

Ultrarövid lágy röntgen impulzusok vizsgálata

Részletes jelentés

1. Bevezetés

A pályázat fő témája ultrarövid impulzusok keltése volt a látható tartománytól a lágy röntgensugárzás tartományáig. A rövid hullámhosszú, ultrarövid impulzusok keltését az ultrarövid lézerek elterjedése teszi lehetővé. Segítségükkel a pikoszekundumnál is rövidebb időtartam alatt forró, többszáz eV hőmérsékletű plazma kelthető, amelynek már a karakterisztikus vonalai is a röntgentartományba esnek. A nagy intenzitásokon fellépő nemlineáris jelenségek a lézerfény magas felharmonikusainak keltését teszik lehetővé, amelyek szintén a vákuum ultraibolya és extrém ultraibolya tartományba esnek. Ezen magas harmonikusok keltése az alapja az attoszekundumos impulzusok létrehozásának, amelynek – reményeink szerint – a magyarországi ELI-ALPS berendezés lesz az európai központja. Ezért a magas harmonikusok kutatása együttal fontos előmunkája az ELI-ALPS-nak.

A pályázatot két hazai csoport, a KFKI Rézecske és Magfizikai Kutatóintézet Plazmafizikai Főosztálya és a Szegedi Tudományegyetem (SZTE) Kísérleti Fizikai Tanszéke együttműködése keretében végeztük. Hazai kísérleteinket a velük együttműködésben kialakított szegedi HILL laboratóriumban végeztük, az ultrarövid, ~600fs impulzushosszú KrF lézerrel.

Az eredeti pályázatban három témakört jelöltünk meg, a harmonikusok rezonáns gerjesztését gázokban, a lézerplazmában keltett harmonikusok tanulmányozását és a rövid röntgenimpulzusok spektroszkópiai vizsgálatát. Ezen témákhoz természetesen csatlakozik a negyedik témakör, mindezen kísérletek alapja, a KrF lézer fejlesztésével kapcsolatos vizsgálatok részletezése.

A jelentés első részében épp a KrF lézerekkel kapcsolatos eredményeket részletezzük. Jelentős kutatásokat és fejlesztéseket végeztünk a KrF erősítők kisülésének javítására. Eredményeinknek köszönhetően a kisülés térfogatát és ezzel a kinyerhető energiát sikerült megnövelni úgy, hogy eközben a kisülés homogén maradt, és a stabilitás is javult. Egy új erősítővel - amelyben már az általunk kifejlesztett elő-előionizáció módszerét is alkalmaztuk – sikerült a lézerimpulzus energiáját a négyszeresére növelni, amellyel 10^{18} W/cm² fókuszált energiát értünk el. A KrF lézerek tulajdonságainak ismeretében javaslatot tettünk egy új "gyors begyújtási" elrendezésre a tisztán KrF lézerrel végzett lézeres termonukleáris fúzióra (**1.sz. kiemelt eredmény**). Megmutattuk, hogy az USA-ban tervezett 0.5MJ-os tesztberendezés elektronnyalábbal pumpált erősítője pumpálási idejének mintegy 30%-os növelésével ugyanaz a rendszer használható gyors begyújtáshoz is. Egy új, sokfókuszú gyors begyújtási elrendezést javasoltunk, ami szükségtelessé teszi a nyalábok bonyolult egyesítését, ahelyett többszáz 1ps hosszúságú impulzust külön-külön fókuszál a céltárgyra.

A második részben röviden összefoglaljuk a gázharmonikusokkal végzett kísérleteket, amelyek során egy elongált gáztargettel sikerült a fázisillesztést a geometriailag lehetséges optimális hosszúig megvalósítani.

A harmadik részben a lézerplazma-harmonikus kutatásokat tárgyaljuk. Mivel a KrF lézer kontrasztja az új erősítővel nem volt elegendő, ezért vizsgálatokat kezdtünk a kontraszt javítására. Elsőként sikerült demonstrálnunk, hogy a plazmatükör effektus a KrF lézer hullámhosszán is fellép, és a kapott 50% reflexió lehetővé teszi annak alkalmazását KrF rendszerekben is (**2.sz. kiemelt eredmény**). Mivel a nemrelativisztikus intenzitásoknál fellépő harmonikusok keltésében szerepe lehet a keltett mágneses térnek, ezért a prágai Műszaki Egyetem és a milánói Bicocca Egyetem kutatóival együtt kifejlesztettük az egyidejű polarizációs interferometriás vizsgálatokat. Résztvettünk a garchingi MPQ-ban végzett magas harmonikus kísérletekben. Az ottani 8fs-os impulzushosszú lézert használva először sikerült

10fs-nál rövidebb impulzusokkal plazma-harmonikusokat keltetni (**3.sz. kiemelt eredmény**). Megvizsgáltuk a harmonikusoknak a lézer polarizációjától, illetve annak ellipticitásától való függését, mind pedig a keltett harmonikusok polarizációját az általunk készített polarizáció analízátorral. Megmutattuk, hogy a 3-ciklusú lézerrel keltett harmonikusok polarizációjában a p-komponens, azaz a beesési síkban levő polarizáció a domináns a koherensen ébredő emisszióval (CWE) keltett harmonikusok esetében.

Spektroszkópiai vizsgálataink során VUV spektrométerrel nyomon követtük az ionizáció növekedését a lézerintenzitás növekedésével a 10-30 nm spektrális tartományban a plazma-küszöbtől 10^{16} W/cm²-ig. Eredményeink lehetővé tették adataink összevetését a 2-komponensű LiF keverékre vonatkozó szimulációkkal. Ezzel meg tudtuk becsülni a plazmatűkör optimális működéséhez szükséges plazmaparamétereket. Részt vettünk egy, a prágai PALS lézeren végzett nemzetközi kísérletben, ahol Badziak és munkatársai kimutatták, hogy a lézerrel szemben terjedő plazma jetek keletkezését a sugárzási hűtés okozza. Ezt támasztották alá csoportunk spektroszkópiai adatai is, amennyiben a megfigyelt Cu L-héj sugárzás jóval intenzívebb volt az Al K-héj sugárzásánál.

