

A TEWATI LÉZERRENDSZER ÉS ELSŐ ALKALMAZÁSAI

Osvay Károly

a fizikai tudomány kandidátusa, egyetemi docens
osvay@physx.u-szeged.hu

Kovács Attila

PhD, egyetemi adjunktus
SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Kurdi Gábor

PhD, tudományos munkatárs
MTA Lézerfizikai Tanszéki
Kutatócsoport

Bor Zsolt

az MTA rendes tagja, egyetemi tanár
SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék,
MTA Lézerfizikai Tanszéki Kutatócsoport, Szeged

A minket körülvevő reális világ fizikai, biológiai és kémiai elemi folyamatainak nagy része femto-, illetve attoszekundumos (10^{-15} - 10^{-18} s) időskálán játszódik le. Az elektronikus tudományos-technikai eszközök feloldó-képessége ettől több nagyságrenddel elmarad. A lézertechnikában az utóbbi évtizedben bekövetkezett nagy fejlődés eredményeképpen azonban ma már előállíthatók olyan lézerimpulzusok, melyek segítségével az elemi jelenségek kísérleti vizsgálata lehetségessé válik.

Az esetek jó részében a megfelelő vizsgálathoz nem elegendő a lézerezscillátor által kibocsátott nJ nagyságrendű energia. Sőt, igazán izgalmas kísérletekhez, alapvető felfedezésekhez nem elegendő 6-9 nagyságrenddel megnövelnünk a felhasználandó ultrarövid lézerimpulzus energiáját, hanem gondoskodnunk kell a nyaláb céltárgyra juttatásáról és a lehető legkisebb területre való torzulásmentes fókuszálásáról.

Az ultrarövid lézerimpulzusok alapkutatósi felhasználása tehát alapvetően két területre osztható: egyrészt az elemi folyamatok időbontott (jelenleg szub-fs skálájú) vizsgálata mellett például lézeres hűtés és alkalmazásai (például Bose-Einstein-kondenzátum stb.) hajthatók végre, másrészt oly mértékű fóku-

szált intenzitás állítható elő (10^{15} - 10^{21} W/cm²), mellyel egy sor rendkívül érdekes jelenség – az attoszekundumos impulzusok előállításától kezdve a relativisztikus fény-plazma kölcsönhatásokon keresztül a lézerindukált nukleáris reakciókig – idézhető elő.

A kezdetben festék- és gázlézerek kutatásával foglalkozó szegedi lézeres csoport érdeklődése az ultrarövid festék- és excimer lézerimpulzusok keltése, nemlineáris optikája és alkalmazásai felé fordult. E hagyományokon alapulva dolgozatunk első szerzője vezetésével a 90-es évek végén megterveztünk, s az új évezred első éveiben felépítettünk egy *terawatt* csúcsteljesítményű *ttán-zafir* lézerrendszert, a *TeWaTi*-t. A lézerrendszer által kibocsátott 25 fs (25×10^{-15} s) időtartamú, terawatt (10^{12} W) csúcsteljesítményű lézerimpulzusok fókuszált intenzitása megközelíti a 10^{17} W/cm² értéket, időbeli tisztasága (kontrasztja) meghaladja a 10^7 szintet. A közép-kelet-európai régióban elsőként az SZTE Optika Tanszékén megépített TeWaTi lézerrel lehetőség nyílik nagy intenzitású lézer-anyag kölcsönhatás elemi folyamatainak (nemlineáris optika, lézergenerált plazma, elektrongyorsítás stb.) nagy időfelbontású kísérleti vizsgálatára. A lézerrendszer nemcsak Magyarországon, a régióban is egyedülálló

berendezés.

A dolgozatban először az ultrarövid lézerimpulzusok néhány sajátosságát ismertetjük, majd bemutatjuk a lézerrendszert a főbb paramétereivel együtt. Ismertetjük az elmúlt néhány évben elért kiemelkedő tudományos eredményeinket.¹ A dolgozat végén a TeWa-Ti laborban hazai együttműködésekkel elért eredményeinkről is röviden szót ejtünk.

