

KAPILLÁRISKISÜLÉssel GERJESZTETT LÁGYRÖNTGEN-LÉZER

Kuhlevszkij Szergej
Kísérleti Fizika Tanszék, Fizikai Intézet,
Pécsi Tudományegyetem

Lágyröntgen-lézerek

Az első lézerfolyamat megvalósítása óta, amelyet 1960-ban a rubin 694,3 nm-es átmenetén hoztak létre, a kutatás egyik legfontosabb iránya a minél rövidebb hullámhosszon működő lézer megvalósítására irányult. Az elmúlt két évtizedben nagy előrehaladást értek el az úgynevezett lágyröntgen-lézerek fejlesztésének területén (lásd pl. [1]). Lágyröntgen-lézereknek tekintjük azokat a forrásokat, amelyek részlegesen koherens elektromágneses sugárzást bocsátanak ki a körülbelül 0,2–50 nm hullámhossz tartományban.

A lágyröntgen-lézerek megvalósítása azért jelent nagy kihívást a lézerkutatással foglalkozó szakemberek számára, mert a gerjesztéshez a látható tartományhoz képest sok nagyságrenddel nagyobb pumpáló energiára van szükség, és az optikai nívók élettartamával összevetve a gerjesztett nívók élettartama is nagyságrendekkel rövidebb. További problémát jelent, hogy a lágyröntgen-hullámhosszakon nem léteznek jó reflexiójú tükrök.

1985-ben az Amerikai Egyesült Államokban hozták létre az első olyan lézerfolyamatot, amelynek hullámhossza már a lágyröntgen-tartományba esett. Ehhez felhasználták a világ akkori legnagyobb teljesítményű optikai lézerrendszereit [2, 3], amelyeket a nukleáris fúzió kutatásához is használtak. A lágyröntgen-sugárzáshoz szükséges populációinverziót – az igen nagy energiájú optikai tér és a célfelületként használt szilárdtest-kölcsönhatásakor létrejövő – forró ($T > 10^6$ K) és sűrű ($N > 10^{19}$ cm⁻³) plazmában érték el. Említést érdemel még a „csilloghaborús” röntgenlézer (1980–85), melynek gerjesztéséhez nukleáris robbantást használtak fel [4]. Ezen üttörő munkákat számos, sikeres kísérlet követte, melyek a lézer kimeneti jellemzőinek fejlesztésére és alkalmazására irányultak. Az 1985-től elért nagy előrehaladás ellenére a lágyröntgen-lézer bonyolultsága, költségessége és hatalmas mérete gátat szabott a lágyröntgen-lézerek széles körű elterjedésének.

Koherens lágyröntgen-sugárzást nem csak plazmában lehet létrehozni, illetve erősíteni. A szinkrotronokban töltött részecskék keringenek nagy sugarú körpályán és (centripetális) gyorsulásuk miatt széles spektrumú sugárzást bocsátanak ki. A szinkrotron előnye, hogy széles tartományon hangolható, és nagy átlagos teljesítménnyel rendelkezik. Hátránya, hogy számos alkalmazás (pl. röntgen-mikrofluoreszcencia, nemlineáris folyamatok tanulmányozása, sűrű plazmák diagnosztikája) szempontjából túlságosan kis csúcsintenzitással rendelkezik. Továbbá óriási méretű, és igen magas az üzemeltetési költsége.

A szabadelektron-lézerben (*free electron laser*, FEL) egy ultrarelativisztikus elektronnyalábot térben periodikusan változó mágneses téren engednek keresztül. A FEL nagyobb energiájú és koherensebb sugárzást bocsát ki, mint a szinkrotron. A jövőben számos ultra-rövidhullám-

hosszú FEL-t terveznek megépíteni, illetve több építése már folyamatban van. Viszont ezek a lézerek is igen nagy méretűek és költségesek.

