B 3641

Nagy intenzitású KrF lézerek működésének optimalizálása

PhD értekezés tézisei

Nagy Tamás

Témavezető:

Dr. Szatmári Sándor
a fizikai tudomány doktora

Szegedi Tudományegyetem
Kísérleti Fizikai Tanszék

Szeged

2000.

I. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK, CÉLKITŰZÉSEK

A legújabb lézerfizikai kutatásoknak köszönhetően a lézerekkel kelthető elektromágneses terek maximális intenzitása ugrásszerűen megnövekedett. Ma már a kísérletileg előállítható legnagyobb fókuszált intenzitás a 10^{19} - 10^{20} W/cm^2 nagyságrendbe esik. Ekkora intenzitások esetén a lézerfény elektromos térerőssége jelentősen meghaladja az atomok belsejében fellépő elektromos tér nagyságát, amelynek következtében az anyag erősen nemlineáris módon viselkedik. Az ilyen körülmények között lejátszódó nagy energiájú folyamatok - amelyek korábban csak a világ néhány pontján épült, igen költséges részecskegyorsítók segítségével voltak vizsgálhatók - ma már kisebb laboratóriumokban is tanulmányozhatóvá váltak a relatíve kis helyen, kis költséggel üzemeltethető lézerrendszerek jóvoltából. Így elmondható, hogy a nagy intenzitású lézerek fejlődése új távlatokat nyitott az anyagtudományi és a részecskefizikai kutatások számára.

Intenzív elektromágneses terek keltése lézerekkel oly módon történik, hogy a fényimpulzusok által hordozott energiát térben és időben nagyon hatékonyan - a fizika elvi korlátai által megszabott határokat megközelítő mértékben - koncentráljuk. Az időbeli koncentrációra - vagyis a lézerimpulzus minimális időtartamára, adott sávszélesség mellett - a *Heisenberg-féle határozatlansági reláció* ad korlátozást, a térbeli koncentrálhatóságot - a fókuszfolt minimális átmérőjét - pedig a *diffrakció* szabja meg.

A nagy intenzitású lézereknek a gyakorlatban két családja fejlődött ki: az infravörös tartományban működő *szilárdtestlézereken* alapuló rendszerek és az ultraibolya (*UV*) hullámhosszakon üzemelő *excimer lézerekre* épülő rendszerek. A két lézercsalád felépítése - az aktív anyagok eltérő fizikai tulajdonságainak (eltérő telítési energiasűrűségének és energiatárolási idejének) köszönhetően - lényegesen különbözik egymástól.

Napjainkban a szilárdtestlézereknél alkalmazott kifinomult technikák (*CPA erősítési séma*, *chirpelt tükrök*, stb.) alkalmazásának eredményeként ezen rendszerek által elérhető csúcsteljesítmény eléri a 100 *TW*-ot, a maximális fókuszált intenzitás pedig a 10^{20} W/cm^2 nagyságrendbe esik. Ennek köszönhetően ezen rendszerek általánosan elterjedtté váltak a nagy intenzitású folyamatokat kutató laboratóriumokban.

A nagy intenzitású lézerekkel végzett kísérletek egy része rövid hullámhosszú lézersugárzást igényel, amelynek előállítására az *UV* tartományban működő excimer lézerek a legalkalmasabbak. Az excimer lézerrendszerek által elérhető csúcsteljesítmény az *1 TW* nagyságrend-

be eső értékével lényegesen alacsonyabb ugyan mint a szilárdtestlézerekkel elérhető teljesítmény, azonban - a rövid hullámhossznak és a gáz halmazállapotú aktív anyagnak köszönhetően - az excimer lézerekkel elérhető fókuszált intenzitás már összemérhető a szilárdtestlézerek által kelthető intenzitással.

A rövid impulzusú excimer lézerek működésével kapcsolatban még számos megoldásra váró probléma van. Ezért a nagy intenzitású *KrF* lézerek működésének optimalizálása érdekében célom olyan eljárások kifejlesztése volt, amelyekkel - a fényimpulzusok spektrális tulajdonságainak módosítása által - az időbeli koncentrálhatóság, illetve - a nyalábhomogenitás változtatásán keresztül - a fókuszálhatóság tovább javítható.

A nagy intenzitású *KrF* lézerek felépítéséből következik, hogy az impulzusok spektrális és időbeli tulajdonságait - a magimpulzus előállítása után - a frekvencia konverziós egység és az *UV* végerősítő is jelentősen befolyásolja, ezért

- vizsgálni kívántam a rövid impulzusok frekvenciakétszerezésének hatásait az impulzusok időbeli és spektrális tulajdonságaira, valamint
- célul tűztem ki a *KrF* erősítőben lejátszódó - az impulzusok spektrumát módosító - folyamatok vizsgálatát.

