PhD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Femtoszekundumos optikai elrendezések modellezése

Kozma Ida Zsuzsanna

TÉMAVEZETŐ:
DR. HEBLING JÁNOS
A FIZIKAI TUDOMÁNY KANDIDÁTUSA

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM
KÍSÉRLETI FIZIKA TANSZÉK

PÉCS
2002

I. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK, CÉLKITŰZÉSEK

Az ultragyors lézer technológia és spektroszkópia femtoszekundumos lézerek impulzusait alkalmazza anyagi vizsgálatoknál. A rövid impulzushossznak köszönhetően a nagyon gyorsan lejátszódó folyamatok is nyomonkövethetővé válnak. Az impuzusok azonban az optikai rendszereken való áthaladás során jelentős időbeli torzulást szenvedhetnek az optikai elemek anyagi, illetve szögdiszperziójának következtében. Femtoszekundumos optikai rendszerek tervezésekor a legfontosabb szempont olyan elrendezések létrehozása, amelyek az ultrarövid impulzusokat úgy juttatják el a mintához, hogy közben azok eredeti hossza nem növekszik meg jelentősen.

A tervezéshez szükség van olyan hatékony számolási módszerekre, amelyek az impulzusok terjedését megbízhatóan modellezik. A valós sugárvezetésen alapuló numerikus eredmények a geometriai optika érvényességi határán belül pontos információt adnak a leképezés térbeli tulajdonságairól. Nagy időbeli felbontású méréseket megvalósító rendszerek esetén azonban szükséges meghatározni azt, hogy az impulzus spektrális komponensei egymásmáshoz képest mekkora késést szenvednek, amíg elérnek a mintához. Számos dolgozat tárgyalja a femtoszekundumos impulzusok optikai rendszerekben való terjedését a hullámoptikai elmélet alapján. Ezek a probléma hullámoptikai leírásán alapuló szimulációk azonban minden esetben megerősítették a fázisfront torzulására vonatkozó korábbi, geometriai optikai számoláson alapuló eredményeket. Gyakorlati problémák megoldása során a hullámoptikai megközelítés hátránya az, hogy bonyolult numerikus számolások elvégzését kívánja meg. Azontúl, számos egyszerűsítésre és közelítésre van szükség ahhoz, hogy a modellek egyszerűségét és a gyakorlati problémák megoldásához való alkalmazhatóságát megőrizzék. Ezért továbbra is fontosak maradnak azok a törekvések, amelyek a femtoszekundumos impulzusok terjedését sugárkövetésen alapuló egyszerű és gyors módszerekkel próbálják megbízhatóan leírni.

Munkám során célul tűztem ki dinamikus rácsok ultargyors gerjesztésére alkalmas elrendezés modellezését és optimalizálását sugárkövetéses módszerrel. A számolásaim GaP-ban impulzív módon gerjesztett Raman-szórás méréséhez kapcsolódtak, amivel az atomrács gerjesztettségének időbeli változását lehet nyomon követni.

Az irodalomban eddig tisztázatlan volt az a kérdés, hogy az ultrarövid impulzusokkal keltett tranziens rácsok pumpálási elrendezései közül melyik a kedvezőbb. Ezzel kapcsolatban elvégeztem modellező számolásaim alapján három, ugyanazon az elven alapuló, ám eltérő leképezést megvalósító rendszer összehasonlító vizsgálatát.

Célul tűztem ki hangolható terahertzes impulzusok keltésére és detektálására alkalmas optikai rendszer modellezését annak meghatározására, hogy a lehetséges optikai leképező rendszerek közül melyik a legmegfelelőbb a kívánt szögdiszperzió leképezésére a nemlineáris anyagba.

A szögdiszperzióval rendelkező rendszerekre vonatkozó vizsgálataim rámutattak egy mások által nem tárgyalt problémára. Amennyiben a szögdiszperzióval rendelkező optikai rendszer leképezése nem mentes képalkotási hibáktól, nem ad megbízható eredményt az irodalomban használt módszer a csoportkésés meghatározására a geometriai úthossz alapján. További célul tûztem ki egy olyan eljárás kidolgozását, amely leképezési hibával rendelkező rendszerek esetén a geometriai úthossz alapján lehetővé teszi a csoportkésés meghatározását.