Kutatásainkhoz kapcsolódóan a pályázat ideje alatt két fizikus diplomamunka (Gulyás Gábor, Szűcs Ferenc Lajos) és két fizika BSc (Csáti Dániel és Chiara Liberatore) szakdolgozat született. A pályázat ideje alatt rendeztük meg a 110 résztvevős, nagysikerű IAMPI 2006-os konferenciát, ahol az ultrarövid impulzusokkal kapcsolatos fizika több, tudományos mérföldkövét jelentő előadás először hangzott el (magas harmonikusok egészen 3keV-ig, lézeres elektrongyorsítás 1 GeV-ig, egyedülálló 130 attoszekundumos impulzus létrehozása). Munkánk elismerésének tekinthető, hogy 2010-ben megrendezhettük Budapesten a hagyományos, 31. ECLIM (European Conference on Laser Interaction with Matter) konferenciát is.

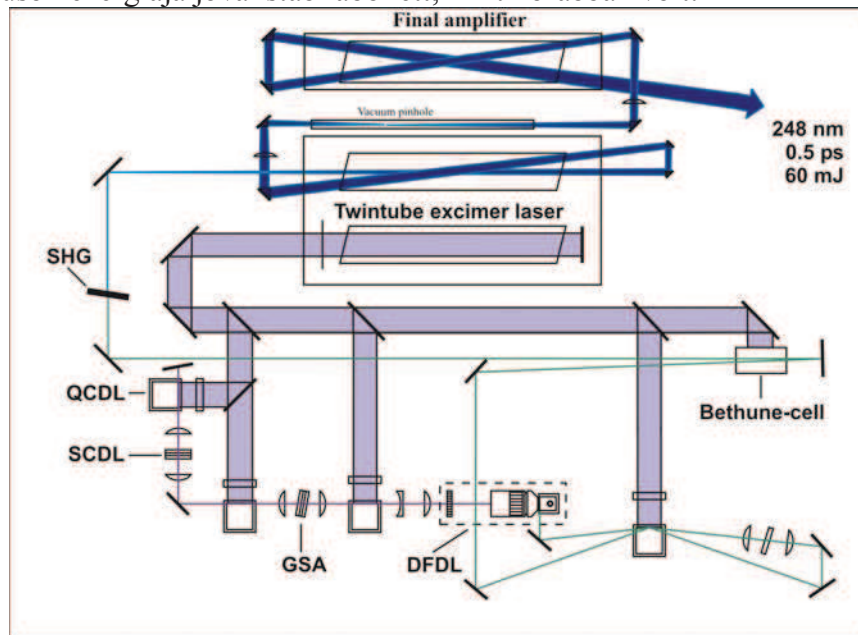
2. KrF lézerek vizsgálata

A lézerplazmában történő harmonikusokkeltés hatékonysága növelésének legkézenfekvőbb módszere a lézer impulzusenergiájának növelése. A nagy impulzusenergia elérésének szükséges feltétele a megfelelő homogenitású lézer-erősítők használata. A homogén gázkisülés létrehozásának egyik feltétele az excimer lézer elektródáin gyors felfutású, előimpulzus-mentes gerjesztő feszültség létrehozása. Kifejlesztettünk egy differenciális gerjesztő elrendezést, amellyel a mágneskapcsoló szivárgó árama által okozott, az elektródákon megjelenő előváll kompenzálható. Ennek a kompenzálásnak a segítségével a lézer aktív közegének gerjesztése, egyúttal a lézernyaláb homogénebbé válik [1]. Ezt a kompenzációt egy hibrid, festék-excimer femtoszekundumos lézerrendszer KrF erősítőjében alkalmazva, a lézerimpulzusok energiája, illetve annak stabilitása 11%-kal, illetve 9%-kal növekedett.

A homogén gázkisülés létrehozásának feltételei közé tartozik az excimer aktív közeg megfelelően nagy intenzitású előionizációja is. Kifejlesztettünk egy ún. „elő-előionizációs eljárást”, amelynek lényege abban áll, hogy néhány szikraköz még az előionizáció előtt előionizálja a többi szikraközt, s így biztosítható a szikraközök, és ezáltal a fő kisülés stabil működése [2].

Az általunk alkalmazott femtoszekundumos festék-excimer lézerrendszer impulzusenergiáját a már meglévő KrF erősítőt gerjesztő gázkisülés homogenitásának növelése mellett egy újabb KrF excimer erősítőfokozatnak a rendszerbe illesztésével növeltük. Ebben az új, a korábbinál nagyobb térfogatú aktív közeggel rendelkező excimer erősítőben is alkalmaztuk az elő-előionizáció módszerét. A végerősítőnek a rendszerbe illesztése után a lézer impulzusenergiája ~20mJ-ról 60-80mJ-ra növekedett a ~600fs (mért érték: 620±10fs) impulzushossz-megtartása mellett, amivel 10^{18} W/cm² fókuszált impulzust

értünk el 10^9 impulzus-kontraszt mellett, miközben a lézerimpulzusok reprodukálhatósága javult, az impulzusok energiája jóval stabilabb lett, mint korábban volt.



1. ábra: A HILL laboratórium lézerrendszere az új erősítővel

A lézerimpulzus fázisfrontjának levegőben való torzulásainak elkerülése érdekében felépítettünk egy nyalábvezető csőrendszert, továbbá a végerősítőhöz tartozó off-axis nyalábmenetet beállító optikai elemeket is a levegő sűrűség-ingadozásaitól védett dobozban helyeztük el. A lézerrendszerben az előerősítőt és a végerősítőt egymástól független nagyfeszültségű gerjesztőkör táplálja. A jó energiastabilitás érdekében elengedhetetlenül fontos ezen gerjesztőkörök nanoszekundum pontosságú szinkronizálása. A megfelelő szinkronizáció elérésének érdekében egy házilag kifejlesztett úgynevezett „active delay”, azaz aktív késleltető generátort építettünk a rendszerbe. Ez az egység optikai kábeleken keresztül kommunikál a lézerrendszerrel, és a triggerjelet szolgáltató számítógéppel. Az optikai kábelek alkalmazásának köszönhetően a késleltető generátor, a számítógépek és ezért a lézer működését károsan befolyásoló elektromágneses interferencia nagymértékben csökkent.