A kisebb, asztali méretű röntgenlézer fejlesztése számos okból szükséges és perspektivikus. Lehetőséget ad az anyagok nagy precizitású megmunkálásától kezdve a röntgenholográfia fejlesztésére, atomi folyamatok vizsgálatára, fotokémiai vizsgálatokra, biológiai minták leképezésére és (pl. a nukleáris fúzióhoz szükséges) nagyon sűrű plazmák diagnosztikus vizsgálatára [1].

A TW csúcsteljesítményű, asztali méretű optikai lézerrendszerek nagyarányú fejlődésének köszönhető, hogy a lágyröntgen-lézer működéséhez szükséges forró plazmát ma már asztali méretű, kompakt lézerekkel előállított intenzív lézerfény és szilárdtest-felület kölcsönhatása során is létre tudják hozni (lásd pl. [5]).

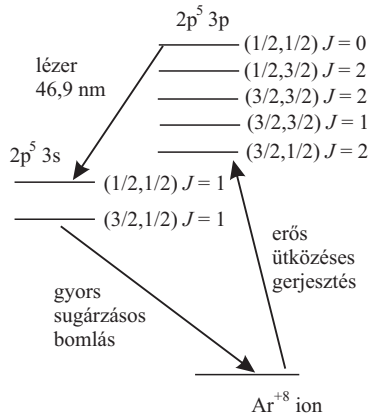
A lágyröntgen-lézer működéshez szükséges többszörösen ionizált plazma előállításának egy másik fontos módja a kapillárisban gyors kisüléssel létrehozott, homogénen összehúzódó plazma. A szakirodalomban az ilyen típusú kisüléseket „Z-pinch”-nek nevezik. A Z-pinchet eredetileg a termonukleáris fúzióhoz dolgozták ki, de a módszer új utat nyitott a relatíve egyszerű, olcsó, jó hatásfokú, asztali méretű lágyröntgen-lézerek területén is.

Asztali méretű optikai lézerberendezéssel magas rendű frekvenciakonverziót használva lehetséges látható fényt lágyröntgen-tartományú sugárzássá alakítani [6]. Bár ezzel a technikával eddig viszonylag kis energiájú (nJ-os) impulzusokat állítottak elő, perspektivikusnak tűnik látható tartományú fs-os impulzusok felhasználásával nagy csúcsintenzitású és nagy átlagenergiájú lágyröntgen-sugárzás elérése is.

Mivel az eltérő alkalmazások eltérő tulajdonságú fényforrást igényelnek, a fenti koherens lágyröntgen-sugárzást előállító berendezések közül az aktuális feladathoz legjobban illeszkedőt kell kiválasztani.

Kapilláris kisüléssel gerjesztett Ar⁺⁸-lézer

Az egyik legnyilvánvalóbb lehetőség az egyszerű, olcsó és asztali méretű, nagy energiájú és átlagteljesítményű lágyröntgen-lézer megvalósítására a kapilláris kisülés alkalmazása. Kapilláris kisüléssel gerjesztett plazmában létrehozott, nagymértékben erősített lágyröntgen-sugárzásról először 1994-ben *J.J. Rocca* és társai számoltak be az USA-ban. A lézerfolyamatot a neonszerű argon (Ar⁺⁸) 46,9 nm-es hullámhosszú 3p–3s ($J = 0-1$) átmenetén detektálták. Az argonatomokat műanyag kapillárisban, nagyon gyors (60 ns) és nagy áramú (40 kA) Z-pinch-kisüléssel gerjesztették, illetve ionizálták [7]. Később ez a csoport az előállított lágyröntgen-impulzusok energiájának a telítődését 1 mJ-nál érte el, és 5–7 mrad divergenciájú nyalábot hozott létre. A nyaláb gyűrű alakú intenzitáspro-



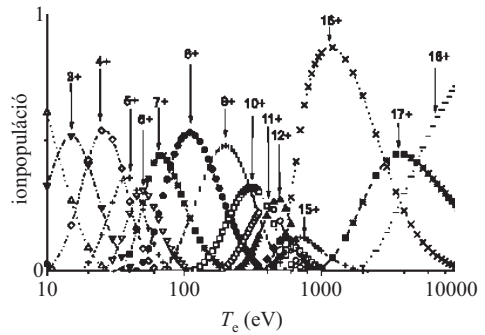
1. ábra. Neonszerű argonion energiaszintjei és a lézerműködés szempontjából fontos átmenetei [1].

fillal rendelkezett. 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 [8], japán [9] és olasz–magyar [10] csoport számolt be mérsékelt energiájú (μ) légyröntgéntartományú erősítésről a nem telítődő tartományban.

