

ULTRARÖVID ÉS KOHERENS ULTRAIB- OLYA ÉS RÖNTGENIMPULZUSOK KELTÉSE ÉS ALKALMAZÁSA

Földes B. István

az MTA doktora, tudományos tanácsadó
MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet,
Magyar Euratom Fúziós Szövetség
foldes@mkki.kfki.hu

Szatmári Sándor

az MTA doktora, tanszékvezető egyetemi tanár
Szegedi Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszék

Kuhlevszkij Szergej

a fizikai tudomány kandidátusa, egyetemi docens
Pécsi Tudományegyetem Kísérleti Fizika Tanszék

Bevezetés

Amióta az első lézer 1960-ban működni kezdett, egyre újabb és újabb koherens fényforrások születtek. Rövid két évtized alatt az egész látható spektrumban, minden hullámhosszon sikertült lézert készíteni. Az első lézer Theodore Maiman (1960) rubinlézere volt, azaz egy szilárdtestlézer a 694,3 nm hullámhosszon, impulzus üzemmódban. Ezt hamarosan követték a gázkisüléssel lézerek, amelyek folyamatos üzemmódban működtek, közülük a hélium-neon lézer szintén vörös fénye a legismertebb. Mára egyértelműen a miniatűr diódalézerek terjedtek el leginkább, ilyeneket használnak a CD-olvasókban és írókban, de mutatópálcának is leggyakrabban a bolhapiacra néhány száz forintért kapható diódalézert alkalmazzák. Már az említett lézerekkel is a legkülönbözőbb hullámhosszakokat lehet elérni, de a nagy áttörést a látható spektrum teljes lefedéséhez a festéklézerek tették lehetővé, amelyek hullámhossza a rezonátor tükreivel és a festékanyag változtatá-

sával folytonosan módosítható. A lézerek hullámhosszát növelni könnyű volt, az infravörös lézerek hullámhossza gyakorlatilag összeért a korábban felfedezett (mikrohullámú) mézerekével, ebben az irányban azonban festék híján nem folytonos a lefedettség. A különböző hullámhosszak mellett változtatható a világítás időtartama is. Léteznek folytonos és impulzuslézerek, ez utóbbiak igencsak különböző impulzushosszakkal: A legrövidebb – látható – fényimpulzusok időtartama a másodperc milliárdod részének néhány milliomod része, ami időben a fényrezgések mintegy két periódusának felel meg (néhány femtoszekundum hosszú, $1\text{fs}=10^{-15}\text{s}$). Ezeket az impulzusokat az infravörös tartományban kapták. Ahhoz, hogy megmaradjon a lézer monokromatikussága, ezt a két periódust meg kellene őrizni, azaz rövidebb monokromatikus impulzusokat csak rövidebb hullámhosszon lehet előállítani.

Természetes tehát az igény a lézerek működésének kiterjesztésére az ultraibolya, sőt a röntgentartományba is. Szükség van

e tartományokban is koherens fényforrásra, ami interferenciát tud létrehozni (és így például hologramkészítésre is alkalmazható), aminek intenzitása jól koncentrálható, valamint impulzushossza olyan rövid, hogy ultragyors folyamatok tanulmányozására is alkalmazható legyen. Mik az előnyei a hullámhossz csökkentésének? Legelőször azt a tulajdonságot emeljük ki, hogy ha valamilyen mintát vizsgálni kívánunk, a vizsgálható szerkezet méretét, az ún. felbontást a hullámhossz határozza meg. A rövid hullámhossz által az ultraibolya, illetve röntgentartományban az anyagszerkezet egyre nagyobb pontossággal, részletességgel lesz meghatározható, továbbá a rövidebb hullámhosszú sugárzás nagyobb mélységbe képes behatolni. Ma már – éppen magyar tudósok úttörő szerepével (Tegze – Faigel, 1996) – a röntgen-holográfia is megvalósult, igaz, egyelőre szinkrotronforrásokon, elég bonyolult kísérletekkel, amelyek végén számítógépes elemzés adja az eredményt, s amely módszer nem minden anyag esetén használható. Egy lézerforrás abban a tartományban egyszerűbb hologramkészítést tenne lehetővé, és általánosan alkalmazható lenne. A rövid impulzushosszak pedig gyors folyamatok vizsgálatát teszik lehetővé, szilárdtestek, molekulák gyors relaxációjának vizsgálatára is alkalmasak. És ekkor még nem is említettük a lehetséges biológiai alkalmazásokat. A rövid hullámhossz további előnye a teljesítmény nagyobb koncentrálhatósága. A lézerfény sugárzása minimálisan egy körülből hullámhossz méretű foltba koncentrálható. Rövidebb hullámhosszú sugárzás lineárisan kisebb foltba fókuszálható, ami az intenzitás négyzetes növekedését eredményezi, így nagy intenzitások érhetők el ultraibolya impulzusokkal. Az elérhető finomabb struktúrák pedig a félvezető technikában való alkalmazást (litográfia) segítik.

