

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Fizika Doktori Iskola

Lézerfizika, Nemlineáris Optika és Spektroszkópia
Program



Alacsony feszültségű Z-pinch plazmák és kapilláris röntgenlézerek

Doktori disszertáció

Fekete Balázs

Témavezető:

Kuhlevszkij Szergej, DSc

Pécs, 2023

1. Bevezetés

A kapilláris-kisüléssel gerjesztett lézerek (a mai technológiai fejlődés léptékében mérve) viszonylag nagy múltra visszatekintő terület, ugyanis közel 30 éve léteznek ilyen rendszerek. Kezdetben (és gyakori esetben manapság is) a kutatócsoportok a J. J. Rocca és munkatársai által javasolt [1], majd gyakorlatban kivitelezett rendszerének sémáját alkalmazták [2]. Noha vannak kutatások, amelyek a Rocca által bemutatott rendszernél rövidebb (<15 nm) hullámhossz tartományt céloznak meg [3], a gyakorlatban stabilan működő és széleskörben alkalmazott berendezések mind $46,9$ nm-es (vagy hosszabb) hullámhosszon működnek. Ezen a hullámhossz-tartományon fontos gyakorlati alkalmazások válnak lehetővé mind a gyógyításban, mind az anyagtudományokban egyaránt, de elsősorban továbbra is kutatásokban alkalmazzák őket. Népszerű kutatások, amelyekben lágyröntgen tartományú sugárzást alkalmaznak pl. röntgen mikroszkópia [4], röntgenlitográfia [5], vagy termális abláció polimerekben (PMMA) [6]. A kapilláris-kisüléssel történő gerjesztés

esetében két fő gerjesztési séma létezik. Az első az elektronütközéses rekombinációs pumpálási sémán alapul, amely a teljesen lecsupaszított hidrogénszerű ionok rekombinációját használja fel. Ekkor kellően gyors hűtés esetén a Balmer-alfa átmenethez tartozó energiaszintek populáció inverzióját lehet megvalósítani. A spontán emisszió felerősítésének másik módja az elektronütközéses ionizációs pumpáláson alapul: ez a populáció inverzió létrehozásához Ne- vagy Ni-szerű ionok gyors gerjesztését használja. A gyakorlatban leginkább ez utóbbi gerjesztési sémát alkalmazzák a kutatócsoportok, ahol aktív közegként nagy tisztaságú Argént használnak. Az ilyen rendszerekben megfelelő gerjesztés esetén a neonszerű Ar^{+8} ionok 46,9 nm-es hullámhosszú átmenetén valósul meg a lézerműködés. A gerjesztéshez 0,2 - 1 MV nagyságrendű feszültséget alkalmaznak (10 - 100 kA csúcsáram mellett), amelyhez többnyire nagyfeszültségű Marx-generátorokat használnak. Az ilyen berendezések nagyméretűek és költségesek, ezért a gerjesztőfeszültség csökkentése (ideális esetben minimalizálása) elengedhetetlen a

kisméretű és relatíve olcsó, gyakorlatban jól használható rendszerek tervezéséhez.

2. Célkitűzések

Az elmúlt közel 30 év során a kutatócsoportok leginkább a Rocca-féle Marx-generátor alapú, C-C áttöltési módban működő rendszert használták és tökéletesítették [7], [8], [9], [10], [11]. Vannak azonban előremutató kutatások is, ilyenek pl. a hullámhossz további csökkentése, aktív közeg hosszának jelentős mértékű kiterjesztése (rezonátorokkal vagy még hosszabb kapillárisokkal) és a miniatürizálás [12], [13], [14]. Ez utóbbi legnagyobb akadálya a még mindig rendkívül nagy (0,2 - 1 MV) feszültségű gerjesztőrendszerek alkalmazása. Figyelembe véve a jelenlegi kutatási lehetőségeket, fő célom új gerjesztési technikák vizsgálata és kifejlesztése volt.

Célkitűzésem volt, hogy kísérletileg megvizsgáljam az alacsony áramú kapilláris kisülésű röntgenlézerek gerjesztésének és asztali méretű rendszerek megvalósításának egy alternatív lehetőségét. Ehhez egy Szegeden (eredetileg más célra) épített impulzus

transzformátorral szerelt LC inverziós tápegységet használtam. Célom volt, hogy lézerműködést érjek el < 10 kA amplitúdójú gerjesztőárammal egy nem Marx-generátoros gerjesztőrendszer segítségével.