A neonszerű argon $2p^5 3p$ ($J=0$) és $2p^5 3s$ ($J=1$) energiaszintjei között elektronütközéssel lehet populációinverziót létrehozni (1. ábra).

Egyensúlyi állapotban lévő argonplazmában a tíz elektronnal rendelkező Ar^{+8} -ionok, amelyek zárt, neonszerű elektronhéjjal rendelkeznek relatíve stabilak (2. ábra).

A 2. ábra az „atomic-kinetic code”-dal számolt, relatív ionpopulációkat mutatja a hőmérséklet függvényében. A

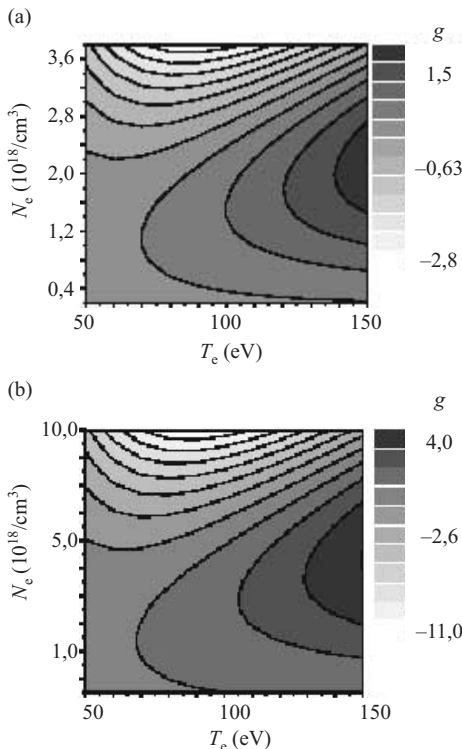


2. ábra. Különböző töltésű ionok relatív populációinak függése az elektron-hőmérséklettől [12].

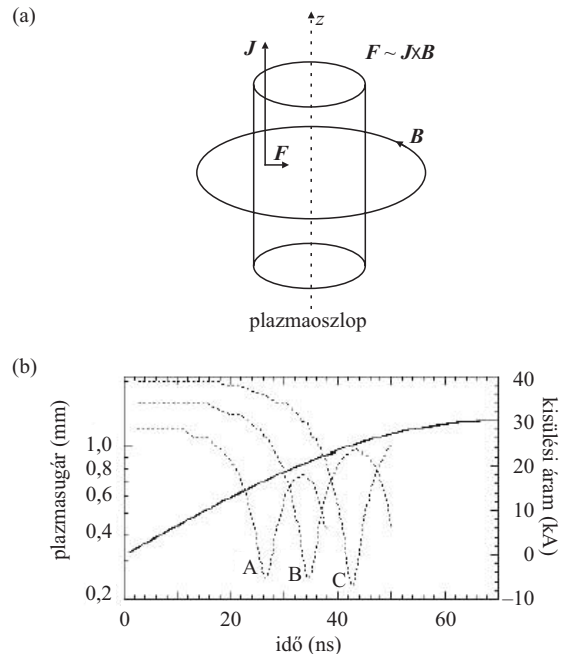
Ne-szerű ionok (Ar^{+8}) nagy számban a $k_B T \sim 100$ eV-nak megfelelő hőmérsékleten fordulnak elő. Az Ar^{+8} -ionok képesek fennmaradni az elektron-hőmérséklet (40–120 eV) és elektronsűrűség ($N_e = 1-10 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) széles tartományán. Ebben a viszonylag sűrű plazmában az elektronütközéses gerjesztés hozza létre a populációinverziót a $2p^5 3p$ ($J=0$) és $2p^5 3s$ ($J=1$) szintek között. A kialakuló g erősítési együttható a 3. ábra mutatja az elektron-hőmérséklet és elektronsűrűség függvényében.