Tapasztalataink szerint a nagy keresztmetszetű homogén gázkisülés létrehozása – még optimális gerjesztő impulzus és preionizáció esetén is – nehézségekbe ütközik; a gázkisülésben filamentumok jelenhetnek meg, amelyek lerontják annak homogenitását. A kisülés homogenitását lerontó fonalak és a homogén gázkisülés térben történő elkülönítésére az anód mellé – a felső előionizációs szikracsúcsok tükörképének megfelelően – segédelektrodákat helyeztünk el. Ekkor a fonalak a segédkisülésbe helyeződtek át, így egy homogén kisüléssel és elegendően nagy tárolt energiával jellemezhető KrF femtoszekundumos erősítőt kaptunk.

A KrF erősítőben tárolt energiát és ezáltal a femtoszekundumos lézerrendszerünk kimeneti energiáját a végerősítőben létrehozott gázkisülés homogenitásának növelése mellett a kisülés térfogatának növelésével is lehet növelni. Az aktív közeg térfogatának növelése a gázkisülést létrehozó elektródák szélességének vagy távolságának növelésével is elérhető. Tapasztalatunk szerint az elektródák szélességének növelése helyett célszerű az elektródák távolságát növelni, ami egyúttal a pumpáló feszültség növelését követeli meg. Egy általunk kifejlesztett két – kaszkádba kötött – feszültségkétszerező kapcsolás alkalmazásával legalább 100 mJ-os kimenő energia elérése lehetséges.

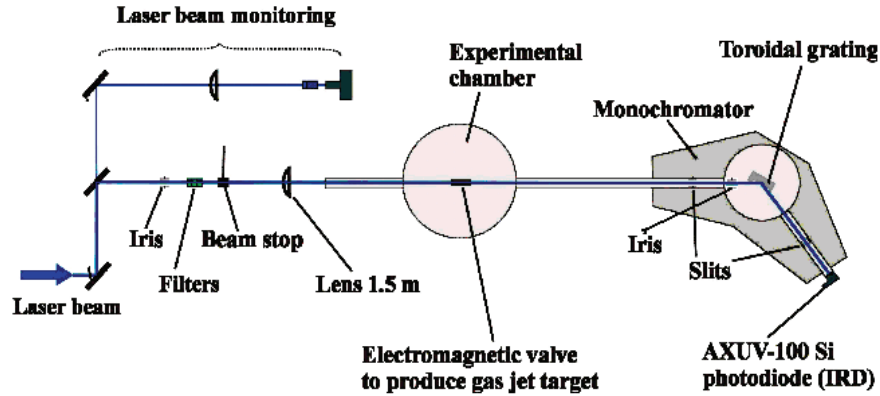
A KrF lézerek fúziós alkalmazásához kapcsolódik az az új elméleti eredményünk, amelyben kifejlesztettünk egy új „gyors begyújtási” elrendezést a tisztán KrF lézerrel végzett

lézeres termonukleáris fúzióra. A gyors begyűjtés azt jelenti, hogy a fúziós kapszulát csak megfelelő sűrűsége (a folyadéksűrűség 1000-szerese) kell összenyomni, azt nem a nagy követelményt jelentő középponti szikra gyújtja be, hanem amint az összenyomás megtörtént, egy külső ultrarövid lézerimpulzussal elektronokat gyorsítunk a plazmakoronában, és a fúziót a gyors elektronok gyűjtik be egy kis foltban, a további fűtéshez szükséges α -részecskéket előállítva. Megmutattuk, hogy a Naval Research Laboratory-ban tervezett 0.5MJ-os lézerfúziós tesztberendezés elektronnyalábbal pumpált erősítője pumpálási idejének mintegy 30%-os növelésével ugyanaz a rendszer használható gyors begyűjtáshoz is. A KrF lézerek tulajdonságainak ismeretében egy új, sokfókuszú gyors begyűjtési elrendezést javasoltunk, ami szükségtelessé teszi a nyalábok bonyolult egyesítését. A szokásos egyetlen 10ps-os, nagy energiájú impulzus helyett többszáz \sim 1ps hosszúságú impulzust külön-külön fókuszálva a céltárgy különböző részeire a gyors begyűjtés szintén elérhető, és az elrendezés a korábbinál flexibilisebbnek tűnik[3]. Erre az ad lehetőséget, hogy a KrF lézerek erősítői telítési energiasűrűsége nem változik az ultrarövid impulzusok széles időtartományában, mintegy 100 femtoszekundumtól többször 10 pikoszekundumig, így az elektrongyorsításhoz szükséges intenzitás viszonylag kis energiával is elérhető.

3. Rezonáns harmonikuseltérés Ar gázban

Nemlineáris optikai folyamatok felhasználásával a látható sugárzás hatékonyan konvertálható a \sim 150 nm alatti VUV (vákuum-ultraibolya) tartományba. A leggyakrabban használt módszer a rövid hullámhosszú tartomány eléréséhez a harmonikuseltérés, amely intenzív, rövid, látható lézerimpulzusokból indul ki. A nemlineáris kölcsönhatások következtében a fényimpulzus nagy térerőssége a közegben nemlineáris polarizációt indukál, ami a beeső fény magas felharmonikusainak lesz forrása. Megjegyezzük, hogy gázokban szimmetria-okok miatt a keltő lézerimpulzus páratlan harmonikusai kelthetők. A 248.5 nm hullámhosszon működő KrF excimer lézerek esetében a rövidebb kiinduló hullámhossz következtében nem érhető el olyan magas rendű harmonikusok, mint az infravörös lézerek esetében, viszont az alacsonyabb harmonikusrendekbe nagyobb konverzió kapható. A nagy teljesítményű VUV sugárzás létrehozásához a KrF lézer 3. és 5. harmonikusa, a 82.8 és 49.7 nm hullámhosszak környékén igen vonzóak tűnik, főképp, ha atomi rezonanciákat is felhasználunk ehhez.