II. A VIZSGÁLATOK MÓDSZEREI

A modellező számolásaimat a Stellar Software cég Beam4 nevű optikai tervezőprogramjával végeztem. A pumpa-próba típusú elrendezéseket alkotó optikai elemek felületeit definiálva, majd a sugársokaságokat átvezetve a tárgytérből a képsíkba, meghatároztam a pumpa- és a próbaimpulzusok foltjainak pozícióját. A leképezések időbeli tulajdonságainak jellemzésére meghatároztam a különböző hullámhosszú sugarak által megtett optikai út hosszát a különböző optikai közegekben és ebből kiszámoltam a csoportkésést, így nyerve információt arról, hogy a rendszerből kilépő impulzusfront milyen torzulást szenved. A sugárkövetéses analízisen alapuló módszert alkalmazva, az impulzusfronttorzulás jellemzésére a relatív csoportkésést határoztam meg egy véges félértékszélességű impulzus két szélső spektrális összetevőjénél a nyaláb keresztmetszetének különböző pontján a képsíkban. Az optimalizálás során az optikai elemeket az optimális helyzetükből elmozgatva szisztematikusan megvizsgáltam azt, hogy az elrendezések mennyire érzékenyek a beállítási hibákra.

A csoportkésés számolására általam kifejlesztett korekkciós eljárás helyességét úgy igazoltam, hogy szögdiszperzióval rendelkező rendszerek modellezését elvégezve azok eredményeit összevetettem a kísérleti adatokkal.

Az ultrarövid terahertzes impulzusok hatékony sebességillesztett keltésével kapcsolatos kísérleti munkám során rövid impulzusú Ti:zafír regeneratív erősítő rendszer impulzusait használtam a gerjesztésre. A sebességillesztéshez szükséges impulzfront dőlést egy reflexiós rácson való diffrakció hozta létre. Az impulzusokat különböző optikai elrendezések képezték le az elektrooptikai kristályba. A pumpa-próba típusú méréseknél gyors szkennelésű mechanikus

késleltető egységet és nagysebességű számítógépes egységet használtam, a terahertzes sugárzás kristályon kívül való detektálásakor pedig héliumhűtésű szilícium bolométert.

III. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. *Dinamikus rácsok ultragyors gerjesztésére alkalmas elrendezés modellezését és optimalizálását végeztem el sugárkövetésen alapuló számolásokkal* [1].

   Egy holografikus rácsnak reflexiós objektívvel történő leképezésével nagy időfelbontású méréseket lehetővé tevő dinamikus rácsot lehet gerjeszteni femtoszekundumos impulzusokkal. Impulzív módon gerjesztett Raman spektroszkópiai mérések demonstrálták, hogy az elrendezés alkalmas nagy és változtatható rácsállandójú dinamikus rács gerjesztésére femtoszekundumos időfelbontás mellett. A kísérleti összeállítás modellezése során azt találtam, hogy az elrendezés 25 fs-nál rövidebb impulzusok használatát engedi meg az időbeli felbontás jelentős romlása nélkül. A kísérletek során kapott eredmények megerősítették modellező számolásaim eredményeit.

2. *Számolásaim alapján elvégeztem ultrarövid impulzusokkal gerjesztett tranziens rácsok pumpálási elrendezéseinek összehasonlító vizsgálatát* [2].

   Dinamikus rácsot létrehozó optikai eljárások különböző módon állítják elő és irányítják az interferáló nyalábokat a mintára. A vizsgálat többek között választ adott arra, hogy az irodalomban ultragyors folyamatok pumpa-próba mérésére alkalmazott pumpálási elrendezések időbeli felbontásának mik a határai, milyen a nyalábok térbeli átfedésének minősége, valamint arra, hogy a beállítási hibákra való érzékenység hogyan befolyásolja az elrendezések használhatóságát, különös tekintettel a nagy és változtatható rácsállandójú dinamikus rácsok keltésére.

   Rámutattam, hogy az 1:1-től eltérő mértékű leképezést megvalósító teleszkópikus rendszer esetén a legjobb időbeli felbontást biztosító lencsetávolságot csak sugárkövetésen alapuló modellszámolásokkal lehet megtalálni.

   Megmutattam, hogy a mikroszkóp objektívet tartalmazó rendszernél az időbeli felbontás és a leképező rendszer asztigmatizmusa között szoros kapcsolat áll fenn.

3. *Kidolgoztam egy olyan eljárást, amely lehetővé teszi leképezési hibával rendelkező rendszerek esetén is a csoportkésés meghatározását a geometriai úthossz alapján. Ez a geometriai optikán alapuló módszer megbízható és hatékony eszköz a femtoszekundumos impulzusokat alkalmazó optikai rendszerek térbeli és*

időbeli tulajdonságainak vizsgálatához. A korrekció szükségességét terahertzes sugárzás keltésére és detektálására alkalmas optikai elrendezések modellezésével demonstráltam [3].