A Marx-generátorok kifejezetten gyors felfutású áramimpulzusok létrehozásához tervezett berendezések, azonban kapilláris kisülésű röntgenlézerekben a C-C áttöltési üzemmódban való használatuk terjedt el. Ebben az elrendezésben, gyakorlatban nagyméretű peaking kondenzátorokat alkalmaznak. A peaking kondenzátor elhagyásával jelentős méretcsökkentés érhető el, továbbá a hosszabb kapillárisok alkalmazása is egyszerűbbé válna. Célom volt, hogy megvizsgáljam extrém (~ 1 m) hosszú kapillárisokban létrehozott Z-pinch kisülések lehetőségét, lézerműködés elérése céljából (közvetlen Marx-generátoros gerjesztéssel).

A SZTE-el közösen kifejlesztettünk egy olyan (kifejezetten kapilláris kisülésű röntgenlézerekhez tervezett) LC inverziós tápegységet, amellyel rendkívül alacsony 40 - 50 kV gerjesztőfeszültség mellett nagyáramú (16 - 18 kA) kisüléseket lehet létrehozni.

Célom volt, hogy megalkossam azt a kísérleti elrendezést, amelyben lehetséges alacsony (< 50 kV) feszültséggel, Marx-generátor nélkül lézerműködést megvalósítani 46,9 nm-en.

3. Módszerek

Célkitűzéseim vizsgálatához három különböző gerjesztőrendszert alkalmaztam. Az alacsony áramú Z-pinch kisülések létrehozásához egy impulzus-transzformátorral szerelt LC inverziós tápegységet használtam. A tápegység maximális (100 kV) gerjesztőfeszültség mellett ~ 9 kA amplitúdójú, 150 ns félperiódusú áramimpulzusokat képes létrehozni.

A közvetlen Marx-generátoros gerjesztést a területen extrém hosszúságúnak számító 95 cm hosszúságú kapillárisok vizsgálatához használtam. Ebben az elrendezésben a kapilláris köztes tároló (ún. peaking kondenzátor) nélkül kapcsolódott a Marx-generátor kimenetéhez. A kísérletekben először 6 fokozattal használtam a Marx-generátort, később a fokozatok számát

8-ra növeltem. Így az elérhető csúcsáram 20 - 25 kA nagyságú a maximális ~320 kV gerjesztő-feszültségen.

Az alacsony (<50 kV) feszültségű kapilláris kisülésű röntgenlézerek vizsgálatához a SZTE-el közösen kifejlesztettünk egy olyan LC inverziós tápegységet, amellyel 16 - 18 kA amplitúdójú áram-impulzusokat lehet létrehozni. Ehhez a korábban alkalmazott impulzus-transzformátorral szerelt tápegységet fejlesztettük tovább, ahol fő szempont volt az elérhető csúcsáram maximalizálása. A továbbfejlesztett tápegységbe beépítésre került egy szikraköz és egy előváll kioltó áramkör is.

4. Eredmények

A SZTE Nagy Intenzitású Lézer Laboratórium által kifejlesztett LC inverziós, impulzus-transzformátoros tápegységgel sikeresen hoztunk létre kapilláris Z-pinch kisüléseket. Ezen kutatás mellett párhuzamosan - célkitűzésünknek megfelelően- megvizsgáltuk extrém (~1 m) hosszú kapillárisokban a Z-pinch plazma létrehozásának lehetőségét is. Feladatom ezekben a

kutatásokban a lézercső felépítése és a mérések elvégzése volt. Mindkét kutatás során új típusú gerjesztési módszereket mutattunk be, ahol erős spontán sugárzást sikerült előállítani. A továbbfejlesztett (impulzus-transzformátor nélküli) LC inverziós tápegységhez módosítottam a korábban alkalmazott lézercső felépítését. Meghatároztam a lézerműködéshez szükséges ideális kísérleti paramétereket. Különböző induktivitás csökkentési technikákat alkalmaztam, melyek közül a koaxiális kialakítással sikerült lézerműködést produkálni. A lézerműködés 22 cm hosszúságú, 3,2 mm belső átmérőjű Al_2O_3 kapillárisal, 23 - 27 kV gerjesztőfeszültség mellett 0,19 - 0,23 mbar kezdeti Argónyomás esetén volt megfigyelhető. Megmértem az impulzus energiát (maximum $\sim 4 \mu\text{J}$), impulzus időt ($\sim 1,6$ ns), divergenciát ($\sim 1,9$ mrad). Meghatároztam a nyaláb profilt, amely minden esetben Gauss-szerű és megmértem a spektrumot is, ahol a 46,9 nm hullámhosszúságú vonal volt a domináns. Kísérletileg megmutattam, hogy lehetséges 50 kV csúcsfeszültség alatti gerjesztőrendszerrel kapilláris kisülésű lágyröntgen lézereket hatékonyan pumpálni, így ezek a rendszerek is a

