

**LÉZERIMPULZUSOK FÁZISMODULÁCIÓJA
KÉTUTAS FREKVENCIAKÉTSZEREZÉSÉNél,
VALAMINT REZONÁNS KÖZEGBEN VALÓ
TERJEDÉSÉNél**

Írta:

FÜLÖP JÓZSEF ANDRÁS



Szegedi Tudományegyetem

Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Szeged, 2003

I. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK, CÉLKITŰZÉSEK

A lézerek kifejlesztésével szinte egyidőben megindult az impulzusüzemű lézerek fejlesztése is. Az impulzusüzemű lézerekkel kapcsolatos, illetve ilyen lézereket alkalmazó kutatások mára rendkívül szerteágazó, önálló tudományágakká váltak, amelyek jelentőségét, hatását más tudományterületekre nehéz lenne túlbecsülni. A módusszinkronizált szilárdtest-lézerek kifejlesztésével lehetővé vált néhány femtoszekundum időtartamú impulzusok rutinszerű előállítása. A lézerek fejlesztésének másik, a rövid lézerimpulzusok előállításától nem független, fontos iránya a minél szélesebb frekvenciatartományon hangolható, monokromatikus fényű lézerek konstruálása.

A rövid impulzusokat előállító, illetve a hangolható lézerek elsősorban a spektrum látható tartományának hosszúhullámú részén, valamint a közeli infravörösben sugároznak. Az alkalmazások egyre bővülő köre számára döntő fontosságú más, rövidebb hullámhosszú tartományok elérhetősége is. Frekvenciakonverzióra különböző nemlineáris optikai folyamatok használhatók; ezek közül az egyik leggyakrabban alkalmazott a nemlineáris kristályokban létrehozott frekvenciakétszerezés. Rövid impulzusok frekvenciakétszerezésénél a legfontosabb gyakorlati kritérium, hogy a felharmonikus impulzus időtartama jó közelítéssel megegyezzen a kiindulási impulzusével. Ennek szükséges feltétele az impulzus teljes spektrumát átfogó, elegendően széles konverziós tartomány. A sáv szélesség — amely döntő a hangolható lézerek frekvenciakétszerezésénél is — fordítva arányos a nemlineáris kristály hosszával, míg a konverziós hatások egyenesen arányos annak négyzetével. A sáv szélességre kirótt kritérium tehát korlátozza a kristályhosszat, és ezen keresztül drasztikusan csökkenti az elérhető hatásfokot.

A másodharmonikus hatásfokának növelésére mind monokromatikus, mind impulzusüzemű lézerek esetében elterjedt technika a rezonátoron belüli frekvenciakétszerezés. A rezonátorból kicsatolható felharmonikus teljesítmény tipikusan öt-tízszere a rezonátor nélküli teljesítménynek. A módszer komoly hátránya, hogy a konverziós hatások rendkívül érzékeny a rezonátor beállítására: a rezonátor hosszát a hullámhossz tört részének megfelelő pontossággal kell beállítani. A frekvenciakétszerezés hatásfokának rezonátor használata nélküli megnövelésére alkalmas monokromatikus lézereknél a kétutas frekvenciakétszerezés. Ennek az elrendezésnek alapvető előnye a rezonátoros módszerrel szemben az, hogy a komponensek beállítása nem kíván interferometrikus pontosságot; az elemek több milliméterrel is eltolhatók anélkül, hogy a konverziós hatások számottevően megváltozna. Az egyszerű kétutas módszer szélessávú (hangolható vagy rövid impulzusú) lézerek frekvenciakétszerezésére azonban nem alkalmas,

mert a kristály sávszélességét lényegesen leszűkíti.

