

# PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Fizika Doktori Iskola

## Kapilláris kisüléssel gerjesztett $\text{Ar}^{8+}$ lágyröntgenlézerek

PhD értekezés tézisei

Szász János Péter

Témavezető:

Dr. Kuhlevszkij Szergej

egyetemi tanár



PÉCS, 2016

# 1. Bevezetés

Az extrém ultraibolya (EUV) és a röntgen hullámhossztartomány közötti, 0,2-50 nm-es, ún. lágyröntgentartomány gyakorlati szempontból is fontos terület. A rövid hullámhossz nagyobb felbontásra ad lehetőséget a mikroszkópiában [1], [2], illetve röntgen-litográfiával akár néhány tíz nm-es méretű struktúrák alakíthatók ki [3]. A lágyröntgensugárzás előállítására az ionok távoli héjainak energiaszintjei közötti átmenetek adnak lehetőséget. Ehhez sokszorosán ionizált atomi rendszert, forró plazmát kell létrehoznunk. A plazma előállítása történhet lézerrel, vagy az átmérőjéhez képest hosszú csőben (kapillárisban) létrehozott nagyáramú (10-60 kA), gyors ( $\sim 10^{11}$  A/s felfutási sebességű) kisüléssel. Ez utóbbi esetben a plazmaoszlopra az áram keltette mágneses mezőben ható Lorentz-erő miatt a plazma „önmagát” összehúzza, így már alacsonyabb áramok mellett elérhető a szükséges elektronhőmérséklet, illetve elektron- és ionsűrűség. Az ilyen kisüléseket az irodalom z-pinch-nek nevezi. A módszert J. J. Rocca és munkatársai javasolták [4], és 1994-ben be is mutatták első ilyen lézerüket, ami tiszta argongázzal, a neonszerű  $\text{Ar}^{8+}$  ionok 46,9 nm-es hullámhosszú átmenetén működött [5]. Az egyszerű felépítés ellenére az egyszerre nagyáramú, és nagyfeszültségű, mindemellett gyors áramköri megvalósítás nehézségei miatt kapilláris kisüléssel gerjesztett  $\text{Ar}^{8+}$  lézert eddig kevés kutatócsoport állított elő [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]. Egy olasz-magyar együttműködésben az első európai megvalósítást követően 2007-ben kezdett a Pécsi Tudományegyetemen működni Európában a második, a világon az ötödik ilyen lézer.

## 2. Kutatási célkitűzések

Kutatásunk alapvető célja egy viszonylag alacsony feszültséggel ( $U = 150-200$  kV) működő, tényleg „asztali” méretű, z-pinch kisüléssel gerjesztett  $\text{Ar}^{8+}$  lágyröntgenlézer megépítése volt. A kutatás során a lehető legegyszerűbb, gyakorlati szempontból is jól használható megoldásokat kerestük. A rendszer fejlesztésében feladatom az elektromos/optikai indítórendszer, az előionizációs áramkör, a detektorrendszer, a vákuum- és gázrendszer megtervezése, fejlesztése, és elsősorban az elektromos rendszer megvalósítása volt.

Munkám célja volt, hogy az elektromos gerjesztőrendszer modellezésével és kísérleti optimalizálásával meghatározzam az elektromos gerjesztőrendszernek a legjobb lézerparaméterek eléréséhez szükséges elektromos paramétereket üzembiztos működés mellett.

Céлом volt, hogy a kifejlesztett rendszerrel a lézerműködést optimalizáljam úgy, hogy a lehető legnagyobb kimeneti impulzusenergiát és legfeljebb  $\sim 1$  mrad divergenciájú, Gauss-szerű nyalábot biztosító,  $46,9$  nm hullámhosszúságú, jól szinkronizálható koherens sugárzást állítsak elő. Ezzel az eddigi konstrukciókhoz képest a legkedvezőbb, tisztán Gauss-szerű nyalábot sikerüljön előállítani  $\sim 10$   $\mu\text{J}$  kimeneti impulzusenergiával.

