_1 = 1.67 \cdot 10^{-4} \pm 0.71 \cdot 10^{-4}$ harmonikusokba jutó konverziós hatásfokot kaptam. A konverziós hatásfok megméréseivel az egyes attoszekundumos impulzusok energiái megadhatók. A 17 nm-től a 80 nm-ig terjedő spektrumtartományban keletkező harmonikusnyalábba jutó átlagos energia $E_{\text{XUV}} = 30$ μJ -nak adódott, azaz egy attoszekundumos impulzusba $E_{\text{as}} \approx 6$ μJ energia konvertálódik, amely egy attoszekundumos impulzus esetén $P_{\text{as}} \approx 60$ GW teljesítménynek felel meg.

5. Publikációk

A tézispontokhoz felhasznált publikációk:

- [T1] A. Barna, I. B. Földes, Z. Gingl, R. Mingesz (2013) Compact energy measuring system for short pulse lasers, Metrology and measurement systems XX:(2) pp. 183-190.
- [T2] I. B. Földes, A. Barna, D. Csáti, F. L. Szűcs, S. Szatmári (2010) Plasma mirror effect with a short-pulse KrF laser, Journal of Physics: Conference Series 244, 032004.
- [T3] R. Rakowski, A. Barna, T. Suta, J. Bohus, I. B. Földes, S. Szatmári, J. Mikołajczyk, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, C. Verona, G. Verona Rinati, D. Margarone, T. Nowak, M. Rosiński, L. Ryc (2014) Resonant third harmonic generation of KrF laser in Ar gas, Review of Scientific Instruments 85:(12) pp. 123105.
- [T4] A. Barna, I. B. Földes, J. Bohus, S. Szatmári (2015) Active stabilization of the beam pointing of a high-brightness KrF laser system, Metrology and measurement systems 22:(1) pp. 165-172.
- [T5] P. Heissler, A. Barna, J. M. Mikhailova, G Ma, K. Khrennikov, S. Karsch, L. Veisz, I. B. Foldes, G. D. Tsakiris (2015) Multi- μ J harmonic emission energy from laser-driven plasma, Applied Physics B 118: pp. 195-201.

További publikációk:

1. R. Mingesz, A. Barna, Z. Gingl, J. Mellár (2012) Enhanced control of excimer laser pulse timing using tunable additive noise, Fluctuation and noise letters, 11:(1) pp. 1240007-1-1240007-10.
2. S. Szatmári, R. Dajka, A. Barna, I.B. Földes (2013) Improvement of the spatial and temporal contrast of short-pulse KrF laser beams, EPJ Web of Conferences 59, 07006.
3. L Ryc, A Barna, Lucia Calcagno, Istvan B Foldes, Piotr Parys, Ferenc Riesz, Marcin Rosinski, Sandor Szatmari, Lorenzo Torrisi (2014) Measurement of ion emission from plasmas obtained with a 600 fs KrF laser, Physica Scripta T161 014032.

Konferenciaelőadások, poszterek:

4. I. B. Földes, A. Barna, D. Csáti, F. L. Szűcs, S. Szatmári (2009) Plasma mirror effect with a short-pulse KrF laser, Proc. of the Sixth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, San Francisco USA, szeptember 6-11, poszter prezentáció

5. I.B. Földes, A. Barna, D. Csáti, S. Szatmári (2010) Plasma mirror for cleaning KrF laser pulses, 31st European Conf. on Laser Interaction with Matter, Book of Abstracts, p. 135., Budapest, szeptember 6-10, poszter prezentáció
6. S. Szatmári, R. Dajka, A. Barna, I.B. Földes (2011) High contrast UV laser beam based on active nonlinear temporal and spatial filtering, Meeting of COST Action MP0601, Short Wavelength Laboratory Sources, Dublin, Írország, május 30-31, poszter prezentáció
7. R Mingesz, Z Gingl, A. Barna (2011) Enhanced control of excimer laser pulse timing using tunable additive noise, Fluctuation and Coherence: from Superfluids to Living Systems, Book of Abstract p. 18, Lancaster UK, július 13-16, előadás
8. S. Szatmári, R. Dajka, A. Barna, I.B. Földes (2011) Improvement of the spatial and temporal contrast of short-pulse KrF laser beams, 7th Int. Conf. on Inertial Fusion Sciences and Applications, Book of Abstracts, P.74, Bordeaux, Franciaország, szeptember 12-16, poszter prezentáció
9. S. Szatmári, R. Dajka, A. Barna, I.B. Földes (2011) Nonlinear temporal and spatial filtering of high-power laser beams, Light at extreme intensities, Book of Abstract p. 40, Szeged, november 14-16, előadás
10. A. Barna, P. Heissler, J.M. Mikhailova, K. Khrennikov, S. Karsch, L. Veisz, F. Krausz, G.D. Tsakiris and I.B. Földes (2012) Conversion efficiency measurement of relativistic harmonics, Laserlab User Meeting, Book of Abstracts, p. 7., Szeged, február 16-17, előadás
11. I.B. Földes, A. Barna, R. Dajka, S. Szatmári (2012) Pulse cleaning methods of short-pulse high power KrF lasers, IZEST Conference, Darmstadt, Németország, április 23-25, poszter prezentáció
12. S. Szatmári, R. Dajka, A. Barna, B. Gilicze, I.B. Földes (2013) Contrast improvement by nonlinear temporal and spatial filtering of high-power laser beams, 3rd Conference on High Intensity Laser and Attosecond science, Izrael, december 2-4, előadás
13. A. Barna, I. B. Földes, B. Gilicze, S. Szatmári (2014) Plasma mirror for cleaning short-pulse high power KrF laser, LMJ-PETAL scientific programme and COST action MP1208 kick-off meeting, Bordeaux, Franciaország, március 5-7, poszter prezentáció
14. S. Szatmári, B. Gilicze, R. Dajka, A. Barna, I B Földes (2014) Nonlinear Fourier filtering of high-brightness KrF laser beams, 1st International Symposium on High Power Laser Science and Engineering, Suzhou, Kína, március 16-19, poszter prezentáció