

B4133

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI



GAUSS-FÉNYNYALÁBOK ALKALMAZÁSA
FEMTOSZEKUNDUMOS LÉZEREK TERVEZÉSÉBEN
ÉS KERESZTPOLARIZÁCIÓS JELENSÉGEK
VIZSGÁLATÁBAN

KŐHÁZI-KIS AMBRUS

KECSKEMÉTI FŐISKOLA, GAMF KAR
MATEMATIKA ÉS FIZIKA TANSZÉK
2005

I. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK, CÉLKITŰZÉSEK

Értekezésem három fő részre bontható. Az első részben ultrarövid fényimpulzusok reflexióját vizsgálom (A). A második részben Kerr-lencsével módusszinkronizált Ti:zafir lézerek rezonátorainak tervezésével foglalkozom (B). A harmadik részben pedig fókuszált fénynyalábok polarizációs jelenségeit vizsgálom a fénynyalábok valós, háromdimenziós modellje segítségével (C).

- (A) Napjainkban a lézerfizika egyik fontos irányzatának célja ultrarövid fényimpulzusok előállítása. A lézerek rezonátorában, az erősítőkben, vagy más femtoszekundumos fényimpulzusokat előállító, vagy felhasználó berendezésekben a femtoszekundumos fényimpulzusok megfelelő terelése, visszaverése kritikus pontja a rendszerek megfelelő viselkedésének. A fényvisszaverő eszköz reflexiójának megfelelően széles spektrális sávban közel százszázalékosnak és a reflexió csoportkésleltetésének megfelelően egyenletesnek és rezonanciáktól mentesnek kell lennie.

Az 1993-ban felfedezett fázismodulált dielektrikumtükörök e kívánalmaknak megfelelő jellemzőket ígértek. Szipőcs Róbert kollégámmal (a fázismodulált tükrök szabadalmának egyik tulajdonosával) a fázismodulált dielektrikumtükörök működési alapelveinek tisztázásán dolgoztunk. Munkám célja a fázismodulált dielektrikum tükrök és az időbeli hologramok működési elvei között mutatkozó kapcsolat tisztázása volt. Célul tűztem ki továbbá a femtoszekundumos fényimpulzusok reflektálására alkalmas hologramok előállítását.

- (B) A femtoszekundumos lézerimpulzusok egyik legfontosabb forrásai a longitudinálisan pumpált Kerr-lencsével módusszinkronizált Ti:zafír lézerek. Az ilyen lézerek pumpálására Argon-ion, vagy a rezonátorán belül másodharmonikus-keltett Nd:YAG lézereket alkalmaznak. A pumpáló lézer beszerzési és működtetési költségei jelentősen korlátozzák ezen lézerek alkalmazási körét.

Célul tűztem ki a longitudinálisan pumpált Kerr-lencsével módusszinkronizált Ti:zafír lézerek működésének tanulmányozását, rezonátorainak modellezését, hogy a minél valósághűbb modell segítségével számítógépes programot írjak, amivel a lehető leghatékonyabb pumpálással és legerősebb módus-szinkronizáló hatással bíró rezonátorokat tervezzek.

- (C) Optikai adatrögzítésben, mikromegmunkálásban és a mikroszkópiában is fontos szerepet játszhatnak a fókuszált fénynyaláb polarizációs tulajdonságai. A fénynyalábok leírására széles körben használt a longitudinális elektromos, illetve mágneses teret elhanyagoló kétdimenziós (2D) közelítés. A longitudinális elektromágneses teret is figyelembe vevő háromdimenziós (3D) leírás általában csupán kicsiny, a legtöbb esetben elhanyagolható járulékokat eredményez. Minél erősebben fókuszált egy fénynyaláb a 2D modellből nem, de a 3D modellből következő polarizációs effektusok, az úgynevezett keresztpolarizációs jelenségek annál jelentősebb szerepet játszanak a fénynyaláb viselkedésének leírásában.

A szakirodalomban a fénynyalábok 3D leírása bár ismert, de a keresztpolarizációs jelenségek vizsgálata még koránt sem lezárt terület.

Célul tűztem ki a fókuszált fénynyalábok polarizációs tulajdonságainak 3D vizsgálatát, keresztpolarizációs jelenségek megfigyelését.

II. ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

Kutatási céljaim elérése érdekében elméleti és kísérleti módszereket is alkalmaztam.