nitrogén és excimer lézerek feszültségtartományába hozhatók. A teljesen koaxiális kialakítással gyors (~15 ns) felfutású 16 - 18 kA amplitúdójú áramimpulzusokat lehet létrehozni, amelyek alkalmasak az Ar^{+8} ionok 46,9 nm-es hullámhosszú átmenetén megvalósítani a lézerműködést. A gyors felfutás a rendszer saját induktivitásának tranziens módon történő kioltásának következménye. A 22 cm hosszúságú és 3,2 mm belső átmérőjű kapillárisoknál bevált rendszert 35 cm hosszúságú és 3,2 mm belső átmérőjű kapillárison tesztelve szintén sikerült lézerműködést demonstrálni az áram felfutásának jelentős csökkenése nélkül ($\sim 1,5\text{-}2 \cdot 10^{12}$ A/s). Ez tovább bizonyítja azt, hogy a kapilláris hossz (és így a rendszer saját induktivitásának) jelentős mértékű növelésével a teljesen koaxiális kialakításnak köszönhetően tranziens módon mindig kialakul az induktivitás kioltás. Ez felveti a még hosszabb (0,5 - 1 m) kapillárisok alkalmazásának lehetőségét is. A saját rendszerünkkel, teljesen koaxiális kialakítással létrehozott áramimpulzusok karakterisztikája, azaz a gyors ~15 ns-os felfutást követő 10-15 ns alatt a csúcáramhoz képest >50% visszaesés az áramban alkalmas lehet rekombinációs gerjesztésre is.

5. Tézispontok

1. Kísérletileg megmutattam, hogy alacsony áramú (< 9 kA) impulzus transzformátoros LC inverziós tápegységgel létre lehet hozni kapilláris Z-pinch kisüléseket, ahol erős spontán sugárzást sikerült elérni 22 cm hosszúságú 3,2 mm belső átmérőjű kapillárisokban [E3], [P1].
2. Kísérletileg megmutattam, hogy extrém (~ 1 m) hosszú kapillárisokban közvetlenül Marx-generátorról, C-C áttöltés nélkül is, hatásosan lehet gerjeszteni kapilláris kisülésű röntgenlézereket. Ennek közvetlen bizonyítéka a detektált erős spontán sugárzás [E1], [E2].
3. Kísérletileg megmutattam, hogy lehetséges 50 kV csúcspotenzívitás alatti kapilláris kisülésű lágyröntgenlézereket létrehozni, melyek így a hagyományos nitrogén és excimer lézerek működési feszültségtartományába sorolhatók [S1].
4. Kísérletekkel igazoltam, hogy az általunk kifejlesztett alacsony feszültségű (< 50 kV) gerjesztőrendszerrel 22 cm hosszúságú és 3,2 mm belső

átmérőjű kapillárisokban létrehozott Z-pinch plazmával megvalósítható lézerműködés 46,9 nm-en. A keletkezett nyaláb alakja Gauss-szerű profillal rendelkezik, impulzusenergiája pedig 4 μ J [S1].

5. Kísérletileg bizonyítottam, hogy az alacsony feszültségű (< 50 kV) LC inverziós tápegységgel kizárólag csak akkor lehet hosszabb ($l > 22$ cm) kapillárisokban gyors ~ 15 ns-os felfutású, 16-18 kA amplitúdójú gerjesztőáramokat létrehozni, hogyha a kapillárist koaxiálisan leárnyékoljuk, a két végén leföldelt, jó vezetőképességgel rendelkező burkolattal. Ez a megoldás új utat jelenthet a további méretcsökkentés (akár félvezető alapú kapcsolási technikák) felé [S2], [S3].