Az eddigi vizsgálatok szerint az előkisülés áramkörével biztosított kezdeti homogén plazma nélkülözhetetlen az ilyen lézerek megvalósításánál. Eddig csak elméleti leírása volt ismert az ún. csúszókisüléssel történő magnetoelektromos plazmastabilizálásnak a kapilláris kisüléssel működő lézerekben [13]. Célul tűztem ki, hogy megmutassam, hogy a kapilláris kisüléssel gerjesztett  $\text{Ar}^{8+}$  lágyröntgenlézer

megvalósítható külső előkisülést biztosító áramkör nélkül, így a csúszókisüléssel történő magnetoelektromos plazmastabilizáló hatást elsőként kísérletileg is megvalósítsam.

A lézer egyik kritikus pontja a vízben önkisüléssel beinduló szikraköz. Az átütés időpontja rendkívül ingadozik, ami nemcsak a lézerhez kapcsolódó más elektronikus eszközökkel való együttműködést (szinkronizáció) nehezíti, hanem lövésről lövésre változik a kapillárisra kapcsolt feszültség, ezzel minden fontos lézerparaméter. Ezért Munkám további célja volt, hogy a kapilláris kisüléssel gerjesztett  $\text{Ar}^{8+}$  lágyröntgenlézerben a kapilláris kisülés vízben elhelyezett szikraközének külső, optikai lézeres indításával a lágyröntgen lézersugárzás impulzusának időbeli bizonytalanságát legfeljebb 10 ns értékűre csökkenteni a lézer jobb szinkronizálhatósága, stabilitása érdekében.

### **3. Módszerek**

A kapilláris kisüléshez szükséges nagyfeszültséget egy hatfokozatú Marx-generátor biztosítja, amely 140-240 kV feszültséget állít elő. Az elektromosan árnyékolt, ioncserélt vízzel feltöltött lézeregységet a kapilláris és a gyors kisülési kör további elemei alkotják. A gyors kisülési kör fő részei az energiatároló kondenzátor, amely az önvezérelt vagy akár külső lézerrel vezérelhető szikraközön át, koaxiálisan és a lehető legkisebb induktivitású elrendezésben csatlakozik a kapillárishoz. A maximálisan 45 cm hosszúságú, 3,1 mm belső átmérőjű  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kapillárisban a gyors kisülést két lépcsőben hozzuk létre. Első lépcsőben a Marx-generátor által előállított feszültségimpulzussal egy induktivitáson keresztül töltjük fel az energiatároló kondenzátort. Ennek a kondenzátornak az alacsony induktivitású hozzávezetések

történő kisülése biztosítja a kapilláris áramának gyors felfutását a második lépcsőben. A kezdeti homogén kisülést biztosító előionizációs (preionizációs) egységet a lézeregység oldalához erősített, árnyékolt dobozba építettük be. Ezzel, és a hozzá csatlakozó nagyfeszültségű tápegységgel lehet maximálisan 40 kV-os, 2-3  $\mu$ s szélességű impulzust előállítani az előkisüléshez. Ez az impulzus egy nagyfeszültségtűrésű előionizációs ellenálláson keresztül csatlakozik a kapillárisához. Az egységet külső impulzusgenerátorról indíthatjuk, így az előkisülés és a főkisülés közötti szinkronizálás is biztosított. A kapilláris a nagyfeszültségű oldalán csatlakozik a gázrendszerhez, amely a kapilláris meghatározott nyomású argongázzal való feltöltését biztosítja

A kapilláris a földelt végén egy apertúrán keresztül csatlakozik a vákuumrendszerhez. A cserélhető és pozicionálható, 400  $\mu$ m átmérőjű fém apertúrán keresztül jut ki a sugárzás a kapilláris tengelye mentén, és egyúttal szeparálja a gázrendszert a detektoregységet tartalmazó vákuumkamrától. A vákuumkamrában egy saját építésű, aranykatódos fotocellával detektálható a kimeneti lézerimpulzus, amelynek a jelét oszcilloszkóppal figyeltem. Az impulzusenergia mérésére egy kalibrált SXUV-100AL (IRD Inc.) fotodiódát használtam. A vákuumkamra véglapja cserélhető, így a nyaláb vagy az optikai megfigyelést biztosító foszforenyő, vagy a 10-110 nm tartományra készült, Jobin-Yvon gyártmányú, toroidrácsos spektrométerrel vizsgálható.