A 3. harmonikus nagy hatásfokkal való keltéséhez az argon a legmegfelelőbb közeg. Argon gáz esetén az ionizációs energia elég nagy ahhoz, hogy a perturbatív tartományban abszorpció-mentes harmonikuseltérést kapjunk, és ugyanakkor a sztatikus polarizálhatóság jóval nagyobb, mint Ne vagy He esetében. Az argon alkalmazása lehetővé teszi egy háromfotonos rezonancia közelében való működést, ami erőteljesen megnöveli a nemlineáris szuszceptibilitást. Dölle és munkatársai Göttingenben már korábban demonstrálták a rövid impulzusú KrF lézer fényének intenzív 3. harmonikussá való konverzióját argon gázjetekben közel 1% konverziós hatásfokkal. A maximális kimenő energia 100 μ J volt a 83 nm hullámhosszon 14 mJ pumpáló energia esetében. Ezt a gázjet részecskesűrűségének optimalizálásával érték el, valamint a fókuszálás olyan módon történő beállításával (igen hosszú fókusztávolság), hogy a pumpált térfogaton belül a hatásfokot rontó ionizációt sikerült majdnem teljesen elkerülniük[4]. Az ott végzett kísérletekben viszont a pumpált térfogat nagyságát nem optimalizálták, csak arra ügyeltek, hogy kisebb legyen a koherenciahossznál. A konverzió mérése is közvetett módszerekkel történt.

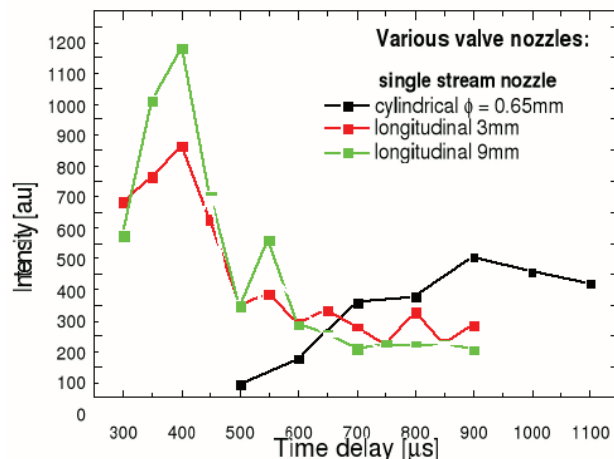


2. ábra: Kísérleti elrendezés gázharmonikusok vizsgálatára

Ezért a varsói Institute of Optoelectronics, Military University of Technology munkatársai által kifejlesztett különböző hosszúságú gázjet targetekkel is kísérleteket végeztünk. Kísérleti elrendezésünket a 2. ábra mutatja. A 3. harmonikusba való hatékony konverzió szükséges feltétele a fundamentális és a harmonikus hullám fázisának illesztése. A hullámszám-vektor elhangolása

$$\Delta k = k_{3\omega} - 3k_{\omega} = \Delta k_{disp} + \Delta k_{geom} , \quad (1)$$

alakban írható fel, ahol $k_{3\omega}$ és k_{ω} rendre a 3. harmonikus és a fundamentális hullám hullámszám-vektora. A teljes elhangolás, a Δk egy diszperzív (Δk_{disp}) és egy geometriai részből (Δk_{geom}) áll. A diszperzív tag a közegnek az alap és felharmonikusra vonatkozó törésmutatóiból kapható meg, és a rezonancia következtében lehet 0 vagy akár kis negatív érték is, mégpedig az optimális 82.85nm hullámhossz esetén $\Delta k_{disp}/N_a = -1 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2$, ahol N_a az atomsűrűség. Eközben a geometriai rész mindig pozitív, $\Delta k_{geom} = 4/b_w$, ahol b_w a konfokális paraméter. Az elhangolás így viszonylag nagy hosszúságon lehet 0, de legalábbis olyan kicsiny, hogy reciproka, a koherenciahossz nagyobb a gáztarget méreténél. A 3. ábra mutatja kísérleteink eredményét különböző gáztargetek esetén. Legkisebb volt a konverzió a göttingenihez hasonló hengersizmetrikus, 0.65 átmérőjű gázjet esetén. A harmonikusok intenzitása a 3mm hosszúságú target esetén ennek mintegy kétszerese, 9mm targetnél pedig háromszorosa volt. A számított koherenciahossz 4.4mm volt, ami azt jelenti, hogy sikerült a konverziót a gáztarget hosszának növelésével optimalizálni.



3. ábra: A harmonikus intenzitása különböző gáztargetek esetén

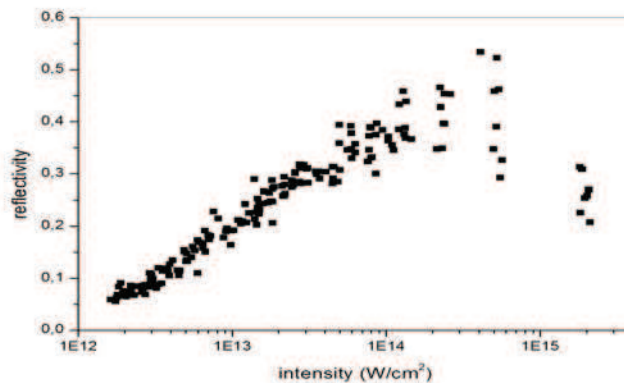
Az optimalizáció ellenére becsléseink azt mutatták, hogy a konverzió abszolút értéke a korábbi megadottnál majdnem egy nagyságrenddel alacsonyabb, $\sim 0.1\%$ volt. Mivel ehhez becsléseket kellett tennünk detektorunk és elrendezésünk érzékenységére, ezért 2010-ben újabb kísérletet végeztünk a varsói IFPILM és a krakkói egyetem közreműködésével, akik a KrF lézer hullámhosszán nem, a harmonikusokra viszont érzékeny gyémánt detektorokat használtak. A végleges eredmények a detektoroknak a két hullámhosszra való kalibrációja után várhatók, ami némileg elhúzódik, mivel azt a BESSY szinkrotronján kívánják elvégezni. A fenti kísérletekhez a lengyel-olasz csoport a LASERLAB Europe keretében kapott nyalábidőt a szegedi KrF lézerrendszerhez.