Ebben a cikkben összefoglaljuk a rövid hullámhosszú, koherens sugárforrások, vala-

mint az ultrarövid, ultraibolya és röntgenimpulzusok létrehozásának lehetőségeit, különös tekintettel azokra a módszerekre, amelyekkel hazai kutatók is foglalkoznak.

Ultraibolya, ultrarövid lézerimpulzusok

Az egyes lézerfajták konkrét ismertetése előtt összefoglaljuk a nem fizikus olvasó számára a lézerműködés néhány feltételét. A lézer szó a *light amplification by stimulated emission of radiation* angol kifejezés rövidítése, aminek magyar jelentése: fényerősítés sugárzás indukált kibocsátásával. Ismeretes, hogy az atomokban, molekulákban az elektronok diszkrét energiaszinteket töltenek be. Ha egy magasabb energiájú szintre gerjesztett elektron visszamegy az alacsony energiájú szintre, az energiakülönbséget sugárzás, fény formájában kibocsáthatja, mégpedig indukált vagy spontán kisugárzás útján. Egyidejűleg az alacsonyabb szinteken lévő elektronok a sugárzást el is nyelhetik, abszorbeálhatják. A lézerműködéshez az szükséges, hogy több legyen a kibocsátott indukált emisszió, mint az abszorpció. Ez (durván) akkor történik meg, ha több atom/molekula van a gerjesztett állapotban, mint az alacsonyabb szinten. Ezt nevezzük *populációinverzió*nak. Tehát populációinverzió kell létrehozni, mégpedig olyan szintek között, amelyek energiakülönbsége megfelel az ultraibolya hullámhosszon kibocsátott fotonok energiájának. A legtöbb egyszerű atomi és molekuláris átmenet energiája azonban a látható és infravörös fotonenergia-tartományban van. Ez éppúgy igaz a szabad atomokra, mint a szilárdtestekben található kötött atomokra.

Léteznek azonban olyan molekulák is, amelyek átmenetei az ultraibolya tartományban vannak. Ezek az ún. *excimer* molekulák. Az excimer molekulák általában egy nemesgáz- és egy halogénatomból állnak. Mivel a nemesgáz-molekulák még a halogénnel sem lépnek könnyen reakcióba, létrehozásukhoz energiabefektetés kell, ezért nagy