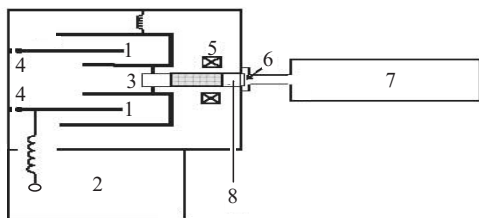
A $2p^5 3p$ ($J=0$) energiaszintnek a $2p^5 3s$ ($J=1$) szinthez képest rövidebb sugárzási élettartama teszi lehetővé e szintek között a populációinverzió kialakulását. Az eddigi kísérletekben a maximális populációinverzió, illetve lézerezés $k_B T = 50-70$ eV elektron-hőmérsékleten és $N_e = 1-5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ sűrűségen érték el. Ez körülbelül 300 μm átmérőjű plazmaszlop esetén valósul meg. Nagyobb átmérő esetén az erősítés jelentősen csökken (3.a ábra). Az elektron-hőmérséklet növelésével lehetőség van a lézerezés további növelésére (3. ábra).

3. ábra. Az erősítési együttható az Ar^{+8} $2p^5 3p$ ($J=0$) – $2p^5 3s$ ($J=1$) átmenetén ($\lambda = 46,9$ nm) az elektron-hőmérséklet és sűrűség függvényében (a) 600 μm és (b) 150 μm plazmasugarak esetén [12].



4. ábra. (a) A plazmaszlopot az áram által keltett $F \sim J \times B$ Lorenz-erő sugárirányban összenyomja (lásd pl. [13]). (b) A plazmasugár számított időbeli fejlődése (szaggatott vonal) (A) 1,2; (B) 1,6 és (C) 2 mm kezdeti plazmasugarak esetén. Az Ar-gáz nyomása 0,5 torr. A folytonos vonal a számított kislési áram időbeli változását mutatja [12].





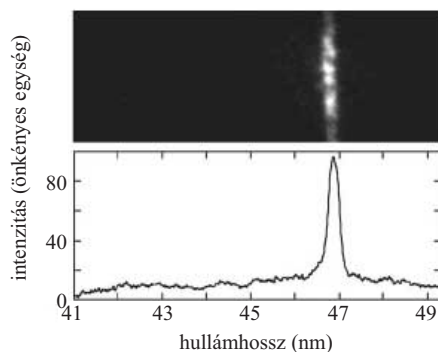
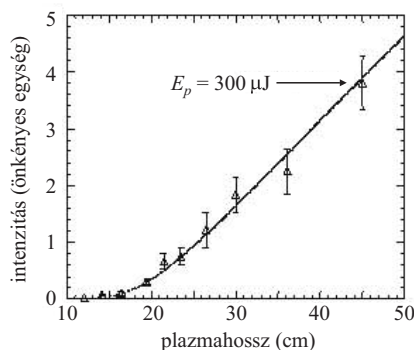
5. ábra. A Z-pinch berendezés sematikus ábrája. 1 – víz szigetelésű kondenzátor, 2 – Marx-generátor, 3 – kapilláris, 4 – szikraköz, 5 – árammérő Rogowsky-hurok, 6 – vákuumtartó fényretesz (3 és 7 között), 7 – detektáló egység, 8 – előionizációs áramkör [14].

A fenti paraméterekkel rendelkező plazma előállítására kerámia kapillárisban létrehozott Z-pinch-kisüléssel lehetséges. E pumpáló technika során nagy erősségű áram folyik az alacsony nyomású Ar-gázzal telt kapilláris z tengelye mentén (4. ábra). A kapillárisban jön létre a forró, sűrű és sokszorosán ionizált, kis átmérőjű aktív közeg. A plazma hőmérséklete és sűrűsége növekszik a plazmaoszlop gyors, sugárirányú összehúzódása miatt. Ez az összehúzódás az áram által keltett $\mathbf{F} \sim \mathbf{J} \times \mathbf{B}$ Lorenz-erő következménye. Itt \mathbf{B} a plazmaoszlopban folyó \mathbf{J} áramsűrűségű áram következtében kialakuló mágneses indukció.

