

PhD értekezés tézisei

**Ultrarövid lézerimpulzusok optimális erősítése
KrF erősítőkbén**

Írta:

A l m á s i G á b o r

Pécsi Tudományegyetem

Fizikai Intézet

Kísérleti Fizika Tanszék

Pécs

2000.

I. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK, CÉLKITŰZÉSEK

Bevezetés

Az impulzus gázlézerek erősítők szerkezetükből adódóan igen alkalmasak rövid fényimpulzusok erősítésére. Különösen nagy jelentőségük van az aktív közegként excimer gázt használó erősítőknek, mivel ezek működési hullámhossza az ultraibolya tartományra esik, így a fotonok energiája nagyobb, mint a szilárdtest lézerek fotonjainak energiája, ami sok alkalmazás számára előnyös tulajdonság. Ezen kívül a rövid hullámhosszúkból adódóan fókuszálhatóságuk is lényegesen jobb. Az erősítő közegük gáz, amely az erősítőn való áthaladás során elszorított torzulásokat alacsonyabb szinten tartja, mint a folyadék, vagy szilárdtest lézerek esetén. Ezen előnyök mellett meg kell említeni az excimer erősítők legfontosabb hátrányát is, vagyis az aktív közeg moderált energiatárolási képességét, amely az ezeket a közegeket jellemző kicsi telítési energiának a következménye.

Jelen dolgozatban azokat az eredményeket gyűjtöm össze, amelyek az excimer erősítőkben alkalmazható, általunk kifejlesztett erősítési elrendezés, az úgynevezett off-axis erősítési séma alkalmazásával küszöbölik ki a KrF erősítők fenti hátrányát. A vizsgálatok eredményei általánosíthatók minden olyan közeget alkalmazó erősítőre, amelynek erősítési tulajdonságai hasonlítanak a KrF-ra, tehát a telítési energiájuk kicsi, viszonylag nagy kislépcsős erősítési tényezővel rendelkeznek, és létezik olyan gerjesztési eljárás, amellyel hosszú, keskeny térfogat gerjeszthető ki. Ilyenek lehetnek a festékerősítők, illetve több excimer gázfajta, így például az ArF. Megmutatom, hogy ez az erősítési elrendezés alkalmas arra, hogy nagy hatásfokú erősítést kapjunk a bemenő jelek egy széles tartományán úgy, hogy eközben a jel/zaj viszony a kislépcsős erősítés esetén nyerhető magas szinten maradjon. Az off-axis erősítési elrendezés elemzése során megmutatom, hogy az erősítők ki-be karakterisztikái (kimenő energia, vagy energiasűrűség a bemenő energia, vagy energiasűrűség függvényében) az off-axis elrendezésre általánosíthatók, és az elrendezés által alkalmazott off-axis szög szabad megválasztása alkalmas arra, hogy az

erősítőben létrejönnek az optimális erősítési feltételek a bemenő jelek egy igen széles tartományán.

Kísérletekkel igazolom, hogy az off-axis erősítő elrendezés felhasználható homogén nyalábeloszlások létrehozására, így a transzverzális intenzitás-eloszlások jelentősen megjavíthatók: az off-axis erősítési eljárás során az erősített nyaláb keresztirányú intenzitását a gerjesztett térfogat longitudinális homogenitása határozza meg, amely lényegesen jobb, mint a transzverzális irányú homogenitás. Interferometrikus mérésekkel igazolom, hogy az off-axis erősítés során keletkező dinamikus fázisfront torzulások csak a hullámhossz törtrészt érik el, így a nagy intenzitások elérése érdekében végzett fókuszálást az erősítés nem korlátozza jelentősen.