4. Harmonikusok és plazmatükör lézerplazmában

Magas harmonikusok kelthetők nagy intenzitású lézerimpulzusokkal, ahol a plazmának nincs ideje tágulni, és karakterisztikus hossza a kölcsönhatás ideje alatt a hullámhossznál rövidebb. Ekkor az elektronok a fény elektromos térerőssége hatására – nemrelativisztikus esetben - a meredek plazmagradiensen keresztül oszcillálnak, azaz anharmonikus rezgést végeznek. A vákuumból a szilárdtestbe ill. plazmába visszalépve plazmahullámot majd harmonikusokat keltenek[5]. A maximális rendű harmonikus frekvenciáját a szilárdtest belsejében levő elektronsűrűség, illetve az abból számított plazmafrequencia határozza meg. Ez – rendszámtól függően - 40-60 nm között van, tehát a KrF lézer esteén maximum az 5. harmonikus fellépése várható. Megjegyzendő, hogy relativisztikus esetben nincs ilyen határ. Korábbi kísérleteinkben a 4. harmonikus volt a legmagasabb megfigyelt, és a megnövelt intenzitással az 5. harmonikus fellépését is vártuk. Azt kellett tapasztalunk, hogy hiába növeltük az intenzitást, az új lézererősítő használatakor még a 4ω sugárzást sem láttuk. Ennek oka a meggyengült kontraszt volt, aminek következtében a 10^8 - 10^9 W/cm² intenzitás már előplazmát keltett, ami elkente a harmonikusokhoz szükséges meredek gradienst[6]. Valójában az intenzitáskontraszt gyengült. A korábbi rendszerben a 2. erősítőn háromszor haladt át a nyaláb, a végén az erősített spontán emisszióból (ESE) származó előimpulzus a főimpulzus mintegy 10%-át tette ki. Az ESE viszont a fókuszban egy nagy többszáz μm átmérőjű foltba került a főnyaláb 2 μm -es méretével szemben. Ezért, és az impulzushosszak különbözősége miatt a 10^{17} W/cm² intenzitást egy 10^7 W/cm² alatti ESE előzte meg. Az új erősítő lehetőséget adott egy térszűrő használatára, amint ezt az 1. ábra mutatja. Ezáltal az energiakontraszt egy nagyságrendet javult. Az 50 μm -es térszűrőn átjutó ESE viszont tovább erősödik, és a fókuszban is kisebb foltot ad, így jobb energiakontraszt mellett az intenzitáskontraszt romlott.

Ezért megvizsgáltuk, lehetséges-e a lézerimpulzus kontrasztjának javítása az úgynevezett plazmatükörrel. Megjegyzendő, hogy a harmonikusok is gyakorlatilag egy plazmatükörön történik[5], márcsak ezért is tárgyaljuk a plazmatükör-vizsgálatokat ezen pont keretében. Az előimpulzusok elnyomásának egyik legjobb, legdivatosabb módszere a plazmatükör. Ha egy átlátszó szilárd felületre eső lézerimpulzus intenzitását úgy választjuk, hogy csak az ultrarövid főimpulzus felfutó éle haladjon meg a plazmaküszöböt, akkor az előtte érkező előimpulzus átmegy a szilárdtesten. A keltett plazmának nincs ideje tágulni, ezért a főimpulzus egy meredek gradienstű sűrű plazmával hat kölcsön, amelyen visszaverődik. Ily módon a plazmatükör a kontrasztot több nagyságrenddel javíthatja. A plazmatükört sikerrel alkalmazzák az infravörös szilárdtest-lézerek esetében. Kísérleteink során tudomásunk szerint először mutattuk meg, hogy a plazmatükör effektus az ultraibolya KrF lézerek esetén is fellép. A visszaverődési kísérletekhez s-polarizált lézernyalábot használtunk, amelyet egy F/10 lencsével fókuszáltunk egy antireflexiós réteggel bevont kvarclapra 45° és 12.4° beesési szöggel. A targetet léptetőmotorral mozgattuk, hogy minden lövés friss felületre essen. A

beeső és reflektált nyalábokat minden lövésnél kalibrált fotodiódák segítségével monitoroztuk. A lézere energiát állandóan tartva az intenzitást a fókuszáló lencse tologatásával változtattuk, ami 4 nagyságrend vizsgálható intenzitástartományt jelentett 10^{12}W/cm^2 -től 10^{16}W/cm^2 -ig. A 45° -os beesési szöggel kapott első eredmények már bebizonyították, hogy a plazmatükör effektus fellép a 248 nm hullámhosszon[7]. Az intenzitást növelve a reflexió logaritmikusan nő a 10^{12}W/cm^2 plazmaküszöbtől, és telítődik 10^{14}W/cm^2 fölött mintegy 35%-on. A 12.4° beesési szög esetén a helyzet jobb, ekkor a reflexió az 50%-ot is eléri (4.ábra) [8].



4. ábra: A reflexió intenzitásfüggése 12.4° beesési szög mellett

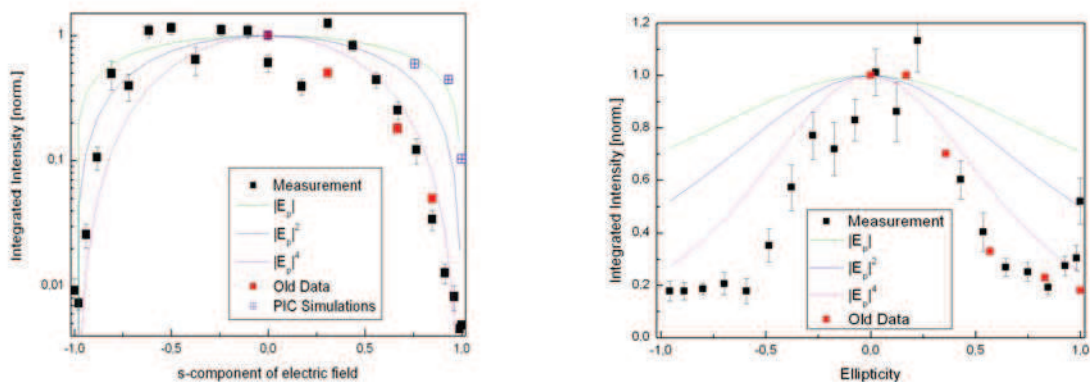
Az optimális intenzitás felett a reflexió a nemlineáris jelenségek fellépése és a növekvő ütközéses abszorpció miatt csökken, ami hasonló korábbi, Ti-zafir lézerekkel végzett kísérletek tapasztalataival. A különbség az, hogy az ott tapasztalható maximális reflexió nagyobb, $\sim 70\%$ volt a nagyobb hullámhossznak köszönhetően. A plazmatükör azonban még ebben az esetben is használható KrF lézerrendszerekben. Az 50% veszteség csökkenthető, ha a plazmatükört az utolsó erősítő előtt használjuk. A KrF erősítők ugyanis telítődési rezsimben működnek ultrarövid impulzusok esetén. Következésképpen, ha a plazmatükört a végerősítő előtt használjuk, akkor a kilépő ultrarövid impulzus energiája nem csökken lényegesen, míg az ESE-t a plazmatükör gyakorlatilag kiszűri, mivel az lineárisan erősödik, és mindössze egy erősítőn áthaladva csupán kis, nem jól fókuszálható ESE előimpulzus keletkezik.