Ultrarövid lézerimpulzusok tulajdonságai

Mindenekelőtt az ultrarövid (lézer)impulzusok néhány fontos sajátosságát említjük meg. A monokromatikus elektromágneses hullámok közegbeli terjedésének Maxwell-egyenleteken alapuló leírása a mai egyetemi törzsanyag része. Egy lézerimpulzus azonban hullámcsomagként fogható fel, azaz a Fourier-tétel szerint időben minél rövidebb, annál nagyobb a sávszélessége. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy például egy 20 fs időbeli félértékisélességű, 800 nm központi frekvenciájú lézerimpulzus spektrális félértékisélessége 50 nm, míg a „lábtól lábíg” való kiterjedése kb. 730-870 nm között van. Ez a 140 nm-nyi sávszélesség az emberi szem spektrális érzékenységének – amely átlagosan 400-750 nm között enged szín- és fényérzékelést – 40%-a! A nagy sávszélesség miatt az optikai elemek diszperziós tulajdonságai olyannyira nem hanyagolhatóak el, hogy például az említett 20 fs-os impulzust a levegő közismerten igen kicsiny diszperziója is 12 m-es terjedés után duplájára, azaz 40 fs-ra nyújtja meg. A nagy sávszélesség további következménye, hogy ultrarövid (tipikusan 10 fs és rövidebb) impulzusok esetén az elektrodinamikában általánosan használt, lassan változó burkoló közelítés nem vagy csak megszorításokkal érvényes.

Az időbeli rövidség, illetve a megnyúlás

¹ Az eredményeinkről megjelent összes tudományos közlemény listája, valamint a TeWaTi-val kapcsolatos egyéb tudnivalók a <http://titan.physx.u-szeged.hu/~tewati/> honlapunkon tekinthetők meg.

az impulzus átlagteljesítménye, azaz az impulzus energiája és időbeli félértékisélességének hányadosa szempontjából igen lényeges. Az impulzusokkal besugárzott anyagok, tárgyak ugyanis elsősorban ezt az átlagteljesítményt érzékelik, amely – az időbeli rövidség miatt – rendkívül nagy lehet. Például egy 20 fs-os, mindössze 20 mJ energiájú lézerimpulzus átlagteljesítménye 10^{12} W (azaz 1 TW), ami körülbelül megegyezik az USA áramtermelési teljesítményével.

A nagy átlagteljesítmény még az átlátszónak tűnő optikai anyagokban, például a lézerrendszer optikáiban, erősítő közegeiben is nemlineáris effektusokat (önfázis-moduláció, önfokuszálódás stb.) kelt, melyek nemcsak az adott elem roncsolódásához vezethetnek, hanem a lézernyaláb oly mértékű idő- és térbeli nemkívánatos torzulásait is okozhatják, amelyek a további felhasználást is lehetetlenné teszik. Ezt elkerülendő találták ki az úgynevezett fázismodulált lézerimpulzus-erősítési technikát (CPA – chirped pulse amplification). Ennek lényege, hogy az erősítendő impulzus időbeli hosszát egy erre alkalmas eszközzel, nemritkán több tízezerszeres mértékben megnyújtják, így az átlagteljesítmény még az erősítések után is jóval a kritikus szint alatt marad. Természetesen, az erősítő után az impulzust egy ún. kompresszorral össze kell nyomni, lehetőleg az eredeti hosszára. Ez a művelet viszont már rendszerint a célkamrával egybekötött vákuumrendszerben történik.

A TeWaTi lézerrendszer

A lézerrendszer (1. ábra és 1. táblázat) 800 nm központi hullámhosszú, 60 nm sávszélességű magimpulzusait egy Ti-zafir oszcillátor hozza létre. A 16 fs hosszú lézerimpulzusokat a CPA technikának megfelelően 250 ps-ra nyújtjuk. A nemkollineáris optikai parametrikus erősítésen (NOPA) alapuló első erősítő fokozatot egy Nd-YAG lézerrel 10 Hz ismétlési frekvencián pumpáljuk, így

két átmenetben a jel 5×10^4 -szeres erősítését érjük el. Ezt követően az impulzusokat egy, az Nd-YAG lézer energiájának nagyobb részével pumpált Ti-zafir kristályban, nyolc átmenetben erősítjük fel 40 mJ-ra. Ezen erősítő telítésben van, amely biztosítja a kijövő impulzusok lövésről lövésre való energetikai stabilitását. A megerősített impulzusokat egy optikai rácsokból álló kompresszorral időben összenyomjuk, melyek hossza így 25 fs lesz, az energiája pedig közel 30 mJ marad.