## 4. Eredmények

A kutatás során optimalizáltam a Marx-generátor és a gyors kisülési kör közötti energiaátadást, hogy a lehető legkisebb feszültségek mellett a legnagyobb kapilláris csúcsáramot érjem el. Az üzemi feszültség 194 kV, amivel a kapilláris áramának csúcserőértéke 17 kA, valamint a főkisülés áramának félperiódus-ideje 165-175 ns. Kísérleteimben a kezdeti homogén plazmaoszlop előállítására 40 kV csúcsfeszültségű, 3,4  $\mu$ s szélességű előkisülést biztosítottam egy külső áramkörrel. Ezzel a beállítással a lézerből a pozicionálható apertúrán  $9\pm 0,5$   $\mu$ J impulzusenergiájú impulzus lép ki 46,9 nm-es hullámhosszon, 1,8 ns impulzus-félértékszélesség mellett. A lézerműködés nyomástartománya 17 kA kapilláris csúcsáram mellett az argongáz nyomásának 0,22-0,4 mbar közötti értékénél van, a maximális impulzus-amplitúdót pedig 0,27-0,32 mbar értékek között kaptam. Eredményeim azt mutatják, hogy a mások által megvalósított kapilláris kisüléssel gerjesztett  $\text{Ar}^{8+}$  lézerek jellegzetes, a z-pinch összehúzódásból fakadó gyűrű alakú nyalábképét és a mintegy 4 mrad értékű divergenciát 0,29-0,4 mbar közötti nyomásértékeknél kaptam, de a nyomás további csökkentésével a gyűrű Gauss-szerű nyalábbá zsugorodik össze, így 0,2-0,27 mbar nyomástartományon kedvezőbb, 0,8 mrad divergenciát értem el. A lézer 1 Hz ismétlődési frekvenciával működik, és egy kapillárisal több mint  $10^5$  lövésre képes.

Az eddigi tapasztalatokkal szemben a lézer előkisülést biztosító áramkör nélkül is működőképes, ami a lézer méreteinek további csökkentéséhez, felépítésének további egyszerűsödéséhez vezetett. A lézerműködéshez szükséges kezdeti nyomástartomány felső határa ebben az esetben alacsonyabb, 0,36 mbar felett csak spontán sugárzás volt tapasztalható. A kezdeti argongáznyomás 0,3-0,35 mbar közötti értékénél az

impulzusenergiák mintegy 15 %-kal kisebbek a gyűrű alakú nyalábok esetén. A Gauss-szerű nyaláb kialakulása 0,25-0,28 mbar kezdeti argongáz nyomása esetén várható. Ez a tartomány viszont nem változik a külső előionizációnál mért nyomástartományhoz képest, sőt a maximális impulzusenergia itt egybeesik a legjobb, Gauss-szerű nyalábprofillal.

A megépített rendszer időbeli bizonytalansága a főkisülés áramához képest kicsi, 1 ns körüli, de a főkisülés megindulása a Marx-generátor indító jeléhez képest jelentős,  $\pm 250$  ns jitterrel következik be. Külső előionizáció nélkül a jitter  $\pm 500$  ns értékűre növekszik. Az időbeli bizonytalanság csökkentésére a rendszerben a gyors kisülési kör szikraközét egy frekvenciakétszerezett, 532 nm hullámhosszú, 60 mJ impulzusenergiájú Nd:YAG lézerrel indítottam. Így a rendszer időbeli bizonytalansága  $\pm 10$  ns értékűre javult.