A lézerplazmában keltett mágneses tér (a harmonikusok keltés egyik lehetséges oka ill. kísérője) vizsgálatához a prágai Műszaki Egyetem és a milánói Bicocca Egyetem kutatóival együtt kifejlesztettük az egyidejű polarizációs interferometriás vizsgálatokat. Ezen vizsgálatok során egyidejűleg végzünk interferometriát és polarimetriát. Egy Fresnel-biprizmával hullámfrontosztást végzünk, és a plazmát keresztpolarizátorok közé helyezük, így egyidejűleg mérhetjük a sűrűséget és a megváltozott polarizációt, amelyekből a Faraday rotációt figyelembe véve meghatározható a plazma mágneses tere. Az elrendezés működik, jelenleg néhány pikoszekundumtól több nanoszekundum késleltetés hozható létre a fő- és a diagnosztikai nyaláb között. A kísérletet a laborfelújítás befejezése után tudjuk folytatni, amikor megvizsgáljuk, hogy korábbi, moderált intenzitásokon végzett megfigyeléseinket - miszerint mérsékelt, $5 \cdot 10^{15}\text{W/cm}^2$ lézerintenzitás mellett az elvárásokkal szemben harmonikusokat figyeltünk meg mind p-, mind s-polarizált lézerfény esetén, a keltett, tükörszerű reflexió irányában haladó harmonikusok pedig megőrizték a lézer polarizációját – a plazmában keltett mágneses tér okozta-e.

A hazai harmonikus-kísérletek mellett részt vettünk egy kísérletsorozatban a garchingi Max-Planck-Institut für Quantenoptikban az ottani néhány ciklusú, 8fs impulzushosszúságú szilárdtest-lézerüket, az LWS10 ill. LWS20 rendszereket használva. Részvételünket az EURATOM is támogatta, és önálló projektet nyertünk el a LASERLAB Europe keretében. Először sikerült magas harmonikusokat kelteni plazmában egy 10 fs-nél rövidebb, háromciklusú lézerimpulzussal. A lézer egy OPCPA rendszer, amely 8fs hosszú impulzusokat bocsájt ki, amelyeket 45° alatt fókuszáltunk kvarc targetre maximum 10^{19} W/cm² fókuszált intenzitással. A tükörszerű irányban keltett harmonikusokat egy XUV spektrométerrel vizsgáltuk. Magas harmonikusokat figyeltünk meg egészen 20ω -ig, ahol egy levágás volt tapasztalható, amelyet a plazmafrekvencia határozott meg, következésképpen a harmonikusokat az úgynevezett koherens ébredő tér mechanizmus (CWE) hozta létre, amint azt a szimulációk is megjósolták.

Az egyes harmonikusok spektruma – az elvárásoknak megfelelően – lényegesen kiszélesedik a hosszabb impulzusokkal kapott spektrumokhoz képest és alakjuk lövésről lövésre fluktuál, amely a lézerimpulzus burkoló és vivőfrekvenciája közti fázis (carrier-envelope phase) változásának tulajdonítható[9]. Ha ui. csörpöljük a bejövő lézerimpulzusokat úgy, hogy hosszuk meghaladja a 20fs-ot, akkor a harmonikusok spektruma is keskenyebb és egycsúcsú lesz. Ez a bizonyítéka annak, hogy a megfigyelt struktúrát a 3 ciklusú lézerimpulzus rövidsége okozza.

Csoportunk feladata a harmonikusok polarizációfüggésének vizsgálata volt. Ez egyfelől a bejövő lézer polarizációjától való függést, másfelől a harmonikusok polarizációjának vizsgálatát jelenti. A polarizációfüggés tisztázása elengedhetetlen a keltő mechanizmus tisztázásához, továbbá az egyes attoszekundumos impulzusok polarizációs kapuzással való létrehozásához is szükséges. Vizsgálatokat végeztünk, a bejövő lineárisan polarizált impulzus polarizációs szögének elforgatásával, valamint a harmonikusokat megvizsgáltuk különböző ellipticitású bejövő nyaláb esetében is. Az 5. ábrán látható, hogy bár az ellipticitás növelésekor (jobb oldal) a mért intenzitás gyorsabban csökken, mint azt a szimulációból várnánk, még cirkulárisan polarizált fény esetén is (± 1) jelentékeny harmonikusok keltés figyelhető meg. Következésképpen a CWE mechanizmus esetében a hagyományos cirkuláris-lineáris-cirkuláris polarizációs kapuzás nem használható különálló attoszekundumos impulzus létrehozására. Ezzel szemben lineárisan polarizált fény esetén is megfigyeltük, hogy a mért harmonikus-intenzitás gyorsabban csökken az elvárásnál egészen 0-ig, ha a polarizáció irányát elforgatjuk, ezért elvileg lehetséges lenne CWE harmonikusok keltés esetében egy s-p-s polarizációs kapuzás egyes attoszekundumos mechanizmus előállításához.