(2-3 atmoszféra) nyomású gázkisülésekben hozzák létre őket, viszonylag rövid (~10 nanoszekundum, azaz 1 százmilliomod másodperc) ideig. Maga az inverzió is ilyen rövid ideig marad fenn. Ezek a gerjesztések azonban az ultraibolya tartományban vannak, ott működnek az excimer lézerek. A hétköznapiakban az excimer lézerek a dioptriakorrigáló szemműtétekből ismertek. A leggyakoribb típusok a XeCl lézer 308 nm, a KrF lézer 248 nm és az ArF lézer 198 nm hullámhosszon. Ilyen lézerimpulzusok nemlineáris keverésével, például Raman-szórással további lézerhullámhosszak is elérhetők egészen a 150 nm-nél rövidebb hullámhosszú vákuum-ultraibolya tartományig (az ilyen hullámhosszú fényt a levegő elnyeli). A gázkisülésekben működő lézereknek vannak előnyei és hátrányai is a szilárdtestlézerekkel összehasonlítva. Nyilván a szilárdtestek sűrűsége nagyobb, ezért egységnyi térfogattól több energia szedhető ki, mint a gázokból. Ezért a legtöbb nagyteljesítményű lézer szilárdtest alapú. Másfelől a nagyobb sűrűség következtében több nemlineáris jelenség lép fel, ami a kijövő fényimpulzus alakját torzíthatja, szélsőséges esetben pedig a lézeraktív anyagot (önmagát) roncsolhatja is. Ezzel szemben a sokkal ritkább, a szilárdtestnél lényegesen kisebb sűrűségű gázban a fényimpulzus torzulásmentesen erősödhet még nagy intenzitások esetén is.

Ezért az excimer lézerek egyik érdekes alkalmazása az ultrarövid fényimpulzusok erősítése. Ultrarövid impulzusoknak manapság a pikoszekundumnál (10^{-12} s) rövidebb impulzusokat nevezik. Ilyen rövid idő alatt lézerekkel akár 10^{15} W teljesítmény is létrehozható, és a 10^{12} wattos lézer akár kisebb asztalon is elfér. Ilyenek akár szilárdtestlézerekkel, akár festéklézerekkel létrehozhatók, erősítéstük azonban nem triviális, szilárdtestlézerekkel a fenti okok miatt ez közvetlenül nem lehetséges. Ott az impulzusok széthúzásával, majd

újra összenomásával lehet erősíteni (lásd Osvay Károly és munkatársai cikkét e szám 1511. oldalán). Az excimer lézerek fentebb említett előnye, hogy a gázok kisebb sűrűsége miatt még a nagy teljesítményű impulzusok is közvetlenül, torzulásmentesen erősíthetők. Az erősített ultrarövid impulzus festéklézerrel vagy szilárdtestlézerrel állítható elő. Egy saját fejlesztésű (Szatmári–Schäfer, 1988) excimer-festéklézer-kombináció található Szegeden is a HILL laboratóriumban. A kétszövű excimerlézer első csöve pumpálja a festéklézerláncot, amely egy 600 fs impulzushosszúságú látható impulzust állít elő. A hullámhossz pontosan a 248 nm-es hullámhossz kétszerese. Ennek az impulzusnak a hullámhossza egy nemlineáris kristályon keresztülhaladva feleződik, majd a második excimer lézercső nagy intenzitásra erősíti. Itt érdekes egy kicsit játszani a számokkal. A lézer energiája még mindig csak néhány 10 mJ, a rövid impulzushossz következtében viszont a teljesítmény már több mint 10 gigawatt lesz. És ha kihasználjuk a jó fókuszálhatóságot, akkor ezzel akár a négyzetcentiméterenkénti 10^{19} watt is elérhető egy piciny, a mikrométernél is kisebb foltban (Szatmári et al., 1996). Hasonló rendszerek állíthatók elő, és működnek úgy is, hogy a lézeroszcillátor nem festéklézer, hanem szilárdtestlézer, mégpedig a titán-zafir lézer, amelynek hullámhosszát a nemlineáris kristályok segítségével harmadolni kell az erősítés előtt.

A nagy intenzitások hasznosítása

Az ilyen hatalmas intenzitások az anyagot nem hagyják meg eredeti állapotában, az atomokból az elektronok kiszabadulnak, sokszorosán ionizált forró plazma keletkezik a lézerimpulzus igen rövid ideje alatt. Ez a forró plazma több millió fok hőmérsékletű. Ha a plazmát ultrarövid lézerimpulzussal hoztuk létre, akkor a lézerimpulzus ideje alatt nincs ideje kitágulni, sűrűsége nagy marad, a szilárdtest sűrűségének megfelelően. Ez a

forró plazma, illetve a benne lejátszódó lézerező plazma-kölcsönhatások alkalmasak arra, hogy még rövidebb hullámhosszú koherens fénysugárzást, akár ultrarövid lézerimpulzusokat hozzunk létre.