6. Saját publikációk

Folyóiratcikkek

[S1] B. Fekete, M. Kiss, A.A. Shapolov, S. Szatmari and S.V. Kukhlevsky, „Soft x-ray Ar+8 laser excited by low-voltage capillary discharge”, Optics Express, vol. 31, no. 21, pp. 34381-(doi: 10.1364/OE.498927) 2023.

[S2] B. Fekete, M. Kiss, A. A. Shapolov, S. Szatmari, and S. V. Kukhlevsky, „Low-voltage capillary Z-pinchs with short rise times and high currents for portable soft X-ray Ar+8 lasers”, Transactions on Plasma Science, 2023, publikációra elküldve.

[S3] B. Fekete, M. Kiss, A. A. Shapolov, S. Szatmari, and S. V. Kukhlevsky, „Short rise and decay time z-pinch currents for soft-x-ray laser excitation”, Physical Review Letters, 2023, publikációra elküldve.

Előadások

[E1] Fekete Balázs, Sapolov Anatolij, Kiss Mátyás, Szatmári Sándor, Kuhlevszkij Szergej „1m Hosszú Kapilláris Röntgenlézer Közvetlen Marx-generátoros Gerjesztéssel” In: (dof)φ - Fizikus Doktoranduszok Konferenciája (DOFFI 2019). Konferencia helye: Balatonfenyves, Magyarország, 2019.06.13-16. p. 9-10.

[E2] Fekete Balázs, Sapolov Anatolij, Kiss Mátyás, Kuhlevszkij Szergej, Szatmári Sándor „Preliminary Experiments for 1m Long Capillary Discharge Ar+8 X-ray

Lasers and Waveguides” In: VIII. Interdiszciplináris Doktorandusz Konferencia. Konferencia helye, ideje: Pécs, Magyarország, 2019.05.24-25. p. 14.

[E3] Fekete Balázs, Sapolov Anatolij, Kiss Mátyás, Kuhlevszkij Szergej, Szatmári Sándor „Developing Low Current Impulse Transformer for Capillary Z-Pinch Ar+8 Lasers And Waveguides” In: XVI. János Szentágothai Multidiszciplináris Konferencia és Tanulóverseny. Konferencia helye, ideje: Pécs, Magyarország, 2019.02.14-15. p. 37

[E4] Fekete Balázs, Sapolov Anatolij, Kiss Mátyás, Szatmári Sándor, Kuhlevszkij Szergej „Impulzus-transzformátor fejlesztése alacsony áramú kapilláris kisműveléssel gerjesztett lágyröntgen-lézerekhez” in: (dof)φ - Fizikus Doktoranduszok Konferenciája (DOFFI 2018). Konferencia helye: Balatonfenyves, Magyarország, 2018. Június 14. - Június 17.

Poszterek

[P1] B. Fekete; M. Kiss; A. A. Shapolov; S. Szatmári; S. V. Kukhlevsky „Soft X-ray Ar+8 lasers and wake-field electron accelerators by using low-current capillary Z-pinches” In: Kvantumelektronika: IX. Szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről: (doi: 10.14232/kvantumelektronika.9.7) pp. 39-44 Szeged, 2020.

[P2] B. Fekete, M. Kiss, A.A. Shapolov, S. Szatmari, S.V. Kukhlevsky „Development of soft X-ray Ar+8-lasers excited by low-current capillary Z-pinch discharges” In: The 3rd EMN Meeting on Photonics. Konferencia helye, ideje: Kaohsiung, Taiwan, 2018.10.21-2018.10.25. p. 36.

[P3] B Fekete, A A Shapolov, M Kiss, S Szatmari, S V Kukhlevsky, „Impulse Transformer for Sub 9 kA Capillary Z-Pinch Ar+8 Lasers and Waveguides” In: V Aubrecht, V Celedova Plasma Physics and Technology. Konferencia helye, ideje: Prague, Csehország, 2018.06.18-2018.06.21. Prague: Czech Technical University in Prague, 2018. p. 30. 48 p.