Ami a nagy intenzitású nyalábok homogenitását illeti, ezt elsősorban a lézerrendszer *UV* hullámhosszúságon működő része határozza meg. A klasszikus nyalábhomogenizáló eljárások - mint a térszűrés vagy az átlapolásos technikák - pedig nem adnak kielégítő eredményt a nagy intenzitású nyalábok esetén, ezért

- célul tűztük ki annak megvizsgálását, hogy a *KrF* erősítő által megerősített nyaláb térbeli eloszlását milyen feltételekkel lehet javítani.

Tekintettel arra, hogy a nagy intenzitású lézerek egyre fontosabb alkalmazási területe a szilárdtestek felületén létrehozott plazmában keletkező harmonikus sugárzás vizsgálata, ezért

- célul tűztük ki annak vizsgálatát, hogy az optikai gerjesztés során alkalmazott előimpulzusok milyen hatást gyakorolnak a felharmonikus-keltésre. A vizsgálat számára új gerjesztő elrendezés kidolgozását is tervbe vettem.

E kutatási célkitűzések megvalósítása hozzájárulhat a *KrF* erősítőkön alapuló nagy intenzitású *UV* lézerekben lejátszódó folyamatok jobb megértéséhez és működésük optimalizálásához.

II. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

Kísérleteimet rövid impulzusú hibrid festék-excimer lézerrendszereken végeztem amelyekben az *500 fs*-os magimpulzust egy *497 nm*-en működő elosztott visszacsatolású festéklézer generálja, frekvenciakétszerezés után a *248 nm*-es *UV* impulzusok energiáját pedig egy ún. *off-axis* elrendezésű *KrF* excimer erősítő (módosított *LambdaPhysik EMG 150, 160MSC*) *15-40 mJ*-ra erősíti fel (Szatmári, 1994). Kísérleti munkám során a vizsgálni kívánt folyamatok tanulmányozására a fenti lézerrendszert különböző optikai elrendezések építésével egészítettem ki.

A spektrális szűrés tanulmányozásakor nagy sávszélességű (*~8 nm*), modulált spektrummal rendelkező impulzusokat állítottam elő a festéklézerrendszerbe illesztett egymódusú fényvezető optikai szál segítségével. Optikai ráccsal változtattam az impulzusok frekvenciamodulációját, nemlineáris elemként pedig *0.1* és *1 mm* vastag frekvenciakétszerző *BBO* kristályt használtam, szélessávú fázisilleszté alkalmazásával. A spektrumokat ebben az esetben is egyedi készítésű spektrográffal rögzítettem.

A *KrF* erősítő spektrális torzító hatásának vizsgálatakor a bemenő *UV* impulzus fázismodulációját prizmás kompresszorral állítottam be, az impulzusidőket soklövéses, kollineáris, lassú *UV* autokorrelátorral mértem. A rövid impulzusoknak az erősítőhöz viszonyított szinkronizációját *1 GHz* sávszélességű oszcilloszkóphoz (*Tektronix 7104*) csatlakoztatott gyors fotocellával (*Hamamatsu R1193U*) ellenőriztem, a spektrumokat pedig egyedi készítésű Littrow-elrendezésű, diódasor detektorral (*Hamamatsu S3923-512Q*) felszerelt spektrográffal mértem.

A *KrF* erősítő nyaláb-homogenizáló hatásának vizsgálatakor az erősítő kimeneti ablakát egy $f = 500$ *mm* fókusztávolságú lencsével *3:1* arányban kicsinyítve képeztem le egy *UV*-érzékeny foszfor ernyőből és *CCD* kamerából álló rendszerbe. A nyalábot két dielektrikum tükör segítségével gyengítettem a megfelelő energiára.

Az előplazma keltéses kísérletekben a gerjesztő nyaláb fordulóttükre elé eltolóra helyezett kicsiny prizmával csatoltam ki az előimpulzust. A prizma tükör előtti pozíciójának változtatásával a két impulzus közötti időeltérést lehetett finoman állítani. A két nyaláb térbeli átfedésének ellenőrzésére pedig a céltárgy felületéről visszaszórt fényt *1:10* arányban felnagyítva képeztem le egy *UV* érzékeny *CCD* kamerába.