## 5. Tézispontok

1. Megadtam a kapilláris kisüléssel gerjesztett, Marx-generátort és gyors kisülési kört tartalmazó  $\text{Ar}^{8+}$  lágyröntgenlézer elektromos gerjesztőrendszerének egy koncentrált paraméterű modelljét, valamint meghatároztam a megvalósított lézerben a modellt alkotó elektromos ellenállások, kapacitások és induktivitások értékeit. A modell segítségével meghatároztam az elektromos gerjesztőrendszer káros átütésektől mentes, adott feszültség esetén a lehető legnagyobb kapilláris csúcáram – és így a legnagyobb áramfelfutási sebesség – eléréséhez a kapilláris kisülési körének kapacitását, az áttöltéshez szükséges induktivitást és a kapilláris kisülési kör szikraközének beállítási módszerét [S1].

2. Kidolgoztam egy zárt, koaxiális kialakítású kisülési körrel és a 45 cm hosszúságú kapillárisal felépített  $\text{Ar}^{8+}$  lágyröntgenlézert, amely a felépítésében, megvalósításában egyszerűsítést jelent a korábbi konstrukciókhoz képest. Ezzel a konstrukcióval meghatároztam a szükséges kezdeti argongáz-nyomástartományt, ahol a lézerműködés kialakul. Meghatároztam a fejlesztett rendszerben a kezdeti nyomás és a kapilláris csúcsáram függvényében a lézer impulzusenergiájának és divergenciájának változását [S1], [S3].
  
3. Az általam meghatározott beállítási paraméterekkel sikerült Gauss-szerű, 10  $\mu\text{J}$  kimeneti impulzusenergiájú, 0,8 mrad divergenciájú lézernyalábot előállítanom. Az irodalomban ennél nagyobb impulzusenergiáról csak gyűrű alakú, 4-7 mrad divergenciájú, vagy gyűrű és középső, 0,5-1 mrad divergenciájú Gauss-szerű nyaláb együttes kialakulása mellett számoltak be [S1], [S3].
  
4. Optimalizáltam a maximális energia és a térbeli koherencia eléréséhez szükséges paramétereket. A maximális időintegrált kimeneti impulzusenergia, illetve a legkisebb divergenciájú nyaláb eléréséhez szükséges kezdeti argongáznyomás nem azonos. A maximális impulzusenergiához szükséges gáznyomásnál 0,1-0,3 mbar értékkel kisebb nyomás esetén érhető el a legkedvezőbb nyalábkép [S1].



5. Kísérletileg alátámasztottam, hogy a kapilláris kisüléssel gerjesztett  $\text{Ar}^{8+}$  lágyröntgenlézer megvalósítható külső előkisülést biztosító áramkör nélkül. A kísérlet megerősíti azt a feltételezést, hogy a kapillárisban – az általam tervezett és megvalósított koaxiális tápvonal hatása révén – transzverzális elektromos tér is kialakul, ami a kapillárisban ún. csúszókisülést hoz létre, és hozzájárul a stabil plazmaoszlop, így a z-pinch kialakulásához [S2], [S3].
  
6. A kapilláris kisüléssel gerjesztett  $\text{Ar}^{8+}$  lágyröntgenlézer 1,8 ns széles impulzusának szinkronizálhatósága érdekében a kapilláris kisülés vízben elhelyezett szikraközét külső, optikai lézerrel indítottam. Ezzel a lézerimpulzusok megjelenésének időbeli bizonytalansága és az energiájának lövésről-lövésre vett stabilitása lényegesen javult. Megmutattam, hogy ezzel a felépítéssel a külső, rendszert indító elektromos impulzushoz képest a kimeneti impulzus időbeli bizonytalansága kisebb, mint 10 ns [S4].

## 6. Saját publikációk

**Az eljárás témakörében készült publikációk:**

***Folyóiratcikkek:***

[S1] J. Szasz, M. Kiss, I. Santa, S. Szatmari, S. V. Kukhlevsky

Critical parameters of the pumping scheme of  $\text{Ar}^{+8}$  lasers excited by z pinches in long capillaries

***CONTRIBUTIONS TO PLASMA PHYSICS*** 52:(9) pp. 770-775. (2012)

- [S2] J. Szasz, M. Kiss, I. Santa, S. Szatmari, S. V. Kukhlevsky  
Magnetoelectric Confinement and Stabilization of Z Pinch in a Soft-x-Ray  
Ar<sup>+8</sup> Laser  
*PHYSICAL REVIEW LETTERS* 110:(18) Paper 183902. 4 p. (2013)