Dolgozatom mind a három részében központi szerepet játszanak az alapl módusú Gauss-fénynyalábok. A Gauss-fénynyalábok terjedésének paraxiális közelítésének, illetve az elhajlási jelenségek Fresnel-Kirchoff integrál közelítésének számolása során főszerepet kapott az úgynevezett Siegman-lemma, ami komplex másodfokú polinom kitevőjű exponenciális függvénynek a valós száme gyenesen számolt integrálját adja meg:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-at^2 - 2bt) dt = \sqrt{\frac{\pi}{a}} \exp\left(\frac{b^2}{a}\right)$$

Az integrál akkor rendelkezik véges értékkel, ha a valós része pozitív: $\text{Re}(a) > 0$.

A fázismodulált fényimpulzusok interferenciájának leírásában is egyszerű, könnyen kiértékelhető, átlátható eredményeket kaptam a fényimpulzusok időbeli alakjának Gauss-eloszlású közelítése segítségével. A Gauss-eloszlás közelítést alkalmaztam femtoszekundumos fényimpulzusok térbeli és időbeli eloszlásának modellezésére femtoszekundumos fényimpulzusok szög spektrális felbontásának leírásához, és a fényimpulzusok spektrálisan bontott holográfiája modellezéséhez.

A Ti:zafír lézerkristály erősítésének telítődése tanulmányozására a lézerkristály energiaszintjeinek betöltöttségét megadó egyenleteket alkalmaztam.

A Kerr-lencsével módus-szinkronizált Ti:zafir lézerek modellezése során felhasználtam azt, hogy e lézerek kívánatos üzeme során azokban közel alaplómódusú Gauss-fénynyalábok alakulnak ki. A fénynyalábnak a lézerrezonátorban oda-vissza történő terjedésének leírására az általánosított ABCD mátrixoptikát alkalmaztam. Az asztigmatikusan kompenzált rezonátorok asztigmatikus optikai elemeinek és a lézerkristályban általában asztigmatikus fénynyaláb Kerr-lencse hatását is a meridionális és a szaggitális síkokban eltérő ABCD mátrixokkal vettem figyelembe. A termikus lencse hatásának és az erősítés fénytérelő (gain-guiding) hatásának leírásában is alkalmaztam a fénynyalábok paraxiális közelítését.

A lézerrezonátorok elméleti modellje alapján számítógépes programot írtam Pascal, majd C++ programozási nyelven. A Kerr-lencse hatás, az erősítés és a pumpáló fénynyaláb gyengülésének a kialakult fénynyaláb jellemzőitől való függése a lézerben kialakuló fénynyaláb paramétereinek fokozatos közelítéssel történő meghatározását követelte meg. A lézerrezonátor jellemzőinek optimalizálását Nelder-Mead lokális optimumot kereső algoritmusnak véletlen kezdőpontból indított - így már globális - módszerével végeztem.

A megtervezett lézereket a budapesti Szilárdtestfizikai Kutatóintézetének (SZFKI) Lézeralkalmazások Osztályának laboratóriumaiban építettem meg. A Ti:zafir lézert Spectra-Physics gyártmányú Ar:ion lézerrel pumpáltam. A lézerrezonátor előzetes beállítását a pumpáló és a lézerkristályban keltett fluoreszcencia fény segítségével oldottam meg. A rezonátor beállítását a lézerműködési küszöbjének csökkentése révén javítottam. Végül a már üzemi pumpálás mellett működő lézert a kimenő teljesítményre, a szép módusképre és a stabil módusszinkronizálásra optimalizáltam.

A fókuszált fénynyalábok keresztpolarizációs jelenségeinek elméleti vizsgálatához is alapmódusú Gauss-fénynyalábokból indultam ki. A megjósolt keresztpolarizációs jelenség kísérleti demonstrációja során egy He-Ne lézer fényét alkalmaztam. A fénynyalábok foltalakját CCD kamera (DVT Co.) segítségével rögzítettem.

III. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. A femtoszekundumos technikában széleskörűen alkalmazott fázismodulált dielektrikumtűkrök Fourier-szintézise [T1] és az ultrarövid fényimpulzusok időhologramjának működési elve közötti kapcsolatot vizsgáltam. A fázismodulált lézertűkrök viselkedése megértésének és Fourier-transzformáción alapuló tervezésének alapjául szolgáló analógiának analitikus modellel történő megalapozását adtam. [T2].

2. Térbeli és időbeli Gauss-eloszlással leírható fényimpulzusok spektrálisan bontott interferenciajelenségét vizsgáltam. A modellből kapható egyszerű képleteket spektrális hologramok kísérleti megvalósításának tervezésére alkalmaztam [P1].