A kapilláris Z-pinch létrehozásához az 5. ábrán látható berendezést használtuk.

A hatfokozatú Marx-generátor lassan nagyfeszültségre (~150 kV) tölti fel a 7 nF-os, szigetelőként (nagy permeabilitású) vizet tartalmazó kondenzátort. Azután ez gyorsan kisül a víz szigetelésű szikraköz és a kerámia kapilláris tartalmazó alacsony induktivitású körön keresztül, és így létrehozza a populációinverziót a kapillárisban lévő argon plazmában. A kondenzátorban tárolt energia 80–100 J között van. A kísérletünkben 3,2 mm átmérőjű, 0,1–0,45 m hosszú, Al_2O_3 kerámia kapilláris használtunk. A gerjesztési áram erőssége 17–20 kA, időtartama 130–180 ns volt. A fő kisülést megelőzte egy 3–6 μs időtartamú, 20 A áramerősségű impulzus, amely előionizálta az Ar-gázt. Ez az előionizáció teremtette meg a plazma egyenletes összehúzódásához szükséges kezdeti feltételeket. A kapilláris folyamatosan áramló, 0,25–0,6 torr nyomású Ar-gázt tartalmazott. A kerámia kapillárisra, falának kismértékű ablációja jellemző. Ez a tulajdonság alapvető fontosságú a plazmaoszlop egyenletes

7. ábra. Kísérletileg mért lézerezési intenzitás (háromszögek) a kapilláris hosszának függvényében. A bejelölt hibák tíz-tíz mérésből számolt szórást mutatják. A lézér 0,1 Hz ismétlési frekvenciával működött. A folytonos vonal az elméleti illesztést mutatja [11].



6. ábra. Kapilláris kisülés során Ar-gázban keltett 20 cm hosszú plazmaoszlopból emittált sugárzás időátlagolt spektruma [11].

összenyomásához és hatékony fűtéséhez a Z-pinch során [11]. A kapillárisban jön létre a forró, sűrű és sokszorosán ionizált, körülbelül 300 μm átmérőjű aktív közeg.

A magyar–olasz együttműködéssel megvalósított lézer jellemzői

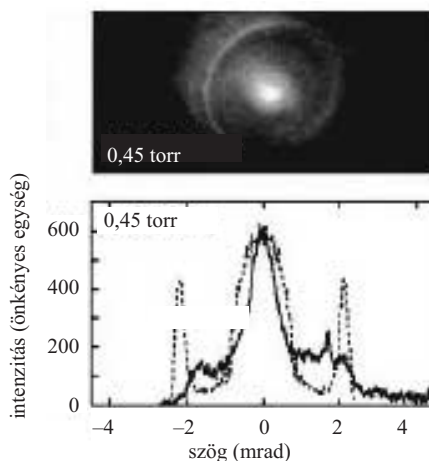
Kutatásunk során elértük, hogy relatíve lassú (130–180 ns) és alacsony áramú (17–20 kA) Z-pinch-kisülés még nagyon hosszú (~0,5 m) Al_2O_3 -kapillárisban is stabil és hatékony lézerműködést tesz lehetővé. A 3p–3s átmenethez tartozó 46,9 nm-es lágyröntgen-vonal erősen dominál az időátlagolt spektrumban (6. ábra). A lézerimpulzus <2 ns, a háttérsugárzás pedig néhány száz ns időtartamú.