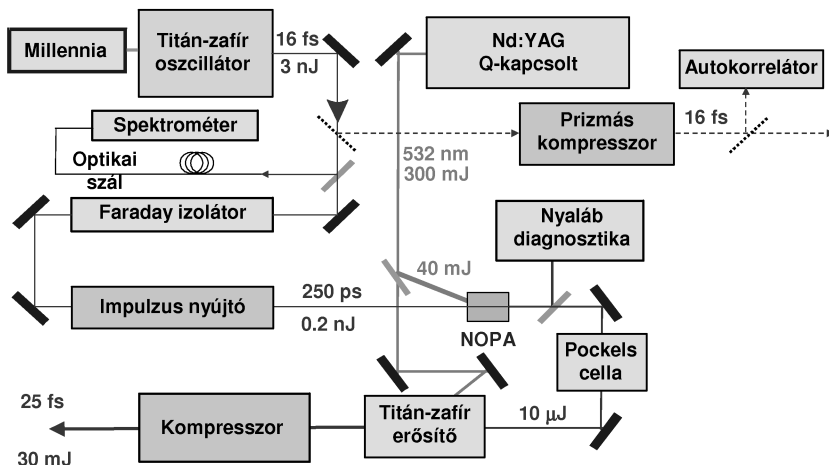
A lézerrendszer egyik újdonsága, hogy az előerősítést nem hagyományos Ti-zafir alapú regeneratív vagy többátmenetes (multi-pass) erősítőben hajtjuk végre, hanem egy optikai parametrikus erősítőben. Általánosan parametrikus pumpálásról vagy erősítési folyamatról akkor beszélünk, ha egy rezgésre képes rendszer valamely paraméterét a rezgés frekvenciájával moduláljuk. Egyszerű példa erre a mechanika területéről a hinta. Ha a hintázó személy megfelelő frekvenciával változtatja a súlypontjának helyzetét, a hinta lengésbe jön. A lengő mozgás a „semmiből” (zajból) parametrikus módon erősödik ki. Megfelelő anyagi közegbe (ún. nemlineáris kristályba) belépő két, különböző frekvenciájú elektromágneses hullám hatására

Hullámhossz	Impulzus jellemzők
800 nm	3 nJ, 16 fs, 72 MHz 30 mJ, 25 fs, 10 Hz
532 nm	380 mJ, 10 ns, 10 Hz 350 mJ, 3 ns, 10 Hz
400 nm	1 mJ, 25 fs, 10 Hz
266 nm	150 mJ, 10 ns, 10 Hz 140 mJ, 3 ns, 10 Hz

1. táblázat

az anyagban a nemlineáris polarizáció a két jel frekvenciájának különbségével modulálódik. Ennek hatására a zajból a különbségi frekvenciával rezgő hullám erősödik ki, optikai parametrikus erősítés figyelhető meg. Az optikai parametrikus erősítés során tehát az erősítő kristály mintegy „katalizátorként” szolgál, ami a pumpáló lézerfény energiáját azonnali módon (intrinsic) átadja az erősítendő impulzusnak (plusz egy új hullám, az ún. idler impulzus is keletkezik).

A NOPA elrendezésnek több közvetlen előnye van. Egyrészt az igen széles sávú (220 nm) erősítési spektrum alakja négyzetögléhez közelít, így az erősítés folytán a spektrális beszűkülés (GN – gain narrowing) gyakorlatilag nem lép fel, az impulzusok sávszéles-



1. ábra • A lézerrendszer sematikus felépítése

sége így közel 60 nm marad. Összehasonlítással: hagyományos erősítési mód alkalmazása esetén a GN effektus a sáv szélességet 40–45 nm-re korlátozza. Továbbá, mivel a pumpa energiájának csak elhanyagolható része nyelődik el a kristályban, gyakorlatilag megszűnik az amúgy jól ismert, termális okokra visszavezethető nyalábtorzulás, ezért jobb a nyalábminőség. Az erősített impulzus időbeli kontrasztja is jelentősen javul, mert nincsenek előimpulzusok, és ráadásul az erősített spontán emisszió helyett fellépő parametrikus szuperfluoreszcencia szintje is alacsonyabb. Az elrendezés további technikai és anyagi vonzatokat sem nélkülöző előnye, hogy e módon – a hagyományos eljárásokkal szemben – egyetlen pumpáló Nd-YAG lézer elegendő a TW teljesítmény eléréséhez.