***Könyvfejezet:***

- [S3] J. Szasz, M. Kiss, I. Santa, S. Szatmari, S. V. Kukhlevsky  
Table-Top Soft X-ray Ar<sup>+8</sup> Lasers Excited By Capillary z-pinch  
In: Bleiner D, Costello J, Dortan F, O'Sullivan G, Pina L, Michette A (szerk.)  
Short Wavelength Laboratory Sources: Principles and Practices. London: The  
Royal Society of Chemistry, 2015. pp. 85-101. (ISBN:978-1-84973-456-1)

***Szabadalom:***

- [S4] Almasi G., Kiss M., Kuhlevszkij Sz., Santa I., Szatmari S., Szasz J.  
Method and apparatus for synchronized starting of soft X-ray laser  
Lajstromszám: US 8,792,522 B2 Benyújtás éve: 2011. Közzététel éve: 2014  
Benyújtás helye: Amerikai Egyesült Államok  
Oltalmi formák /USA szabadalom /Tudományos

***Konferenciaközlemények:***

Szász János, Kiss Mátyás, Kuhlevszkij Szergej, Sánta Imre, Szatmári Sándor  
Magnetoelektromos z-pinch stabilizálás kapilláris kisüléssel gerjesztett Ar<sup>+8</sup>  
lágyröntgen-lézerben.

In: Kvantumelektronika 2014: VII. Szimpózium a hazai kvantumelektronikai  
kutatások eredményeiről. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország,  
2014.11.28p. P17.

Szasz J., Kiss M., Santa I., Szatmari S., Kuhlevszkij Sz.

A lézerparaméterek vizsgálata z-pinch gerjesztésű Ar<sup>+8</sup> lágyröntgen-lézerben  
In: Ádám Péter, Mechler Mátyás Illés (szerk.) "Új fények a fizikában": Fizikus  
vándorgyűlés. 99 p. Konferencia helye, ideje: Pécs, Magyarország,  
2010.08.24 -2010.08.27. Budapest: Eötvös Loránd Fizikai Társulat, pp. 24-27

J. Szász, G. Almási, M. Kiss, Sz. Kuhlevszkij, A. Mérő, I. Sánta, S. Szatmári, R. Told  
Kapilláris kisülés elektromos paramétereinek optimalizálása z-pinch gerjesztésű Ar<sup>+8</sup>  
lágyröntgenlézerben In: Ádám P., Kiss T., Varró S. (szerk.) Kvantumelektronika 2008:  
VI.szimpozium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről. Konferencia  
helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2008.10.17 Budapest: MTA  
SZFKI, 2008. Paper P-56. (ISBN:978-963-06-5922-2)

J. Szász, M. Kiss, G. Almási, J. Hebling, I. Sánta, S. Szatmári, Sz. Kuhlevszkij  
A lézerműködés és a plazmaparaméterek kísérleti és elméleti vizsgálata z-pinch  
gerjesztésű Ar<sup>+8</sup> lágyröntgenlézerben  
In: Ádám P., Kiss T., Varró S (szerk.)  
Kvantumelektronika 2008: VI.szimpozium a hazai kvantumelektronikai kutatások  
eredményeiről. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2008.10.17  
Budapest: MTA SZFKI, 2008. Paper P-57. (ISBN:978-963-06-5922-2)

S. V. Kukhlevsky, J. Szász, M. Kiss, G. Almási, J. Hebling, I. Sánta  
Experimental and Theoretical Studies of Lasing and Plasma Processes in a Soft X-Ray  
Ar<sup>+8</sup> Laser Excited by Capillary Z-Pinches  
Konferencia helye, ideje: Siófok, Magyarország, 2008.09.13-2008.09.18.  
2008. International conference. Advanced Laser Technologies 2008 (ALT9'08)

S. V. Kukhlevsky, J. Szász, M. Kiss, G. Almási, J. Hebling, I. Sánta, S. Szatmári  
Experimental and Theoretical Studies of Lasing and Plasma Processes in a Soft X-Ray  
Ar<sup>+8</sup> Laser Excited by Capillary Z-Pinches  
In: Proceedings of Advanced Laser Technology '08 Conference. Konferencia helye,  
ideje: Siófok, Magyarország, 2008.09.13 -2008.09.16. p.