Egy impulzus spektrális komponenseinek csoportkésését az általuk megtett geometriai úthosszból lehet meghatározni. A csoportkésés számolására általánosan használt képlet csak az aberrációmentes optikai rendszerekre érvényes. Amennyiben a rendszer leképezése nem mentes képalkotási hibáktól, korrigálni kell a sugárkövetésen alapuló számolásokból származó úthosszakat. Megmutattam, hogy bizonyos rendszerek esetén, mint amilyen például a nagy szögdiszpeziójú, döntött impulzusfrontú ultrarövid fénynyalábot alkalmazó gerjesztési elrendezés, ennek a korrekciónak az elhagyása komoly hibákat okoz.

4. *A számolásaim alapján elvégeztem hangolható terahertzes impulzusok keltésére és detektálására alkalmas optikai rendszerek elemzését. Ezzel hozzájárultam annak kísérleti demonstrálásához, hogy a döntött impulzusfrontú gerjesztésen alapuló elrendezéssel változtatható frekvenciájú terahertzes síkhullám állítható elő* [4].

   Döntött impulzusfrontú ultrarövid fénynyalábot alkalmazó gerjesztési elrendezésekkel fonon polaritonok sebesség-illesztett impulzív gerjesztését valósítottuk meg. Az impulzusfront dőlését a fénynyaláb reflexiós rácson való diffrakciójával lehet kiváltani, ám a kívánt szögdiszperzió leképezését a nemlineáris anyagba többféleképpen lehet megvalósítani. Eltérő optikai elemeket tartalmazó leképező rendszerek modellezését és optimalizálását végeztem el többféle nemlineáris kristályra. Ezen számolások alapján összeállított kísérleti elrendezésekkel terahertzes sugárzást állítottunk elő és detektáltunk GaP, $LiNbO_3$ és $LiTaO_3$ kristályokban.

IV. AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSI LEHETŐSÉGEI

Mivel tudományos eredményeim döntő többsége ultrarövid impulzusokat alkalmazó optikai rendszerek modellezésével és optimalizálásával kapcsolatos, így azok elsődleges hasznosítási lehetősége a szimulációk eredményeinek kísérleti munkában való felhasználása. Íly módon az 1. és a 4. tézispont már hasznosult, hiszen számolásaimhoz kapcsolódva épültek meg azon optikai rendszerek, amelyekkel eredményes kísérleti munka folyt egyrészt fonon-polariton dinamika vizsgálatára, másrészt terahertzes impulzusok keltésére.

A 3. tézispontban összefoglalt kutatási eredményem, amely a geometriai optikán alapuló modellezési eljárásnak a kiterjesztése szögdiszperzióval rendelkező rendszerekre, minden olyan optikai elrendezés elemzése során használható lesz, amely szögdiszpeziót létrehozó optikai elemeket tartalmaz. Ez az ultrarövid impulzusokat alkalmazó optikai elrendezések jelentős részét felöleli (rácsokat, prizmákat tartalmazó elrendezések).

A 2. tézispont eredményei egyértelmű választ adnak arra a kérdésre, hogy az irodalomban használt dinamikus rácsokat létrehozó pumpálási elrendezések milyen időbeli felbontást tesznek lehetővé, valamint az egyes elrendezések alkalmazásának korlátait elemzik. Ezeket az eredményeket azon kutatásoknál lehet alkalmazni, amelyek nagy időfelbontású nemlineáris optikai méréseket diffraktív optikai megközelítéssel valósítják meg.

A tézisekben megfogalmazott tudományos eredményeim döntő többsége a *Pécsi Tudományegyetem Kísérleti Fizika Tanszékén*, a kísérleti eredmények a *Max-Panck-Institut für Festkörperforschung* laboratóriumaiban születtek.