3. Longitudinálisan pumpált Ti:zafír lézerkristály erősítésének telítődését vizsgáltam. Megmutattam, hogy a szakirodalomban megszokottól eltérően az erősítés telítődésének számolásakor a pumpáló nyaláb telítődést okozó hatását is figyelembe kell venni:

$$g = N \sigma_L \frac{p}{1 + s + p},$$

ahol g a telített erősítési tényező, N a Ti ionok koncentrációja, σ_L a

fényerősítés hatáskeresztmetszete, továbbá s és p a gerjesztett és a pumpáló fény intenzitásának a megfelelő telítődési fényintenzitásokhoz viszonyított relatív intenzitáserőssége [P2].

4. Kerr-lencsével módusszinkronizált femtoszekundumos Ti:zafir lézerek rezonátorainak elméleti modelljét adtam meg, amiben a Kerr-lencse hatás mellett figyelembe vettem az erősítés telítődő hatását, a fényerősítés fényterelő hatását, a termikus lencse képződését, a lézerkristály melegegése következtében bekövetkező erősítéscsökkenést is. A modell segítségével számítógépes programot írtam, amellyel Kerr-lencsével módusszinkronizált lézerrezonátorokat terveztem. Alacsony pumpálási küszöbű [P4], nagy kimenőteljesítményű [P2] lézereket terveztem, majd építettem meg. A megtervezett, megépített lézerek segítségével új típusú femtoszekundumos fényforrást állítottunk elő, amely szinkronizált, de eltérő spektrumú fényimpulzusokat állít elő [T3,T4,P3].

5. Kimutattam, hogy a keresztpolarizációs jelenségek a fókuszált fénynyalábok törése és visszaverődése során akkor jelennek meg, ha a reflexiós vagy a transzmissziós tényező értéke függ a beeső fény polarizációs állapotától. Megmutattam, hogy az alaplómodusú Gauss-nyalábokkal keltett keresztpolarizációs nyalábok elsőrendű Hermite-Gauss-fénynyalábok [T5].

6. Izotróp dielektrikum felületére Brewster-szög alatt beeső, a beesési síkban polarizált alaplómodusú Gauss-fénynyaláb reflektált fénynyalábjában megfigyelhető keresztpolarizációs jelenség kvalitatív és kvantitatív leírását adtam. A visszavert fénynyalábnak az elméleti modell által jóslott viselkedésének kísérleti demonstrációját adtam. Radiálisan poláros fénysugarak új, kísérletileg nagyon egyszerű előállítási módjára tettem javaslatot. [T5]

IV. AZ ÉRTEKEZÉS ALAPJÁT KÉPEZŐ KÖZLEMÉNYEK

Nemzetközi referált folyóiratban megjelent:

- T1. R. Szipőcs, A. Kőházi-Kis:
Design of dielectric high reflectors for dispersion control in femtosecond lasers
Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 2253 (1994) pp. 140-149
- T2. R. Szipőcs, A. Kőházi-Kis:
Theory and design of chirped dielectric laser mirrors
Appl. Phys. B 65 (1997) pp. 115-135
- T3. R. Szipőcs, E. Finger, A. Euteneuer, M. Hofmann, A. Kőházi-Kis:
Multicolor, mode-locked Ti:sapphire laser with zero pulse jitter
Laser Physics 10 (2000) pp. 454-457
- T4. R. Szipőcs, A. Kőházi-Kis, P. Apai, E. Finger, A. Euteneuer, M. Hofmann:
Spectral filtering of femtosecond laser pulses by interference filters
Appl. Phys. B 70 (2000) pp. S63-S66
- T5. A. Kőházi-Kis:
Cross-polarization effects of light beams at interfaces of isotropic media
Opt. Comm. (közlésre benyújtva)

Nemzetközi szakmai konferenciákon megjelent:

- P1. M.B. Danailov, A.P. Kovács, K. Diomande, A. Kőházi-Kis, P. Apai, R. Szipőcs:

High efficiency phase conjugation of broadband laser pulses in BaTiO₃

Conference on lasers and electro-optics and laser science conference – CLEO/QELS-97, Baltimore, Maryland, USA, CTuP16 (1997).

- P2. A. Kőházi-Kis, P. Apai, S. Lakó, R. Szipőcs:

Modeling the saturated gain in Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire lasers

Ultrafast Optics 1999 Ascona, Switzerland, P10 (1999).

- P3. R. Szipőcs, A. Kőházi-Kis, P. Apai, E. Finger, A. Euteneuer, M. Hofmann,:

Spectral filtering of femtosecond laser pulses by interference filters

Ultrafast Optics 1999 Ascona, Switzerland, P12 (1999).

- P4. B. Császár, A. Kőházi-Kis, R. Szipőcs:

Low-reflection loss ion-beam sputtered negative dispersion mirrors with MCGTI structure for low pump threshold, compact femtosecond lasers

Advanced Solid-State Photonics Conference, Vienna, Austria, WB17 (2005).