Célkitűzések

A dolgozat céljával tűzöm ki, hogy a Frantz-Nodvik elméleten alapuló modell segítségével elemezem a KrF erősítők működését, és ez alapján meghatározom azokat a körülményeket, amelyek lehetőséget adnak nagy hatásfokú, nagy jel/zaj viszonyal jellemezhető erősítés végrehajtására. A dolgozatban kiterjesztem a nemtelítődő veszteséggel és telítődő erősítéssel jellemezhető közegeket alkalmazó rövid impulzusú erősítők leírásának fogalomkörét. Az erősítő jellemzésére lokális és globális mennyiségeket vezetek be: a kisjelű erősítési tényező és energiakinyerési hatásfok mellett az effektív lokális erősítési tényező (vagy az ezzel hasonló jelentésű lokális kontraszt tényező) és a lokális stabilizációs tényező is bevezetésre kerül. Bemutatom, hogy az erősítési folyamatot egy-egy pontban jellemző lokális mennyiségekre alapozott globális mennyiségek (amelyek a lokális jellemzők erősítési út mentén végzett integrálása segítségével nyerhetők) hogyan használhatók fel egy vagy többátmenetes erősítési elrendezések adott célokra történő megtervezéséhez. Megmutatom, hogy a az off-axis erősítési elrendezésnek nevezett séma alkalmazása a KrF rövid impulzusú erősítők optimalizálására széles körben lehetőséget nyújt. Modellszámolások segítségével megmutatom, hogy az off-axis erősítő elrendezés a működési

körlymények megválasztásán kívül lehetőséget ad homogén nyalábprofilok kialakítására.

Különböző kísérési geometriával megvalósított erősítőcsövek esetén megmutatom, hogy a lézercsővek kismértékű módosításával az erősítők átalakíthatók úgy, hogy az off-axis erősítési elrendezés megvalósítható legyen. Különböző kíséréshosszú (45 cm és 85 cm) és keresztmetszetű erősítők esetén kísérletileg megvizsgálom egy és többutas off-axis sémák megvalósításával a fentebb vázolt optimalizációs eljárást. Nagy apertúrájú lézercső építésével demonstrálom, hogy az off-axis elrendezés alkalmas eszköz a KrF erősítők energiájának jelentős növelésére. Kísérleteket végzek annak érdekében, hogy megmutassam, az off-axis elrendezéssel közel diffrakciólimitált nyalábok állíthatók elő. Interferometrikus kísérletekkel megmutatom, hogy a többátmenetes erősítési eljárás során fellépő dinamikus erősítésváltozások nem okoznak kimutatható fázisfront torzulást.

Új tudományos eredmények

1. Modellszámolásokkal igazoltam, hogy az erősítési csatorna és az erősítendő nyaláb iránya közötti szög alkalmas megválasztásával az erősített nyaláb intenzitás-eloszlásában a kigerjesztett térfogat hosszának és keresztmetszetének arányától, illetve az alkalmazott szögtől függő méretű homogén intenzitású nyalábrész alakul ki. Különböző erősítőkön végzett mérésekkel igazoltam, hogy az off-axis erősítési elrendezés alkalmas homogén nyalábprofilok kialakítására. Megmutattam, hogy az off-axis erősítési eljárás alkalmas arra, hogy alkalmazásával a kigerjesztett térfogat méreteitől lényegében függetlenül a bemenő energia széles tartományán optimális erősítési feltételek jöjjenek létre.

2. Különböző hosszúságú erősítő modulokra végzett számítások segítségével részletesen elemeztem az erősítő hatásfok- és kontraszt viszonyait. Ennek során megállapítottam, hogy míg a különböző hosszúságú erősítők a bemenő energiasűrűség széles tartományán képesek nagy hatásfokú erősítésre, a jel/zaj viszonyt reprezentáló erősítési kontraszt érzékeny függvénye az erősítőhossznak. Megállapítottam, hogy ha az erősítési hossz-kisjelű erősítési tényező szorzat kisebb mint 2, akkor a kisjelű

erősítés tartományához közeli erősítés értékek (ebből következően magas jel/zaj viszonyok) mellett az elméleti hatásfok–maximumot megközelítő erősítés végezhető.