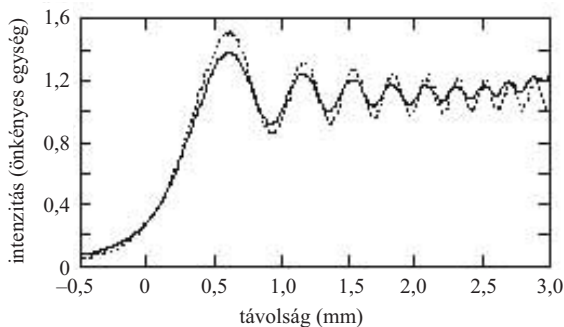
A lézér szupersugárzó módban működik, tükrök nélkül. A nem telítődő tartományban az $I \sim \exp(gL)$ lézerezési intenzitás a gL szorzattól függ. Amikor a gL erősítési együttható \times hossz szorzat eléri a 12–14 értéket, a lézerműködés határfoka telítődik, és létrejön a plazmahosszal arányos energiájú kvázikoherens lézersugárzás. Ez esetünkben ~20 cm hosszúságú plazmaoszlop esetén valósult meg (7. ábra).

A 8. ábrán a lézernyaláb távoli zónában mért intenzitáseloszlása látható.

A relatíve lassú (130–180 ns), alacsony áramú (17–20 kA) Z-pinch-kisülés még egy nagyon hosszú (~0,5 m)

8. ábra. A lézernyaláb távoli zónában detektált intenzitáseloszlása 0,45 torr nyomáson. A folytonos vonal a kísérletileg mért, a szaggatott a számított eredményt mutatja. A kísérleti görbét a számított értékhez normáltuk [11].





9. ábra. A lézernyaláb élen történő elhajlásának képe (folytonos vonal) és a Fresnel-integrállal számolt elhajlási kép (szaggatott vonal) [11].

Al_2O_3 -kapillárisban is megfelelően stabil ahhoz, hogy 300 μJ energiájú sugárzást bocsásson ki (7. ábra). Továbbá a 8. ábrán látható, hogy a nyaláb divergenciája közel diffrakció által határolt, 0,5 mrad értékű, a nyalábprofil Gauss-alakú. A 9. ábra szerint pedig a sugárzás majdnem teljesen koherens.

A lézer magas energiája, ismétlési frekvenciája, valamint a sugárzás jó térbeli koherenciája és nyalábjának Gauss-alakú intenzitáseloszlása miatt sokfajta alkalmazást tesz lehetővé. Például nemrég megmutattuk a szubmikrométer felbontású leképezés lehetőségét lézerrel [11]. Ezekben a kísérletekben lítiumfluorid-kristályban létrehozott színcentrumokat alkalmaztunk detektálásra.

A kísérleti adatok összevetése az eleméleti számításokkal azt mutatta, hogy a nyaláb kis divergenciáját a hosszú (~0,5 m-es) plazmaoszlopon belüli hullámvezetési mechanizmus hozza létre [11]. A hullámvezetés a lézer aktív közegében csökkenti a veszteségeket. Ez különösen nagy jelentőséggel bír kis erősítés esetén, amikor a sugárzásnak hosszú plazmaoszlopon kell keresztül haladnia. A hosszú plazma-hullámvezetők előállításának önmagában is számos potenciális alkalmazása van, mint például részecskegyorsítás ultra-nagyintenzitású lézerimpulzusokkal vagy magasrendű felharmonikusok előállítása [15].



A gyakorlatban használató, asztali méretű lágyröntgen-lézer teljesen új területeket nyithat például az ultra-

rövid hullámhosszú nemlineáris optikában. A nem túl távoli jövőben, amikor a sugárzás hullámhossza mindössze néhány nm-re csökken, megvalósítható lesz a biológiai minták holografikus leképezése és a koherens röntgenfénynek az orvosi diagnosztikai alkalmazása. Számos olyan fontos alkalmazás lesz, melyek jelentőségét jelen pillanatban nem tudjuk felmérni.

A lézerfizika múltját tekintve, az új paraméterekkel rendelkező, nagy intenzitású elektromágneses források fejlesztésekor számos esetben váratlan jelenségeket figyeltek meg. Ezek a jelenségek rendszerint tudományos áttörésekhez vezettek. Sok kutató véli úgy, hogy a széles körben hozzáférhető lágyröntgen-lézerek használatát túlmutat a ma kézenfekvő különböző tudományos és ipari alkalmazásokon.