Amint azt korábban említettük, már a 248 nm-es lézerrel erősített sugárzást is hosszabb hullámhosszú lézerek frekvenciájának többszörözésével hoztuk létre speciális kristályokban. Ez a kiváló módszer azonban még rövidebb hullámhosszakon nem folytatható, hiszen a 200 nm-nél rövidebb hullámhosszakot a kristályok teljesen elnyelik, sőt, a rövidebb hullámhosszú sugárzást az atmoszferikus nyomású levegő is erősen abszorbeálja, ezért is hívják ezt a tartományt vákuum-ultraibolyának. Mindazonáltal a gázok kiválóan használhatók a frekvencia koherens többszörözésére, és így koherens sugárzás létrehozására egészen a közel 1 keV fotonenergiáig (Schnürer et al., 1998). Ezekben a kísérletekben kisméretű, vákuumban elhelyezett gáztartókat használtak, hogy a gázok abszorpciója elhanyagolható maradjon. A magas felharmonikusok keltésének ilyen módja igen jól működik, számos diagnosztikai alkalmazása van, s ez a módszer vezetett el egy magyar ötlet (Farkas – Tóth, 1992) nyomán a femtoszekundumos (10^{-15} s) impulzusok keltéséhez (Papadogiannis et al., 1999). Az ezzel kapcsolatos, komolyan tűnő probléma, hogy a rövid hullámhosszakba történő konverzió hatásfoka igen alacsony, legfeljebb a lézerenergia milliomod része. Az összes foton száma sem növelhető korlátlanul, hiszen a lézerintenzitás növelésekor a gázok a fentiek szerint ionizálódnak, s ezzel gyakorlatilag megszűnnek harmonikuskelésre alkalmas médium lenni.

Nincs ilyen ionizációs veszély, ha például eleve plazmát használunk harmonikusforrásnak, és a konverzió is lehet egy-két nagyságrenddel hatásosabb. Laboratóriumunkban végzett kísérleteinkben az ultra-

ibolya lézer felharmonikusait állítottuk elő a 4. rendig, azaz a 63 nm hullámhosszig. A felharmonikusokat a szabad elektronoknak a lézertér hatására, a meredek vákuum-plazma határon keresztül végzett nemlineáris oszcillációja kelti. Kísérleteinkben megmutattuk azt is, hogy a plazma meredekségének változtatásával a harmonikusokba történő konverzió is szabályozható (Földes et al., 1999). A Rutherford Laboratórium hatalmas, petawatt teljesítményű lézert használva ezzel a módszerrel is sikerült a keV fotonenergiát megközelíteni (Norreys et al., 2004). Amint ez is mutatja, a rövid hullámhosszak eléréséhez egyelőre még nagyon nagy lézerintenzitások szükségesek. További probléma az, hogy a harmonikusok forrásául szolgáló oszcilláló plazmafelület-réteg nem marad sima, hanem fodrozódik, s ennek következtében a harmonikusok nagy lézerintenzitások esetén nem nyalábszerűen, hanem diffúzan terjednek (Rácz et al., 2005). Rövidebb lézerimpulzusok használata azonban megoldhatja ezt a problémát.

A lézertény és a forró plazma nemlineáris kölcsönhatásai lehetővé teszik ultrarövid röntgenimpulzusok előállítását is. A kölcsönhatásokban az elektronok egy része nagy sebességre gyorsul, ezeket nevezzük forró elektronoknak, amelyek mintegy nyalábként behatolnak a szilárdtest target még hideg részébe. A nagy energia következtében az atomok belső, K-héjának elektronjait is mintegy kiütik a helyükről, vakanciák keletkeznek. A vakanciák gyorsan betöltődnek, egyidejű Ka sugárzás kibocsátásával. Ez a folyamat olyan gyors, hogy a keletkező röntgensugárzás impulzushossza megegyezik vagy rövidebb lesz a keltő lézer impulzushosszánál. Jelenleg folytatott kísérleteinkben 1,5-1,8 keV energiájú röntgenimpulzusokat várunk. Ha ezek a kísérletek sikerrel járnak, komoly esély van az egyesült Európa valamelyik nagy lézerén (Laserlab Europe) ennél akár nagyságrenddel nagyobb energiájú intenzív, ultrarövid rönt-