A szélessávú frekvenciakétszerezés hatékonyságát növelő elrendezések másik csoportja — a rezonátoron belüli frekvenciakétszerezés mellett — a diszperzió kompenzálásának elvén alapul, amellyel a kristály frekvenciakétszerezési sávszélessége növelhető meg. Ez vastagabb kristály használatát teszi lehetővé, így növelve a konverziós hatásfokot. Az alap- és felharmonikus közötti relatív fáziseltolódás kompenzálásával elérhető, hogy a frekvenciakétszerezési sávszélesség átfogja egy rövid impulzus teljes spektrumát. Ezen túlmenően az elrendezésnek az alapharmonikus impulzus időtartamát is meg kell őriznie.

Jelen értekezés egyik célja egy új diszperziókompenzált frekvenciakétszerezési elrendezés vizsgálata, amely egyaránt alkalmas femtoszekundumos impulzusok, illetve széles sávban hangolható monokromatikus lézerek megnövelt hatékonyságú frekvenciakétszerezésére. Az általam javasolt elrendezés a kétutas frekvenciakétszerezési séma megfelelő diszperzív elemmel való kibővítésén alapul.

A femtoszekundumos impulzusokkal kapcsolatos legalapvetőbb folyamatok közé tartozik atomokkal való rezonáns kölcsönhatásuk, amelynek során az impulzusoknál meglehetősen komplex amplitúdó- és fázisszerkezet alakulhat ki. A rezonáns impulzusformálás — amelyet mind a kísérleti, mind a elméleti téren sokat tanulmányoztak — függ többek között a rezonáns atomok sűrűségétől, energiaszintjeinek populációjától, valamint az impulzusok intenzitásától és kiindulási fázisszerkezetétől is. A kísérleti vizsgálatok sokáig elsősorban spektrális és intenzitás-korrelációs mérésekre korlátozódtak. Ezek a mérési módszerek azonban nem adnak közvetlen felvilágosítást az impulzusok térerősségéről. Az amplitúdó- és a fázisszerkezet ismerete elengedhetetlen viszont a kísérlet és elmélet közötti közvetlen összehasonlításhoz. Az utóbbi évtizedben a femtoszekundumos mérés technikában végbement hatalmas fejlődésnek köszönhetően ma már rutinszerűen elvégezhető ultrarövid impulzusok szerkezetének amplitúdóra és fázisra egyaránt kiterjedő, nagy pontosságú mérése. Erre alkalmas módszer például a FROG (*Frequency Resolved Optical Gating*).

Dolgozatom másik célja femtoszekundumos lézerimpulzusok rezonáns atomi közeggel való kölcsönhatásának vizsgálata az impulzusok térerősségének FROG technikán alapuló mérésével. A térerősség mérését a kölcsönhatás utáni impulzusok mellett kiterjesztettem a bemenő impulzusokra is, ami lehetővé tette a kezdeti fázismoduláció hatásának tanulmányozását a rezonáns impulzusformálásra.

II. A VIZSGÁLATOKNÁL HASZNÁLT ESZKÖZÖK, MÓDSZEREK

A prizmás kompresszor fázistolásának elméleti meghatározásánál a Martinez által bevezetett formalizmust használtam, amely jelentősen egyszerűsítette a számolásokat. A frekvenciakétszerezés leírására az ún. állandó alapharmonikus térerősség közelítést alkalmaztam. A numerikus számításokat saját készítésű programmal végeztem.

A rezonáns közegeben való impulzusterjedés vizsgálatához alacsony impulzus-intenzitásnál egy Vitesse típusú femtoszekundumos oszcillátort (Coherent Inc.) használtunk, amely 803 nm központi hullámhosszú, 32 nm spektrális szélességű, 96 fs időtartamú impulzusokat adott. A mérések egy részénél az impulzusok spektrális fázisát másodrendben egy prizmás kompresszorral kompenzáltuk. Ezzel az impulzusok időtartama 38 fs-ra csökkent. Az egyik méréssorozatnál egy Mira típusú hangolható femtoszekundumos oszcillátort (Coherent Inc.) használtunk; az impulzusok központi hullámhossza 793 nm, spektrális szélessége 24 nm volt. A nagy intenzitású impulzusokkal végzett mérésekhez egy Odin típusú többutas Ti:zafir erősítő (Quantronix Corp.) impulzusait használtuk; az erősítőt egy frekvenciakétszerezett Nd:YLF lézer pumpálta 527 nm-en (Quantronix Corp.). Az intenzitás négy nagyságrendet átfogó változtatásához egy három lehetséges cellapozíciót megengedő egyszerű elrendezést építettem.