[P4] Fekete Balázs, Sapolov Anatolij, Kiss Mátyás, Szatmári Sándor, Kuhlevszkij Szergej „Röntgenlézer Gerjesztése Impulzus-Transzformátorral” In: Kvantumelektronika 2018: VIII. Szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2018.06.15 Pécs: Pécsi Tudományegyetem Természettudományi Kar (PTE TTK), 2018. pp. 48-49. (ISBN: 978-963-429-250-0)

[P5] B Fekete, A A Shapolov, M Kiss, S Szatmári, S V Kuhlevsky „Capillary Z-pinch plasma generated by impulse transformer” In: 45th IOP PLasma Physics Conference: Programme and Abstract Book. Konferencia helye, ideje: Belfast, Egyesült Királyság / Észak-Írország, 2018.04.09-2018.04.12. London: Institute of Physics (IOP), p. 45. 61 p.

7. Hivatkozások

- [1] J. J. Rocca, D. C. Beethe and M. C. Marconi, "Proposal for soft-x-ray and XUV lasers in capillary discharges," *Optics Letters*, vol. 13, no. 7, pp. 565-567, 1988.
- [2] J. J. Rocca, V. N. Shlyaptsev, F. G. Tomasel, O. D. Cortázar, H. Hartshorn and J. L. A. Chilla, "Demonstration of a Discharge Pumped Table-Top Soft-X-Ray Laser," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 72, no. 16, pp. 2192 - 2195, 1994.
- [3] K. Kolacek, J. Schmidt, V. Prukner, O. Frolov and J. Straus, "Ways to discharge-based soft X-ray lasers with the wavelength $\lambda < 15$ nm," *Cambridge University Press*, vol. 26, no. 2, pp. 167-178, 2008.
- [4] D. L. Silva, J. E. Trebes, S. Mrowka, J. T. Barbee, J. Brase, J. A. Koch, R. A. London, B. J. Macgowan and D. L. Matthews, "Demonstration of x-ray microscopy with

an x-ray laser operating near the carbon K edge,” *Opt. Lett.*, vol. 17., no. 10., pp. 754-6, 1992.

[5] A. Ritucci, A. Reale, P. Zuppela, E. Reale, P. Tucceri, G. Tomasetti, P. Bettotti and L. Pavesi, “Interference lithography by a soft x-ray laser beam: Nanopatterning on photoresists,” *J. Appl. Phys.*, vol. 102., 2007.

[6] O. Frolov, K. Kolacek, J. Straus, J. Schmidt, V. Prukner and A. Shukurov, "Generation and application of the soft X-ray laser beam based on capillary discharge," *Journal of Physics: Conference Series* 511, 2014

[7] Y. Zhao, Y. L. Cheng, Q. Wang and D. W. Yang, “Device of capillary discharge with pre-pulse and main pulse to excite soft X-ray laser,” *High Power Laser and Particle Beams*, vol. 16, no. 6, pp. 732-6, 2004.

[8] C. A. Tan and H. K. Kwek, “Development of a low current discharge-driven soft x-ray laser,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 40, pp. 4787-92, 2007.

[9] Y. Sakai, Y. Kakuya, X. Yifan, T. Hiroaki, H. Yasushi, G. Hamid, W. Masato, O. Akitoshi, H. Kazuhiko and H.

Eiki, "Performance of soft x-ray laser pumped by capillary discharge," International Atomic Energy Agency, pp. 39-42, 2005.

[10] M. Nevrkla, A. Jancarek, P. Vrba and M. Vrbova, "Capillary discharge apparatus for intense XUV radiation generation," in Pulsed Power Conference, 2009 IET European, Svájc, 2009

[11] M. Vrbova, A. Jancarek, P. Vrba, M. Nevrkla and P. Kolar, "XUV Radiation Emitted by Capillary Pinching Discharge," in X-Ray Lasers, Springer, 2010, pp. 257-62.

[12] S. Heinbuch, M. Grisham, D. Martz and J. J. Rocca, "Demonstration of a desk-top size high repetition rate soft x-ray laser," Optics Express, vol. 13, no. 11, pp. 4050-55, 2005.

[13] S. Barnwal, S. Nigam, K. Aneesh, R. S. Prasad, M. I. Sharma, P. K. Tripathi, S. A. Joshi, P. A. Naik, S. H. Vora and P. D. Gupta, "Exploring X-ray lasing in nitrogen pinch plasma at very high and fast discharge current excitation," Appl. Phys. B., vol. 123, no. 178, 2017.

[14] M. Nevrkla, J. Hubner, J. Sisma, P. Vrba, M. Vrbova, N. Bobrova, P. Sasorov and A. Jancarek, “A Study of Current Controlled Discharge in a Nitrogen Filled Tube,” *Applied Sciences*, vol. 11, 2021.