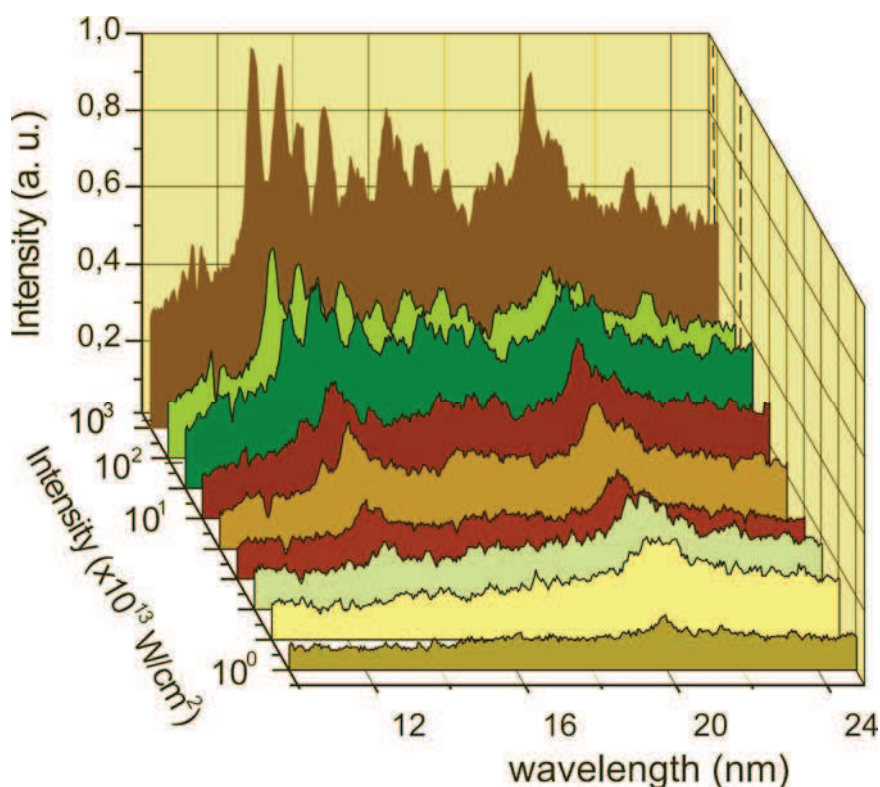


5. ábra Harmonikusintenzitás függése a lineárisan polarizált fény s-komponensének nagyságától ill. a lézerimpulzus ellipticitásától

Megvizsgáltuk a keltett harmonikusok polarizációját is az általunk készített polarizáció-analizátorral. Mivel eleve csak p-polarizált fényt keltett harmonikusokat, nem meglepő, hogy a harmonikusok polarizációja is p-polarizált volt az analizátorunk ~ 1 nagyságrendű kiválasztásával.

5. Lézerplazma spektroszkópia

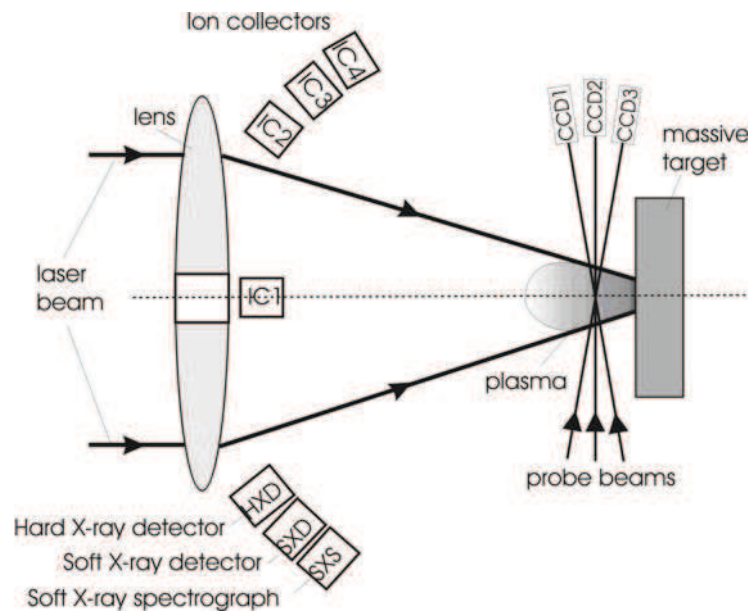
Vákuum ultraibolya (VUV) spektroszkópiai vizsgálatokat végeztünk LiF targeten a litográfiában is használt 13nm körüli tartományban, ahol a Li K-héjának és a F L-héjának emisszióját analizáltuk. Hasonlóan a plazmatükör reflexiós vizsgálataihoz nyomon követtük az ionizáció növekedését a lézerintenzitás növekedésével a 10-30 nm spektrális tartományban a plazma-küszöbtől 10^{16}W/cm^2 -ig. Az eredmények lehetővé teszik eredményeink összevetését a 2-komponensű LiF keverékre vonatkozó szimulációkkal, amelyeket külföldi együttműködő partnereink (Soreq – Izrael, NIST – USA) végeztek.



6. ábra: LiF spektrumok az intenzitás függvényében

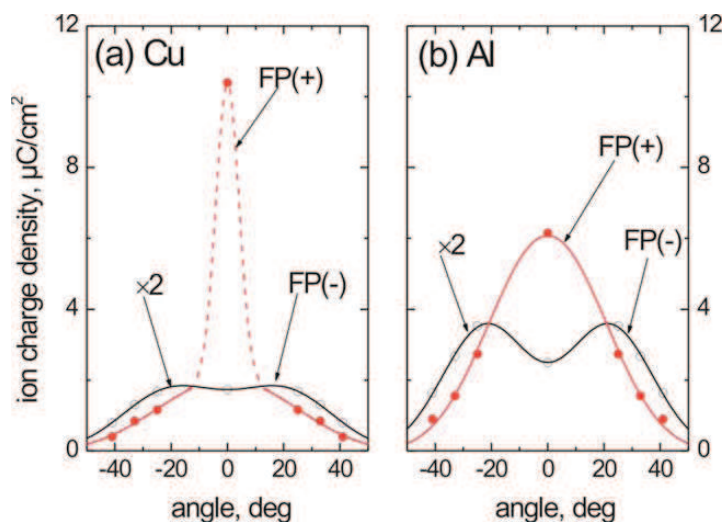
A 6. ábra foglalja össze a LiF spektrumokat. A plazmaküszöb elérése után, mintegy 5eV hőmérsékleten a héliumszerű Li vonalai jelennek meg 19.9nm-nél, majd a Lyman- α sugárzás kezd dominálni 13.5nm-en néhányszor 10^{13}W/cm^2 intenzitásnál. A plazmatükör optimális intenzitásánál, 10^{14}W/cm^2 -nél a lítium erős héliumszerű és hidrogénszerű sugárzása mellett megjelennek a Be-szerű fluor L-héj vonalai is 16 és 18 nm között, sőt, valószínűleg egy B-szerű F-vonal is látható 14.4 nm-en, a rövidebb hullámhosszakon pedig a Li-szerű F vonalai láthatók. Mindezek 20-25 eV közötti plazmahőmérsékletre utalnak. Magasabb intenzitásokon a nemlineáris jelenségek is beindulnak, 10^{14}W/cm^2 intenzitás fölött már 2ω keltést tapasztaltunk. Itt már a nemlineáris jelenségek a reflexió csökkenéséhez és a reflektált nyaláb minőségének romlásához vezetnek.