V. AZ ÉRTEKEZÉS ALAPJÁT KÉPEZŐ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

1. J. Hebling, **I. Z. Kozma**, J. Kuhl:
   A compact high-aperture optical setup for excitation of dynamic gratings by ultrashort light pulses
   J. Opt. Soc. Am. B **17**, 1803-1805 (2000)

2. **I. Z. Kozma**, J. Hebling:
   Comparative analysis of optical setups for excitation of dynamic gratings by ultrashort light pulses
   Opt. Commun. **199**, 407-415 (2001)

3. **I. Z. Kozma**, G. Almási, J. Hebling:
   Geometrical optical modeling of femtosecond setups having angular dispersion
   Appl. Phys. B (2002) közlésre elfogadva

4. J. Hebling, G. Almási, **I. Z. Kozma**, J. Kuhl:
   Velocity matching by pulse front tilting for large-area THz-pulse generation
   Opt. Express **10**, 1161-1166 (2002)

A tézisekhez kapcsolódó fontosabb konferencia előadások

5. G. Almási, J. Hebling, **I. Z. Kozma**, J. Kuhl:
   Generation and modeling of tunable THz radiation by femtosecond tilted-pulse-front excitation
   19th Congress ICO, Optics for the Quality of Life, Florence, Italy, August 25-30, 2002, **261**

6. J. Hebling, G. Almási, **I. Z. Kozma**, J. Kuhl:
   Generation of tunable THz radiation by femtosecond tilted-pulse-front excitation
   QELS 2002, Long Beach, California, USA, May 19-24, 2002, **QTuD1**

7. J. Hebling, G. Almási, **I. Z. Kozma**, J. Kuhl:
   Generation of tunable THz radiation by femtosecond tilted-pulse-front excitation
   13th International Conference on Ultrafast Phenomena, Vancouver, Canada, May 12–17, 2002, **ME3**

8. **I. Z. Kozma**, J. Hebling, J. Kuhl:
   Comparative analysis of optical setups for excitation of dynamic gratings by ultrashort light pulses
   Diffractive Optics 2001, Budapest, October 9-11, 2001, **P23**
   EOS Topical Meeting Digest Series **30**, 108-109 (2001)

9. J. Hebling, **I. Z. Kozma**, J. Kuhl:
   Diffraction grating-reflecting microscope objective set-up for excitation of dynamic grating by ultrashort light pulses
   CLEO 2000, San Francisco, California, USA, May 7-12, 2000, **CMK3**

További publikációk

10. G. Tomassetti, A. Ritucci, S. V. Kukhlevsky, J. Kaiser, L. Palladino, L. Reale, F. Flora, L. Mezi, **I. Z. Kozma**, T. Limongi, O. Samek, M. Liska.:
    Intense XUV emission generated by a capillary discharge based apparatus
    Czech J. Phys. **52**, 405-416 (2002)

11. S. V. Kukhlevsky, A. Ritucci, **I. Z. Kozma**, J. Kaiser, G. Tomassetti, A. Reale, O. Samek:
    Atomic model calculations of gain in the 46.9 nm transition of Ne-like Ar
    Contr. Plasma Phys. **42**, 109-118 (2002)

12. S.V. Kukhlevsky, J. Kaiser, A. Ritucci, G. Tomassetti, A. Reale, L. Palladino, **I. Z. Kozma**, F. Flora, L. Mezi, O. Samek, M. Liska:
    Study of plasma evolution in argon-filled capillary Z-pinch devoted to x-ray production
    Plasma Source Sci. Technology **10**, 567-572 (2001)

13. S. V. Kukhlevsky, F. Flora, A. Marinai, G. Nyitray, **Z. Kozma**, A. Ritucci, L. Palladino, A. Reale, G. Tomassetti:
    Wave-optics treatment of x-rays passing through tapered capillaries
    Selected Research Papers on Kumakhov Optics and Application of 1998-2000, M.A. Kumakhov, Ed., SPIE-Russia-Chapter, Vol. **4155**, 61-71 (2000)

14. S. V. Kukhlevsky, F. Flora, A. Marinai, G. Nyitray, **Z. Kozma**, A. Ritucci, L. Palladino, A. Reale, G. Tomassetti:
    Wave-optics treatment of x-rays passing through tapered capillary guides
    X-Ray Spectr. 29, 354-359 (2000)

15. S. V. Kukhlevsky, J. Kaiser, G. Tomassetti, A. Ritucci, A. Reale, L. Palladino, F. Flora, L. Mezi, **I. Z. Kozma**:
    Effect of transverse electrical fields on X-ray amplification in a capillary-discharge Z-pinch
    Soft X-Ray Lasers and Applications IV, Ernst E. Fill, Jorge J. Rocca, eds.
    Proceedings of SPIE Vol. **4505**, 47-53 (2001)

16. S. V. Kukhlevsky, **I. Z. Kozma**, F. Flora, A. Marinai, L. Palladino, A. Reale, G. Tomassetti, A. Ritucci:
    Diffraction of x-rays in capilary optics
    Proceeedings of SPIE Vol. **3766**, p. 418-426 (1999)