A FROG mérésekhez egy 100 μm vastagságú BBO kristály felhasználásával háttérmentes másodharmonikus intenzitás-autokorrelátort építettem. A mérések vezérlését saját fejlesztésű programmal számítógép segítségével végeztük. A program irányította többek között a spektrométer kiolvasását illetve az autokorrelátor késleltetésének beállítását egy Owis léptetőmotor segítségével. Az autokorrelátor jelének felbontásához egy Bestec POC4M típusú rácson spektrométert használtunk. A mért FROG képek alapján az impulzusok térerősségének rekonstruálását a Femtosoft Technologies fázisrekonstrukciós programjával végeztük.

A lineáris lézer-atom kölcsönhatás tartományában a diszperzió klasszikus elméletét (elektron oszcillátor elmélet) alkalmaztuk, nagyobb lézer-intenzitásoknál a Maxwell–Bloch-egyenleteket (szemiklasszikus elmélet) numerikusan oldottuk meg.

III. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Megvizsgáltam a diszperzív elemmel bővített kétutas frekvenciakétszerezési elrendezést a szélessávú frekvenciakétszerezésre való alkalmazhatóság szempontjából [1,4]. Megmutattam, hogy tökéletes diszperzió-kompenzáció esetén — amikor a diszperzív elem relatív fázistolása kompenzálja a nemlineáris kristályét annak teljes frekvenciakétszerezési tartományán — a kétutas elrendezés sávszélessége kétszerese a diszperzív elem nélküli kétutas elrendezésének, és megegyezik az egyutas frekvenciakétszerezés sávszélességével. A diszperziókompenzált kétutas hatások négyszerese az egyutas frekvenciakétszerezési hatásoknak.

2. Numerikus számítások segítségével megmutattam, hogy a kétutas frekvenciakétszerezési elrendezésben prizmapárt alkalmazva diszperzív elemként az egyutas frekvenciakétszerezéshez képest négyszeres konverziós hatások érhető el az egyutas sávszélesség megtartása mellett. Ezért a prizmapárral bővített elrendezés alkalmas monokromatikus, hangolható lézernyél szélessávú, megnövelt hatékonyságú frekvenciakétszerezésére [3].

A számítások szerint a kétutas elrendezésben a nemlineáris kristály ΔkL relatív fázistolása elsőrendben kompenzálható ~ 70 nm egyutas sávszélességig a prizmapár segítségével. Az elsőrendű kompenzációra a prizmapár szögdiszperzióján alapuló magyarázatot adtam [3]. A kétutas elrendezés sávszélessége ~ 30 nm-nél kisebb egyutas sávszélességekre annak legalább 90%-át éli. A kétutas sávszélesség ~ 30 nm egyutas sávszélesség felett tapasztalt számottevő csökkenését a prizmapár másodrendű relatív fázistolására vezetem vissza, amely nem tesz eleget a kompenzációs feltételnek.

3. Numerikus számítások segítségével megmutattam, hogy a prizmapárral bővített kétutas elrendezés alkalmas femtoszekundumos impulzusok négyszeres hatékonyságú frekvenciakétszerezésére [1]. Megvizsgáltam az alkalmazhatóság határait az impulzusok időtartamának és intenzitásának tekintetében [3].

A számítások szerint ~ 40 fs-nál hosszabb alapharmonikus impulzusoknál nem lép fel lényeges felharmonikus időbeli kiszélesedés. Ennél rövidebb bemenő impulzusok esetében a prizmapár másodrendű relatív diszperziójára visszavezethető konverziós sávszélesség-csökkenés a felharmonikus impulzusok 20%-nál nagyobb időbeli kiszélesedéséhez vezet. Az elrendezés használhatóságát magasabb impulzus-intenzitásoknál a nemlineáris fázis megjelenése korlátozza. A módszer lehetséges alkalmazása femtoszekundumos oszcillátorok impulzusainak frekvenciakétszerezése.