3. Továbbfejlesztettem a nemtelítődő erősítők leírásának elméletét, bevezetve a lokális erősítési kontraszt tényező fogalmát, amelynek erősítési út menti integrálja az erősítés jel/zaj viszonyát adja. Ezen mennyiségen alapuló számolások segítségével megmutattam, hogy a hagyományos elrendezéseknél akár három nagysággal jobb kontraszt is elérhető off-axis erősítési eljárást használva. A lokális kontraszt tényező definíciójában szereplő effektív erősítési tényező lehetőséget ad arra, hogy a nemtelítődő veszteséget tartalmazó, de az erősítést tekintve hamar telítődő rendszereket egyszerűbb formalizmussal írjuk le.

4. Kísérletileg és elméletileg megvizsgáltam a KrF erősítők stabilizációs tulajdonságait. A lokális erősítési kontraszthoz hasonlóan bevezettem a lokális stabilizációs tényezőt. Ennek segítségével megmutattam, hogy a nyalábon lévő modulációk csökkentésének leghatékonyabb módja, ha az erősítési folyamat során a nyaláb energiasűrűségét a telítési energiasűrűség környékén tartjuk. Megmutattam, hogy az erősítő stabilizációs hatása optimális, ha az energiasűrűséget az erősítés során a telítési energiasűrűség kétszerese körüli értéken tartjuk. Az így talált optimum lehetőséget ad arra, hogy a hatásfok és kontraszt mellett az erősítő stabilizáló hatását is egyszerre optimalizáljuk a megfelelően választott off-axis elrendezés segítségével.

5. Különböző módon táguló nyalábokra (szférikus, cilindrikus illetve paralel) végzett számolásokkal, illetve mérésekkel igazoltam, hogy az UV preionizált, kisüléssel pumpált KrF erősítők esetében már $10 \mu\text{J}$ bemenő energia esetén a pillanatnyilag tárolt energiával összemérhető kimenő energiájú erősítő építhető egy háromátmenetes optimalizált off-axis elrendezés segítségével. Ezen optimalizálást a nemtelítődő erősítés differenciálegyenletének numerikus megoldásai segítségével nyerhető nomogramok teszik lehetővé, amelyek az on-axis erősítők ki-be karakterisztikájának off-axis erősítőkre való általánosításaként foghatók fel.

6. Sagnac–interferométert használva kísérletileg igazoltam, hogy a kereskedelmi forgalomban kapható kisüléssel pumpált KrF erősítőkben tengelymenti erősítést használva a maximális dinamikus hullámfront torzulás mértéke $\lambda/3$ hélium puffergáz alkalmazó rendszerekben, míg $2\lambda/3$ neon puffergáz használata esetén. Ez azt jelenti, hogy a kisüléssel pumpált rendszereken áthaladó nyaláb igen közel diffrakciólimitált

lehet. Ilyen mérésekkel igazoltam, hogy az off-axis elrendezés esetében nem detektálhatók a tengelymenti elrendezésnél tapasztalható mértékű torzítások azonos kimenő energia esetében.

7. Az erősítés közben fellépő dinamikus torzulások mértékének kísérleti vizsgálatával igazoltam, hogy a torzulás mértéke arányos a nyaláb által látott kontraszt tényezővel, így az off-axis erősítési elrendezést úgy tekinthetjük, mint amely egyszerre optimalizálja az erősítést a határfokot, kontrasztot és a fellépő dinamikus torzításokat egy adott erősítési hosszra. Ezen mérések igazolják, hogy ez az erősítési elrendezés nem limitálja az interferometrikus multiplexelésű rendszerek résznyalábjai rekombinálásának pontosságát.

8. Különböző kereskedelmi forgalomban fellelhető erősítőket alakítottam át, alkalmassá téve ezeket az off-axis erősítési elrendezés használatára. Kísérletileg is vizsgáltam a Lambda Physik EMG 501, 200, 150-es modelljeit egy- és kétátmenetes erősítési elrendezésekben, valamint szegmentált elektródájú elrendezésben.