genimpulzusok létrehozásában és annak diagnosztikai alkalmazásában való közreműködésre. Már ma is használnak rövid röntgenimpulzusokat időtől függő röntgendiffrakcióra a femtoszekundumos időtartományban, ahol az új források új távlatokat nyitnak.

Röntgenlézerek

Harmonikuskeléssel kétségkívül lehet koherens sugárzást kelteni a vákuum-ultraibolya és röntgentartományban, természetesnek tűnik viszont az az igény is, hogy lézert hozzanak létre itt is. A röntgenlézer fejlesztése számos okból szükséges és perspektivikus. Lehetőséget ad az anyagok nagy precizitású megmunkálásától kezdve a röntgen-holográfia fejlesztésére, atomi folyamatok vizsgálatára, fotokémiai vizsgálatokra és (például a termonukleáris fúzióhoz szükséges) nagyon sűrű plazmák diagnosztikai vizsgálatára. A biológusok mohón várják a lézert, amellyel élő sejtekről készíthetnek hologramokat. A gyakorlatban használható, asztali méretű légyröntgenlézer teljesen új területeket nyithat, például az ultrarövid hullámhosszú nemlineáris optikában. A légyröntgenlézerek megvalósítása viszont nagy kihívás a lézerkutatók számára, mert a gerjesztéshez a látható tartományhoz képest sok nagyságrenddel nagyobb pumpáló energiára van szükség, és az optikai nivók élettartamával összevetve a gerjesztett szintek élettartama is nagyságrendekkel rövidebb. További nehézség, hogy a légyröntgenhullámhosszakon nem léteznek jó reflexiójú tükrök.

A légyröntgenbe eső hullámhosszakon a lézerműködéshez szükséges többszörösen ionizált plazma előállításának egy fontos módja a kapillárisban létrehozott gyors kislülés. A homogénean összehúzódó plazmát létrehozó ilyen típusú kislüéseket Z-pinch-nek nevezik a szakirodalomban. A Z-pinch-et eredetileg a termonukleáris fúzióhoz dolgozták ki, de a módszer új utat nyitott a relatíve egyszerű, olcsó, jó hatásfokú, asztali méretű légyröntgen-

lézerek területén is. Kapilláris-kislúessel gerjesztett plazmában létrehozott, nagymértékben erősített légyröntgensugárzásról először 1994-ben Jorge J. Rocca és munkatársai (1994) számoltak be az USA-ban. A lézerfolyamatot a neonszerű, nyolcszorosan ionizált argon (Ar^{+8}) 46,9 nm-es hullámhosszú $3p-3s$ ($J=0-1$) átmenetén detektálták. Később ez a csoport az előállított légyröntgenimpulzusok energiájának telítődését 1 mJ-nál érte el, és 5-7 mrad divergenciájú nyalábot hozott létre. A nyaláb intenzitásprofilja gyűrű alakú. A nagy érdeklődést kiváltó eredmények és új elméletek kidolgozása ellenére a világ más csoportjai képtelenek voltak az 1994-es eredményeket megismételni egészen 2001-ig. 2001-2002-ben egymástól függetlenül egy izraeli, egy japán és egy olasz-magyar csoport számolt be mérsékelt energiájú (~5 μJ) légyröntgentartományú erősítésről a nem telítődő tartományban.