4. A FROG technika alkalmazásával kísérleti úton meghatároztam a rezonáns rubídiumgőzzel kölcsönható femtoszekundumos impulzusok időbeli amplitúdó- és fázisszerkezetét különböző szerkezetű és intenzitású kiindulási impulzusok esetén [2]. A térerősség-méréseket kiterjesztettem a kölcsönhatás előtti impulzusokra is, ami alapvető fontosságúnak bizonyult a rezonáns kölcsönhatás kiindulási impulzusszerkezetétől való függésének vizsgálatánál.

5. A bemenő és a kölcsönhatás utáni impulzusok térerősségének mérésével közvetlen kísérleti úton kimutattam a rezonáns kölcsönhatás függését a kiindulási impulzusszerkezettől. Megmutattam, hogy a rezonáns impulzusformálás pontos modellezéséhez a bemenő lézimpulzusok szerkezetének amplitúdóra és fázisra egyaránt kiterjedő részletes ismeretere van szükség. A rezonáns atomi rendszer impulzusformálását csak az impulzusok mért kezdeti térerősségéből kiinduló számítások képesek kielégítően reprodukálni úgy a lineáris, mint a nemlineáris kölcsönhatás tartományában.

A lineáris kölcsönhatás tartományában a főimpulzust követő néhány impulzushossznyi időtartományban a bemenő impulzus fázismodulációja nagymértékben befolyásolja a rezonáns impulzusformálást. Ezzel szemben hosszabb időskálán az impulzusformálást lényegében egyedül a rezonáns atomi rendszer fázistolása határozza meg, az impulzusok különböző kiindulási fázismodulációja csupán kismértékű eltéréshez vezet [2].

IV. AZ ÉRTEKEZÉS ALAPJÁT KÉPEZŐ KÖZLEMÉNYEK

Nemzetközi referált folyóiratokban megjelent cikkek:

1. J. A. Fülöp, A. P. Kovács and Zs. Bor:
Dispersion-Compensated Two-Pass Arrangement for Second Harmonic Generation of Femtosecond Pulses
Laser Physics **10** (2000) 437
2. R. Netz, T. Feurer and J. A. Fülöp:
Influence of phase modulation on the reshaping of ultrashort laser pulses in resonant three-level systems
Phys. Rev. A **64** (2001) 043808
3. József A. Fülöp, Attila P. Kovács and Zsolt Bor:
Broadband dispersion-compensated two-pass second harmonic generation of femtosecond pulses
Opt. Commun. **188** (2001) 365

Nemzetközi konferenciákon bemutatott publikációk:

4. J. A. Fülöp, A. P. Kovács and Z. Bor:
Two-pass Second Harmonic Generation of Ultrashort Pulses
SPIE **3573** (1998) 59
5. J. A. Fülöp, A. P. Kovács and Z. Bor:
Two-pass Second Harmonic Generation of Ultrashort Laser Pulses
5th Congress on Modern Optics, 1998, Budapest, Hungary
6. J. A. Fülöp, A. P. Kovács and Z. Bor:
Improved Two-pass Second Harmonic Generation of Femtosecond Pulses
8th International Laser Physics Workshop, 1999, Budapest, Hungary

V. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ TOVÁBBI PUBLIKÁCIÓK

7. Fülöp J. A.:
Rövid impulzusok kétutas frekvenciakétszerezése
XXIV. Országos Tudományos Diákköri Konferencia, 1999, Debrecen
8. R. Netz, T. Feurer and J. A. Fülöp:
Influence of phase modulation on the reshaping of ultrashort laser pulses in resonant three-level systems
Annual Report, 2001, Institut für Optik und Quantenelektronik, Friedrich-Schiller-Universität Jena