Femtoszekundumos impulzusok közvetlen erősítése a közeli UV tartományban

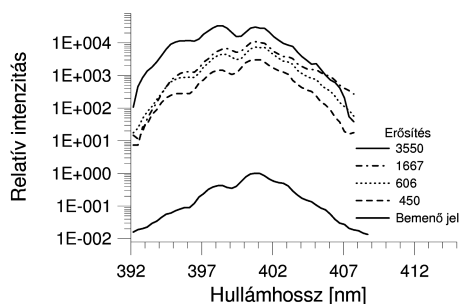
Ultrarövid (100 fs-nál rövidebb) lézerimpulzusok előállítása és erősítése főleg az 550–900 nm hullámhossztartományban történik. Ennél rövidebb hullámhosszak másodharmonikus és/vagy összegfrekvenciaképzéssel érhetők el. A felharmonikusok kristályok anyagi diszperziója limitálja az adott sáv szélesség (ezáltal impulzusidő) eléréséhez használható maximális kölcsönhatási hosszt, ami behatárolja egyben az elérhető energiát is. Születtek ugyan különleges technikák ezen határok kitolása érdekében, de mindeddig nem terjedtek el széleskörűen. A probléma egy másik lehetséges megoldása az lehet, ha a nagy sáv szélességet megtartva, de a fentiek miatt szükségképpen energiaszegény UV impulzusokat optikai úton megerősítjük.

Az ultraibolya tartományban működő nagy teljesítményű erősítők az ún. *excimer* technológiára épülnek. Ezeknek – rengeteg előnyük mellett – ultrarövid lézerimpulzusok erősítése szempontjából két komoly hátrányuk is van: i) keskeny a spektrális sáv szélességük, amit

tovább csökkent az erősítés beszűkülése, így 150–220 fs-nál rövidebb impulzusok excimerekben nem erősíthetőek, és ii) jelentős az erősített spontán emisszió, ezért nagy időbeli kontraszt csak nehezen érhető el.

A fentiekben jelzett NOPA eljárással kapcsolatos kutatásaink kapcsán önkéntelenül is adódott az ötlet, hogy az ultraibolya tartományra fejlesszünk ki hasonló eljárást. Az elvégzett kísérletünkben a 800 nm-es, 1,6 ps-ra „túlkompenzált”, azaz negatív csoportsebesség-diszperzióval nyújtott fundamentális impulzusok kis részéből szélessávú frekvenciaképzés segítségével állítottuk elő az erősítendő 400 nm-es impulzusokat. A 800 nm-es impulzusok energiájának túlnyomó részéből kis sáv szélességű frekvencia-háromszorozás, valamint egy további prizmas nyújtó segítségével hoztuk létre a 3,5 ps hosszú, 250 mJ energiájú, 267 nm hullámhosszú pumpáló lézerimpulzusokat.

A fenti módon létrehozott impulzusok egy 12 mm hosszú BBO nemkollineáris optikai parametrikus erősítő kristályban léptek kölcsönhatásba; a világon először sikerült demonstrálnunk 400 nm-es impulzusok szélessávú (talptól talpig 17 nm), nagy mértékű (több mint 3500-szoros) közvetlen erősítést (2. ábra). Kimutattuk továbbá, hogy a pumpáló impulzus energiájának „kiürítésével” további sáv szélesítés, végső



2. ábra • A NOPA eljárással erősített femtoszekundumos UV impulzusok spektruma az erősítés paraméterével

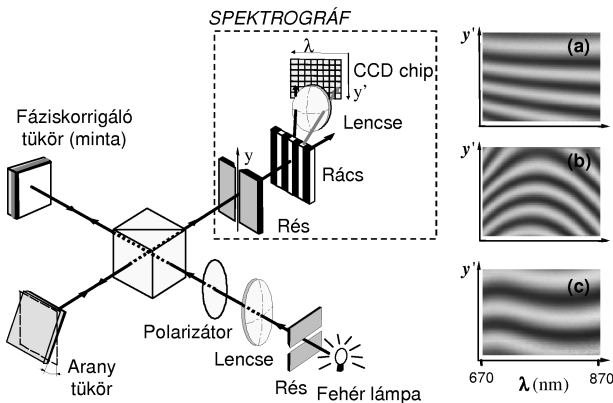
sonon az erősített impulzus időtartamának csökkentése érhető el.

Spektrálisan bontott interferometria

A TeWaTi lézerrendszerben használt optikai elemek (fáziskonigáló tükrök, kristályok), illetve a teljes rendszer fázisdiszperziójának nagy pontosságú mérésére spektrális interferometrián alapuló módszereket fejlesztettünk ki. E technika lényege, hogy a diszperzív mintát tartalmazó interferométert széles spektrumú fényforrással világítjuk meg, és a kialakuló interferenciacsíkokat spektrográffal bontjuk. Így egy mérésből, széles hullámhossztartományon, nagy spektrális felbontás mellett meghatározható az optikai elem fázisdiszperziója. A mérési elrendezés és a spektrálisan bontott interferogramok kiértékelése a vizsgált minta típusától függ. A továbbiakban a fáziskonigáló tükrökre kidolgozott módszerünket ismertetjük részletesebben.