Kísérleti eredményeim értelmezése céljából alkalmazott, illetve az általam kidolgozott elméleti modell a rövid impulzusok terjedési egyenletein alapul. Ezek az egyenletek az ún. *nemlineáris Schrödinger-egyenlet* különböző kiegészítésekkel módosított változatai, amelyek tér- és időfüggő másodrendű parciális differenciálegyenletek. Ezek numerikus megoldására - a gyors Fourier-transzformációra (*FFT*) épülő - osztott lépéses, illetve szimmetrizált osztott lépéses algoritmusokat alkalmaztam. A numerikus számolásokat saját magam által *C* programozási nyelven írt programok alkalmazásával valósítottam meg.

III. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. *Kísérletileg kimutattam, hogy rövid impulzusok frekvenciakétszerezése során a frekvenciakétszerezett impulzusok spektrumának alakja erősen függ a kezdeti fázismoduláció mértékétől. A jelenséget S.A. Akhmanov és munkatársai által kidolgozott terjedési egyenletek felhasználásával, illetve megoldásával magyaráztam. A folyamat megértéséhez felállítottam egy szemléletes, kvalitatív modellt is, amely a gyakorlatban jól felhasználható olyan elrendezések tervezésére, amelyekkel a rövid fényimpulzusok spektrális, illetve időbeli szűrése megvalósítható* [1].

   A kísérletek során úgy találtam, hogy nagy kvadratikus fázismodulációk esetén a frekvenciakétszerezett impulzus spektruma örökli az alapharmonikus spektrumának modulációt, míg az időben összenyomott impulzusok esetén - a bemenő spektrum alakjától függetlenül - sima, egy csúcsot tartalmazó kimeneti spektrumot kapunk. A jelenség értelmezését más nemlineáris folyamatok esetére is általánosítottam: nagy fázismoduláció esetén az impulzus spektrális komponensei időben eltérően, gyakorlatilag egymástól független módon haladnak át a közegen, megőrizve a spektrum alakját. Amennyiben a spektrális komponensek azonos fázisban terjednek, ezek koherens szuperpozíciója időben nagy központi csúcsot és kisebb intenzitású mellékcsúcsokat eredményez. A közeg nemlinearitása az intenzív központi csúcsot kiemeli, míg a kevésbé intenzív mellékcsúcsokat elnyomja, s ezáltal időben és spektrálisan simítja az impulzust.

2. *Kísérletileg megmutattam, hogy a rövid fényimpulzusoknak a KrF erősítőben fellépő spektrális változása jelentős mértékben függ az impulzusok kezdeti fázismodulációjától. Ennek értelmezésére elméleti modellt dolgoztam ki, amely számot ad a rövid impulzusok KrF erősítőbeli terjedését befolyásoló legfontosabb folyamatokról. A modellt alkalmazva,*

a kísérleti tapasztalatokkal jól egyező eredményeket kaptam. Ezen eredmények alapján meghatároztam a KrF erősítők rövid impulzusok erősítésére optimalizált működési paramétereit [2, 3].

Kísérleti úton megállapítottam, hogy a pozitív kvadratikus fázismoduláció jelentős (a bemenő spektrum sávszélességét közel kétszeresére növelő) spektrális szélesedéshez vezet, míg a negatív fázismoduláció az impulzus spektrumának keskenyedését eredményezi. A *KrF* erősítő hatását leíró modell-egyenlet bemenő paramétereinek változtatása révén kimutattam, hogy az impulzusok spektrális fejlődését elsődlegesen a kezdeti fázismodulációnak és az erősítő ablakaiban fellépő Kerr-típusú önfázismodulációnak a kölcsönhatása határozza meg.

3. *Kísérletekkel igazoltam, hogy a rövid impulzusú KrF erősítők működési paramétereinek helyes megválasztásával az erősített nyaláb térbeli intenzitáseloszlásának homogenitása javítható* [4].

Mivel a nagy intenzitású lézernyalábok esetén a klasszikus nyalábhomogenizáló eljárások nem alkalmazhatók, ezért az erősítés telítődésének energiastabilizáló hatását használtuk fel a nyaláb homogenizálására. Kísérleti eredményeim alátámasztják az erősítés sebességi egyenleteken alapuló modelljének segítségével kapott állítást, amely szerint az erősített nyaláb homogenitása akkor optimális, ha az impulzus energiasűrűsége a telítési energiasűrűség *1.8*-szorosa. Ez az érték közel esik az energiakinyerés hatásfoka és a kontraszt szempontjából ideális energiasűrűség korábban meghatározott értékéhez ($E \approx 2.2 \cdot E_{sat}$, Almási és munkatársai, 1992.), amely gyakorlatilag azt jelenti, hogy a hatásfok és a kontraszt szempontjából helyesen beállított erősítő a nyaláb homogenitását is növeli.

4. *Kísérleti eredményeimmel hozzájárultam annak demonstrálásához, hogy a szilárdtestek felületén nagy intenzitású lézerimpulzussal létrehozott felharmonikusok keletkezésének hatásfoka jelentősen befolyásolható előimpulzus alkalmazásával* [5].