Köszönetnyilvánítás

E cikkben ismertetett lézert jelenleg továbbfejlesztjük a PTE és SZTE Kísérleti Fizika Tanszékei, a PTE DDKKK és az MTA RMKI együttműködésével. A szerző köszönettel tartozik magyar és olasz kollégáinak. Külön köszönet illeti Hebling Jánost, Almási Gábort és Nyitray Gergelyt a kézirat gondos átolvasásáért. A kutatást az Italian National Institute of Nuclear Physics, és az Olasz–Magyar TÉT program (I-74/1998, I-74/1999) az OTKA (M045644 és T046811) támogatta.

Irodalom

1. H. DAIDO Rep. Prog. Phys. 65(2002) 1513
2. D.L. MATTHEWS et al. – Phys. Rev. Lett. 54(1985) 110
3. S. SUCKEWER et al. – Phys. Rev. Lett. 55(1985) 1753
4. J. NILSEN – Quant. Electron. 33(2003) 1
5. J. DUNN et al. – Phys. Rev. Lett. 84(2000) 4834
6. A. RUNDQUIST et al. – Science 280(1998) 1412
7. J.J. ROCCA, V. SHLYAPTEV, F.G. TOMASEL, O.D. CORTÁZAR, D. HARTSHORN, J.L.A. CHILLA – Phys. Rev. Lett. 73(1994) 2192
8. A. BEN-KISH, M. SHUKER, R.A. NEMIROWSKY, A. FISHER, A. RON, J.L. SCHWOB – Phys. Rev. Lett. 87(2001) 015002
9. G. NIIMI, Y. HAYASHI, M. NAKAJIMA, M. WATANABE, A. OKINO, K. HORIOKA, E. Hotta – J. Phys. D 34(2001) 1
10. S.V. KUKHLEVSKY et al. – Eur. Phys. J. D 19(2002) 73
11. S.V. KUKHLEVSKY et al. – Europhys. Lett. 63(2003) 694; Europhys. Lett. 63(2003) 681; Contr. Plasma Phys. 43(2003) 88; Opt. Comm. 231(2004) 403; Appl. Phys. B 78(2004) 965
12. S.V. KUKHLEVSKY et al. – Contr. Plasma Phys. 42(2002) 109
13. S.V. KUKHLEVSKY et al. – Europhys. Lett. 55(2001) 660
14. S.V. KUKHLEVSKY et al. – J. de Physique IV France 11(2001) 583; Plasma Source Sci. Technology 10(2001) 567
15. E. ESAREY, R.F. HUBBARD, W.P. LEEMANS, A. TING, P. SPRANGLE – Phys. Rev. Lett. 79(1997) 2682

KOHERENS RÖNTGENSUGÁRZÁS KÉLTÉSE KRISTÁLYBAN

Kálmán Péter

BME, Kísérleti Fizika Tanszék

Egy koherens, keményröntgen-sugárzás – azaz a keV-os fotonenergia-tartományba eső sugárzás – keltésére tett elméleti javaslattal foglalkozunk. Ezen belül is a nagy intenzitású, 10 fs pulzushossz környékén működő lézernyalábok segítségével kristályokban generált koherens röntgen-sugárzás-keltés egy lehetséges mechanizmusát tárgyaljuk.



Koherens röntgensugárzást – a szinkrotronsugárzásban keletkező koherens röntgensugárzást kivéve – napjainkig

csak a lágy tartományban (fotonenergia <1 keV) sikerült keltetni [1]. A működő eszközök többnyire szupersugárzó üzemmódban dolgoznak, azaz rezonátor nélküli, erősítést mutató rendszerek. Koherens, kemény ultraibolya vagy lágy röntgen előállítható felharmonikus keltésével is. Manapság jóval a századik felharmonikus felett képesek felharmonikus keltésre [2].

A valóban lézernek mondható, és a keményröntgen-tartományban (fotonenergia >1 keV) működő berende-