S. V. Kukhlevsky, J. Szász, M. Kiss, G. Almási, J. Hebling, I. Sánta, S. Szatmári  
Lasing and Plasma Processes in a Soft X-Ray Ar<sup>8+</sup> Laser Excited by Capillary  
Z-Pinches

In: The 7th International Conference on Dense Z-pinches 18th - 21st August 2008  
Alexandria. Konferencia helye, ideje: Alexandria, Amerikai Egyesült Államok,  
2008.08.18 -2008.08.21. pp. 1-7.

S. V. Kukhlevsky, J. Szász, G. Almási, J. Hebling, I. Sánta, S. Szatmari

Soft-x-ray Ar<sup>8+</sup> lasers by non-ablative slow Z-pinches in 0.5-m capillaries: Experiment  
and theory

In: 23rd Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized  
Gases: Experiment and theory. Konferencia helye, ideje: Kopaonik, Szerbia és  
Montenegro, 2006.08.28 -2006.09.01. p. 1.

## 7. Irodalom

- L. B. Da Silva, J. E. Trebes, S. Mrowka, T. W. Barbee, Jr., J. Brase, J. A. Koch, R. A. London, B. J. MacGowan, D. L. Matthews, D. Minyard, G. Stone, T. Yorkey, E. Anderson, D. T. Attwood, and D. Kern, *Opt. Lett.* **17**, 754 (1992).
- [2] J. Nejd, I. D. Howlett, D. Carlton, E. H. Anderson, W. Chao, M. C. Marconi, J. J. Rocca, and C. S. Menoni, *IEEE Photon. J.* **7**, 1 (2015).
- [3] A. Ritucci, A. Reale, P. Zuppella, L. Reale, P. Tucceri, G. Tomassetti, P. Bettotti, and L. Pavesi, *J. Appl. Phys.* **102**, 034313 (2007).
- [4] J. J. Rocca, D. C. Beethe, and M. C. Marconi, *Opt. Lett.* **13**, 565 (1988).
- [5] J. J. Rocca, V. Shlyaptsev, F. G. Tomasel, O. D. Cortazar, D. Hartshorn, and J. L. A. Chilla, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 2192 (1994).
- [6] I. A. Artyukov, B. R. Benware, A. V. Vinogradov, Y. S. Kas'yanov, V. V. Kondratenko, C. D. Macchietto, A. Ozols, J. J. Rocca, and J. L.-A. Chilla, *Quantum Electron.* **30**, 328 (2000).
- [7] C. A. Tan and K. H. Kwek, *J. Phys. D Appl. Phys.* **40**, 4787 (2007).
- [8] A. Ritucci, G. Tomassetti, A. Reale, L. Palladino, L. Reale, F. Flora, L. Mezi, S. V. Kukhlevsky, A. Faenov, and T. Pikuz, *Appl. Phys. B* **78**, 965 (2004).
- [9] G. Niimi, Y. Hayashi, M. Nakajima, M. Watanabe, A. Okino, K. Horioka, and E. Hotta, *J. Phys. Appl. Phys.* **34**, 2123 (2001).
- [10] A. Ben-Kish, M. Shuker, R. A. Nemirowsky, A. Fisher, A. Ron, and J. L. Schwob, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 015002 (2001).
- [11] Y. Zhao, Y. Cheng, B. Luan, Y. Wu, and Q. Wang, *J. Phys. Appl. Phys. D* **39**, 342 (2006).
- [12] S. Heinbuch, M. Grisham, D. Martz, and J. J. Rocca, *Opt. Express* **13**, 4050 (2005).
- [13] S. V. Kukhlevsky, *Europhys. Lett.* **55**, 660 (2001).