A magyar-olasz együttműködés során elértük, hogy viszonylag lassú (130-180 ns) és alacsony áramú (17-20 kA) Z-pinch kislülés még nagyon hosszú (~0,5 m) Al_2O_3 -kapillárisban is stabil és hatékony lézerműködést tegeyen lehetővé (Ritucci et al., 2003). Az Ar^{+8} 46,9 nm-es légyröntgenvonala dominál az időátlagolt spektrumban. A röntgenlézer impulzusa 2 ns-nál rövidebb, miközben a plazma háttérsugárzása néhány száz ns időtartamú. A Z-pinch kislülés megfelelően stabil ahhoz, hogy 300 μJ energiájú sugárzást bocsásson ki. A lézernyaláb divergenciája közel diffrakció által határolt, 0,5 mrad értékű, a sugárzás majdnem teljesen koherens, és a nyalábprofil Gauss-görbe alakú. Kísérleti adataink összevetése elméleti számításunkkal azt mutatta, hogy a nyaláb kis divergenciáját a hosszú (~0,5 m-es) plazmaoszlopon belüli hullámvezetési mechanizmus hozza létre. A hullámvezetés a lézer aktív közegében csökkenti a veszteségeket. Ez különösen nagy jelentőségű kis erősítés esetén, amikor a sugárzásnak hosszú plazmaoszlopon

kell keresztülhaladnia. A hosszú plazma hullámvezetők előállításának önmagában is számos potenciális alkalmazása van, például részecskegyorsítás ultranagy intenzitású lézerimpulzusokkal vagy magasrendű felharmonikusok előállítása.

A lézer magas energiája ($\sim 1 \mu\text{J}$), ismétlési frekvenciája ($\sim 1 \text{ Hz}$), valamint a sugárzás jó térbeli koherenciája (m^{-1}) és nyalábjának Gauss-görbe alakú intenzitáseloszlása miatt

sok potenciális alkalmazást tesz lehetővé. A lézert jelenleg a PTE és SZTE Kísérleti Fizika Tanszékei, a PTE-DDKKK és az MTA-RMKI együttműködésével továbbfejlesztjük. A cikkben említett kutatásokat az OTKA (M045644, T035087 és T046811) és a KPI KMA (GVOP-3.2.1.-2004-04-0166/3.0) támogatja.

Kulcsszavak: ultrarövid lézerimpulzus, ultraibolya és röntgensugárzás

IRODALOM:

- Farkas Gy. – Tóth Cs. (1992): Phys. Lett. A **168**, 447.
Földes I. B. – Bakos J. S. – Bakonyi Z. – Nagy T. – Szatmári S. (1999): Physics Letters A. **258**, 312–316.
Maiman, T. H. (1960): Nature. **187**, 493–494.
Norreys, P. A. – Krushelnick, K. M. – Zepf, M. (2004): Plasma Physics and Controlled Fusion. **46**, B13–21.
Papadogiannis, N. A. – Witzel, B. – Kalpouzos, C. – Charalambidis, D. (1999): Physical Review Letters. **83**, 4289–4292.
Rácz E. – Földes I. B. – Kocsis G. – Veres G. – Eidmann K. – Szatmári S. (2005): Applied Physics B. közlésre elfogadva
Ritucci, A. – Tomassetti, G. – Reale, A. – Palladino, L. – Reale, L. – Flora, F. – Mezi, L. – Kukhlevsky, S. V. – Faenov, A. – Pikuz, T. – Kaiser, J. – Consorte, O. (2003): Europhysics Letters. **63**, 694–700.
Rocca, J. J. – Shlyaptsev, V. – Tomasel, F. G. – Cortázar, O. D. – Hartshorn, D. – Chilla, J. L. A. (1994): Physical Review Letters. **73**, 2192–2195.
Schnürer, M. – Spielman, Ch. – Wöbroschek, P. – Strelt, C. – Burnett, N. H. – Kan, C. – Ferencz K. – Kopitsch, R. – Cheng, Z. – Brabec, T. – Krausz F. (1998): Physical Review Letters. **80**, 3236–3239.
Szatmári S. – Almási G. – Feuerhake M. – Simon P. (1996): Applied Physics B. **63**, 463–466.
Szatmári S. – Schäfer F. P. (1988): Optics Communication. **68**, 196–202.
Tegze M. – Faigel G. (1996): Nature. **380**, 6569, 49–51.