A vizsgálandó tükröt egy Michelson-interferométer egyik karjában helyezzük el, míg a másik karba egy elhanyagolható diszperziójú, ezüst vagy arany bevonatú tükröt teszünk referenciaként (3. ábra). Az interferométert fehér lámpával világítjuk meg, melynek fényét egy nyalábosztó két részre osztja. Az egyik fénynyaláb a fáziskonigáló tükrőről,

míg a másik a referenciatükörről való visszaverődés után éri el ismét a nyalábosztót. A két nyaláb között frekvenciafüggő fáziskülönbség lép fel, mivel a fáziskonigáló tükrő a róla visszaverődő fény különböző színű (hullámhosszú) komponenseinek fázisát megváltoztatja. A referenciatükört kicsiny szöggel megdöntve a fehér fényt alkotó minden egyes komponens a hullámhosszal arányos periódusú, vízszintes interferenciacsík-rendszert hoz létre az interferométer kimenetén. A csíkok éppen annyival tolnak el egymáshoz képest, mint amekkora a tükrő fázistolása. Mivel az interferométer kimenetén a különböző színű csíkrendszerek átfednek, így közvetlenül nem lehet meghatározni a tükrő diszperzióját. Ha viszont az interferométer után egy spektrográft helyezünk el, akkor a spektrális komponensek egymás mellett hozzák létre a csíkokat, azaz a spektrálisan bontott interferenciacsíkok menete egyben megadja a fáziskonigáló tükrő fázisfüggvényének menetét. Ily módon pusztán vizuális megfigyeléssel a tükrők fázisdiszperziója kvalitatívan vizsgálható. Ha a spektrográf kimenetére egy CCD csipet helyezünk, lehetővé válik a csíkrendszer számítógépes kiértékelése, ami igen nagy pontosságú mérést tesz lehetővé.



3. ábra • A spektrálisan bontott interferometriai eljárás alapelve

A teljes lézerrendszer diszperziójának vizsgálatánál a Ti-zafir oszcillátor impulzusait használjuk, melyek spektruma szintén széles. A fehér lámpával összehasonlítva nagyobb a fényintenzitásuk, jobb a koherencia-tulajdonságuk, így az interferenciacsíkok láthatósága, kiértékelhetősége is sokkal jobb.

A spektrális interferometriával lézerimpulzusok szögdiszperziója is meghatározható, de eredményesen használták már fémgőzök anomális diszperziójának, oldatok törésmutatójának mérésére is. A levegő diszperziója, mint tudjuk, nem túl nagy mértékű, de e technikával jól mérhető. Egy igen modern eljárásban, az optikai koherens tomográfiában is alkalmazzák e több mint százéves múltú módszert.

További alkalmazások

Ahogy a bevezetőben említettük és a továbbiakban megmutattuk, a lézerrendszer és a laboratórium által szolgáltatott lézerimpulzusok központi hullámhossza és időbeli impulzushossza egyaránt rendkívül széles tartományba esik. Ennek következtében az elvelt

viszonylag rövid idő alatt is gyümölcsöző tudományos együttműködés alakult ki mind „házon belül” az anyagtudományi kutatókkal és a fotoakusztikus csoporttal (lásd e cikk-gyűjtemény további írásait), mind pedig a BME Atomfizikai Tanszékével, az SzFKI néhány részlegével és az SzBK Biofizikai Intézetével. Közös projektejünk vannak az LOA (Párizs), LLC (Lund), LP3 (Marseille), MBI (Berlin) és RAL CLF (Anglia) külföldi kutatóintézetekkel is. Talán említenünk sem kell, hogy a labor és a TeWaTi lézer nyitva áll az eszközparkkal végrehajtható minden egyéb tudományos célú alkalmazás előtt is!

A fentiekben leírt tudományos kutatásokat OTKA (T33018, T47078, TS40759) támogatással hajtottuk végre, a lézerrendszer egyes elemeit OTKA (M36843), OM (MU266/2001) és GVOP (3.2.1-2004-04-0114/3.0) műszerpályázatok segítségével szereztük be, illetve újítottuk fel.

Kulcsszavak: femtoszekundumos (ultrarövid) lézerimpulzus, nagy intenzitású lézer, nemlineáris optika, spektrális interferometria