Részt vettünk egy, a prágai PALS lézeren végzett nemzetközi kísérletben, amelyet J. Badziak, a varsói IFPILM (Institute of PlasmaPhysics and Laser Microfusion) munkatársa vezetett. Makrorészecskéket gyorsítottunk az úgynevezett kettős ablációval a 10^{14} - $3 \cdot 10^{15}$ W/cm² intenzitástartományban a 250ps impulzushosszú, 0.44 μ m hullámhosszú lézerimpulzussal. Ugyanekkor a lézerimpulzussal szemben haladó jeket figyeltünk meg. A kísérleti elrendezést a 7. ábra mutatja. Az ionkollektorokkal repülési idő spektroszkópiát végeztek, és egy háromcsatornás interferométer követte a plazma tágulását. A plazmasugárzást szűrővel ellátott röntgendiódák figyelték a lágy és kemény röntgentartományban. Csoportunk hozzájárulása egy lágy röntgen spektrométer volt (SXS) amely egy réssel kombinált SiN_x transzmissziós rácson alapult. A spektrumokat BIOMAX filmmel rögzítettük. A kísérlet során vizsgáltuk a Cu, Al és Br szennyezővel dópoltt polimer targetek sugárzását, amelyekből a plazma hőmérsékletére kaptunk becslést, ami 1 keV körülinek adódott.



7. ábra: A PALS kísérleti elrendezés

A lézerrel szemben haladó kollimált ionjeteket figyeltünk meg, amikor nagy rendszámú, Cu vagy Ta targetet lőttünk meg optimalizált fókuszálással, amikor a targeten a foltméret 500 μ m volt és a fókusz sík a target mögött. Az ionáram elérte a 100 Ampert, az áramsűrűség 1 A/cm² volt 1m-re a targettől. A lézerenergia közel 10%-át sikerült konvertálni az ionok kinetikus energiájába. A kísérletek valószínűsítik, hogy a lézerrel szemben terjedő plazma jeket keletkezését a sugárzási hűtés okozza. Ezt támasztották alá a csoportunk spektroszkópiái adatai is, amennyiben a megfigyelt Cu L-héj sugárzás jóval intenzívebb volt az Al K-héj sugárzásánál[10]. A 8. ábrán látható a Cu target esetén megfigyelhető plazmajet. A plazmajetek és a sugárzási hűtés megfigyelése a lézerplazma asztrofizika körébe tartozik, hiszen ezeket a jelenségeket eddig főképp az asztrofizikában vizsgálták.



8. ábra: Az iontöltéssűrűség eloszlása Cu és Al esetén, ha a fókusz a target mögött (FP(+)) vagy előtt (FP(-)) volt

A kísérletek során megmutattuk, hogy ha vékony, 10-20 μm -es plasztik fóliákat gyorsítottunk $10^{15}\text{W}/\text{cm}^2$ intenzitással, akkor a fóliák nagy rendszámú anyaggal való dőpolása erősebb ablációhoz és nagyobb sebességhez, továbbá kollimációhoz vezet, ami gyorsított fólia nagyobb kinetikus energiáját eredményezi[11].

Referenciák

- [1] S. Szatmári, J. Bohus; Rev. Sci. Instrum. **77**, 045105 (2006)
- [2] S. Szatmári, J. Janicskó, J. Bohus; Rev. Sci. Instrum. **78**, 036108 (2007)
- [3] I.B. Földes, S. Szatmári; Laser and Particle Beams **26**, 575-582 (2008)
- [4] C. Dölle et al., Appl. Phys. B **75**, 629 (2002)
- [5] C. Thaur, F. Quéré és a benne levő hivatkozások; J. Phys. B **43**, 213001 (2010)
- [6] I.B. Földes, J.S. Bakos, K. Gál, Z. Juhász, M.Á. Kedves, G. Kocsis, S. Szatmári and G. Veres; Laser Physics **10**, 264-269 (2000)
- [7] I.B. Földes, D. Csáti, F.L. Szűcs, S. Szatmári; Radiation Effects and Defects in Solids **165**, 429-433 (2010)
- [8] I. B. Földes, A. Barna, D. Csáti, F. L. Szűcs, S. Szatmári; Journal of Physics: Conference Series **244** (2010) 032004;
- [9] P. Heissler, R. Hörlein, M. Stafe, J.M. Mikhailova, Y. Nomura, D. Herrmann, R. Tautz, S.G. Rykovanov, I.B. Földes, K. Varjú, F. Tavella, A. Marcinkevicius, F. Krausz, L. Veisz, G.D. Tsakiris; Appl. Phys. B **101**, 511-521 (2010)
- [10] J. Badziak, A. Kaszperczuk, P. Parys, T. Pisarczyk, L. Ryc, J. Wolowski, S. Jablonski, R. Suchanska, E. Krousky, L. Láska, K. Masek, M. Pfeiffer, J. Ullschmied, L.J. Dareshwar, I. Földes, L. Torrisi, P. Pisarczyk; Appl. Phys. Lett. **91**, 081502 (2007)
- [11] J. Badziak, A. Kaszperczuk, P. Parys, T. Pisarczyk, M. Rosiński, L. Ryć, J. Wołowski, R. Suchańska, J. Krása, E. Krousky, L. Láska, K. Mašek, M. Pfeifer, K. Rohlena, J. Skala, J. Ullschmied, L. J. Dhareshwar, I. B. Földes, T. Suta, A. Borrielli, A. Mezzasalma, L. Torrisi and P. Pisarczyk; Appl. Phys. Lett. **92**, 211502 (2008)