Szén céltárgy és $\sim 5 \cdot 10^{15}$ *W/cm*^{2} fókuszált intenzitás esetén azt tapasztaltuk, hogy a második és harmadik harmonikus intenzitása a főimpulzus késleltetésének függvényében erősen változik. Ez a változás eltérő a különböző harmonikusok esetén: a harmadik harmonikus intenzitása *5 ps*-os késleltetés mellett jelentősen megnövekszik az előimpulzus nélküli esethez képest, míg a második harmonikus esetén ilyen növekedés nem tapasztalható.

IV. AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSI LEHETŐSÉGEI

A III. részben ismertetett új tudományos eredmények jelentős része a nagy intenzitású *KrF* lézerrendszerekben lejátszódó folyamatok megértéséhez, illetve ezen keresztül működésük optimalizálásához nyújtanak segítséget. Az eredmények gyakorlati vonatkozásaira való tekintettel azok közvetlenül hasznosíthatók a nagy intenzitású *KrF* lézerrendszerek építésénél. Ide vonatkozó eredményeinket számos külföldi laboratóriumban működő rendszernél alkalmazzák.

A szerzőnek a tézisekben megfogalmazott eredményei részben Szegeden a *József Attila Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszékén*, részben Németországban a *Laser-Laboratorium Göttingen* intézetben születtek.

V. AZ ÉRTEKEZÉS ALAPJÁT KÉPEZŐ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

1. P. Simon, T. Nagy, S. Szatmári:
   Nonlinear spectral filtering of femtosecond pulses
   Opt. Comm. **145**, 155-158 (1998)

2. T. Nagy, P. Simon, S. Szatmári:
   Spectral evolution of short pulses in KrF amplifiers
   8th International Laser Physics Workshop LPHYS '99; Budapest (1999)
   Laser Physics **10**, 1-4 (2000) (megjelenés alatt)

3. T. Nagy, P. Simon, S. Szatmári:
   Spectral development of short pulses in KrF gain modules
   Appl. Phys. B (közlésre beküldve)

4. M. Feuerhake, P. Simon, G. Almási, T. Nagy, S. Szatmári:
   Optimization of the output beam homogeneity of short-pulse KrF amplifiers
   Appl. Opt. **36**, 4094-4098 (1997)

5. I.B. Földes, J.S. Bakos, Z. Bakonyi, T. Nagy, S. Szatmári:
   Harmonic generation in plasmas of different density gradients
   Phys. Lett. A **258**, 312-316 (1999)

6. I.B. Földes, J.S. Bakos, G. Veres, Z. Bakonyi, T. Nagy, S. Szatmári:
   Harmonic generation in a UV laser plasma
   IEEE J. of Selected Topics in Quant. Electron. **2**, 776-781 (1996)

7. I.B. Földes, J.S. Bakos, N.A. Moustafa, G. Veres, Z. Bakonyi, T. Nagy, S. Szatmári:
   Harmonic generation from a subps UV (KrF) laser plasma
   24th European Conference on Laser Interaction with Matter ECLIM'96; Marid Spain (1996) pp. 653-656

8. I.B. Földes, J.S. Bakos, Z. Bakonyi, T. Nagy, S. Szatmári:
   Harmonic generation from laser plasma interactions on solid surfaces
   International Symposium on Plasma Research and Application PLASMA'97; Jarnoltówek near Opole Poland (1997) pp. 155-158

9. J.S. Bakos, I.B. Földes, M.Á. Kedves, G. Kocsis, G. Veres, Z. Bakonyi, T. Nagy, S. Szatmári:
   ASE prepulse effects in high harmonic generation
   6th International Conference on X-Ray Lasers; Kyoto Japan (1998)
   Inst. Phys. Conf. Ser. **159**, 531-534 (1999)

Társszerzői nyilatkozat

Nagy Tamás *Nagy intenzitású KrF lézerek működésének optimalizálása* című PhD értekezésének téziseit megismertem, azokat a jelölt önálló kutatómunkával elért tudományos eredményeinek tekintem. A tézispontokban megfogalmazott eredményeket nem használtam, és nem is fogom felhasználni tudományos minősítés megszerzése céljából.

Szeged, 1999. december 16.

Név	Aláírás
Dr. Szatmári Sándor	.....
Dr. Simon Péter	.....
Dr. Almási Gábor	.....
Dr. Bakos József	.....
Dr. Földes István	.....
Dr. Veres Gábor	.....
Dr. Kocsis Gábor	.....
Dr. Kedves Miklós	.....
Bakonyi Zoltán	.....