9. Háromutas, 20 mJ kimenő energiát szolgáltató off-axis elrendezésű erősítőn kísérletileg igazoltam, hogy a diffrakciólimitált bemenő nyaláb fókuszálhatóságát az erősítő nem befolyásolja. A 30 mm-es oldalélű kimenő nyaláb 6 μm méretű folttra volt fókuszálható, amely közel van az elméleti limithez. Megmutattam, hogy kereskedelmi forgalomban található eszközök segítségével létrehozható olyan egy erősítőmodulból álló elrendezés, amely néhány tíz mJ energiatartományban képes 1010 intenzitáskontrasztú erősítést végezni.

10. Nagy elektródaszeparációjú erősítő építésében vettem részt, ahol UV preionizáció segítségével 70 mm elektródaszeparációjú eszközt építettünk, amely szubnanoszekundumos jitterrel szinkronizálható a KrF előerősítő fokozathoz.

AZ ÉRTEKEZÉS ALAPJÁUL SZOLGÁLÓ KÖZLEMÉNYEK, ELŐADÁSOK

1. Szatmári, G. Almási, P. Simon:
Off-axis amplification scheme for short-pulse amplifiers.
Appl. Phys. B 53, 82-87 (1991)
2. Almási, S. Szatmári, P. Simon:
Optimized operation of short-pulse KrF amplifiers by off-axis amplification.
Opt. Commun. 88, 231-239 (1992)
3. Almási, S. Szatmári:
Optimization of multiple-pass off-axis KrF amplifiers.
Appl. Phys. B 60, 565-570 (1995)
4. Szatmári, G. Almási, F.P. Schäfer, P. Simon, G. Kovács, B. Nikolaus:
Current status and prospect of high-brightness UV-lasers using advanced KrF-amplifier technology.
UPS '93 VIII-th International Symposium on Ultrafast Processes in Spectroscopy, Vilnius, Lithuania 1993 (invited paper)
5. Ross, G. Almási, S. Szatmári:
Dynamic optical distortions in a KrF discharge amplifier
Opt. Quant. Electron. 27, 1053-1059 (1995)
6. Szatmári, G. Almási, M. Feuerhake, P. Simon:
High Brightness Excimer Lasers
IXth International Symposium on "Ultrafast Processes in Spectroscopy" UPS'95, Trieste, Italy (invited paper) Technical Digest TuC2
7. Szatmári, G. Almási, M. Feuerhake, P. Simon:
Production of intensities of $\sim 10^{19}$ W/cm² by a table-top KrF laser.
Appl. Phys. B 63, 463-466 (1996)
8. Szatmári, G. Almási, G. Kovács:
Large gap separation KrF laser amplifier.
Special Meeting on Ultrashort Pulse Excimer Lasers and Their Applications, 1995, Streatley-on-Thames (invited paper) in: Proceedings p. 5.25
9. Simon, S. Szatmári, G. Almási, M. Feuerhake:
Some aspects of KrF beams propagation through optical systems.
Special Meeting on Ultrashort Pulse Excimer Lasers and Their Applications, 1995, Streatley-on-Thames (invited paper) in: Proceedings p. 5.43
10. 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)

TÁRSSZERZŐI NYILATKOZAT

Alulírott nyilatkozom, hogy a Jelölt téziseit ismerem, a tézisekben foglalt tudományos eredményeket tudományos fokozat megszerzéséhez nem használtam fel, s tudomásul veszem, hogy azokat ilyen célból a jövőben sem használhatom fel.

Szeged, 2000. május 10.

Dr. Kovács Gábor
egyetemi doktor

Nagy Tamás

Dr. Simon Péter
a fizikai tudomány kandidátusa

Prof. Dr. Szatmári Sándor
a fizikai tudomány doktora