

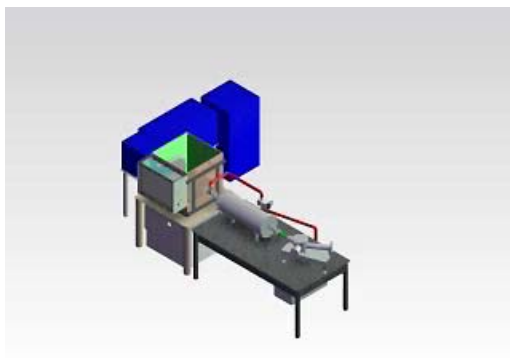
**Részletes zárójelentés**  
"Kisüléssel gerjesztett lágyröntgen lézer kutatása"  
(OTKA T/F 046811, 2004-2006)

A kutatási projekt eseményeinek, előrehaladásának és eredményeinek részletes ismertetése éves bontásban:

**2004**-ben a kutatásunk fő célja a lézer fő komponenseinek, valamint a detektáló rendszernek a megtervezése és összeállítása volt. Az Olaszországban működő példányhoz képest szükséges eltéréseket kívántuk megtervezni és kísérletileg kifejleszteni, azaz kompaktabb elrendezést, kényelmesebb nagyfeszültség előállító és kapcsoló rendszert kívántunk kifejleszteni. Várt **eredmény**: Működő nagyfeszültség előállító, kapcsoló, és mérő rendszer. Működő vákuumrendszer. Működő röntgen detektáló rendszer.

A fenti feladatokat és célokat csupán részlegesen sikerült megvalósítani, mivel az OTKA T/F 046811 témaszámhoz tartozó pénzügyi támogatási összeg csak a gazdasági év végén érkezett meg. A támogatást ezért – egyetemi adminisztratív okok miatt – nem volt módunkban felhasználni. Így csupán azon célokat és feladatokat tudtuk megvalósítani, amelyek nem igényelték ezen pénzügyi támogatást, nevezetesen:

- 1) Megterveztük a lézer fő komponenseit (nagyfeszültség-előállító Marx-generátor – kimenő feszültség: 300 kV; csúcs áramerősség: 20 kA; eredő kapacitás: 5 nF; induktivitás: 8 mH), valamint a generátor és a lézerfej közötti energiaátvitelt biztosító rendszert.
- 2) Megterveztük a lézerfejet (kapilláris, gyors vízkondenzátor, nagyfeszültségű és -áramú vízi szikraköz), valamint az aktív anyagnak (argon gáz  $\rightarrow$  Ar<sup>+8</sup>) preionizációs rendszerét.
- 3) A detektáló rendszert (alumíniumfólia szűrők, gyors röntgen fotodióda, röntgenlátható fény fluoreszcens – foszfor alapú – átalakító, röntgenspektrométer, Rogowsky-tekerecs az áram méréséhez) megterveztük.
- 4) A vákuum- és gázrendszert megterveztük.



1. ábra. Lézer rendszer.

Az (1-4) pontban feltüntetett eredmények a PTE – Dél-Dunántúli Kooperációs Kutatási Központ 2004. évi záró beszámolójában jelentek meg. A teljes lézer rendszer (1. ábra) műszaki dokumentációja SOLID EDGE 3D gyártási tervező programmal készült.

**2005**-ben a lézer működését tűztük ki célul. El kívántuk érni, hogy az eddig használt 20-40 kA-es áramerősség helyett mindössze 5-15 kA-es árammal is lehessen lézerműködést létrehozni. Ennek segítségével lehetőség nyílna a széleskörű gyakorlati problémákhoz sokkal jobban alkalmazható, valóban kompakt (asztali méretű) lágy-röntgen lézer berendezés megvalósítására. Ha az áram erősségét 5 kA-re csökkentjük, akkor a nagyfeszültségű szikraközöket és Marx-generátorokat helyettesíthetjük tirátronokon alapuló kisebb gerjesztő áramkörökkel. Az elméleti analízishez és a kísérletekkel való összehasonlításhoz a plazma dinamikájának (az összehúzódó kisülésben való) leírásához magneto-hidrodinamikai (MHD) modellünket kívántuk használni. Várt **eredmény**: Működő lágy-röntgen lézer a PTE-n. Legalább kettő dolgozat publikálása nemzetközi folyóiratban.

A 2005-ös évben az előző évben történt pénzügyi elmaradásokat és az ezzel kapcsolatos feladatokat pótoltuk. A 2005-ös évre a következő fő kutatási célokat és feladatokat tűztük magunk elé:

- A lézer fő komponenseinek, valamint a detektáló rendszernek az összeállítása
- Az Olaszországban működő példánytól való szükséges eltérések tervezése és kísérleti fejlesztése (kompaktabb elrendezést, kényelmesebb nagyfeszültség-előállító és kapcsoló rendszert kívántunk kifejleszteni). Várt **eredmény**: működő nagyfeszültség-előállító, kapcsoló és mérőrendszer. Működő vákuumrendszer. Működő röntgendetektáló rendszer.

Ezenkívül célul tűztük ki a lézer potenciális alkalmazásainak elméleti vizsgálatát néhány, manapság rendkívül fontos új kutatási és alkalmazási területen, nevezetesen a hullámhossznál kisebb nanométeres skálán és közeli térben működő optikában ("near-field subwavelength nano-optics"), röntgen fényt fókuszáló polikapilláris optikában és plazma alapú hullámvezető optikában.

A fenti feladatokat és célokat teljes mértékben sikerült megvalósítani, nevezetesen:

- a lézer fő komponenseit (nagyfeszültség-előállító Marx-generátor – kimenő feszültség: 300 kV; csúcs áramerősség: 20 kA; eredő kapacitás: 5 nF; induktivitás: 8 mH), valamint a generátor és a lézerfej közötti energiaátvitelt biztosító rendszert megépítettük (a Marx-generátort és a lézerfej közötti energiaátvitelt biztosító rendszert Prof. Szatmári Sándor és kutató csoportja fejlesztette ki és optimalizálta a Szegedi Tudományegyetemen);
- a lézerfejet (kapilláris, gyors vízkondenzátor, nagyfeszültségű és -áramú vízi szikraköz), valamint az aktív anyag (argongáz  $\rightarrow$  Ar<sup>+8</sup>) preionizációs rendszerét megterveztük és megépítettük [1-4];
- a detektáló rendszert (alumíniumfólia szűrők, gyors röntgen fotodióda, röntgen-látható fény fluoreszcens – foszfor alapú – átalakító, röntgenspektrométer, Rogowsky-tekerics az áram méréséhez) megterveztük és megépítettük;
- a vákuum- és gázrendszert megterveztük és megépítettük [1-4];

- az Olaszországban működő példánynál (lásd 2.a ábrát) kompaktabb elrendezést, kényelmesebb nagyfeszültség-előállító és kapcsoló rendszert (lásd 2.b ábrát) fejlesztettünk ki és építettünk meg [1-4].

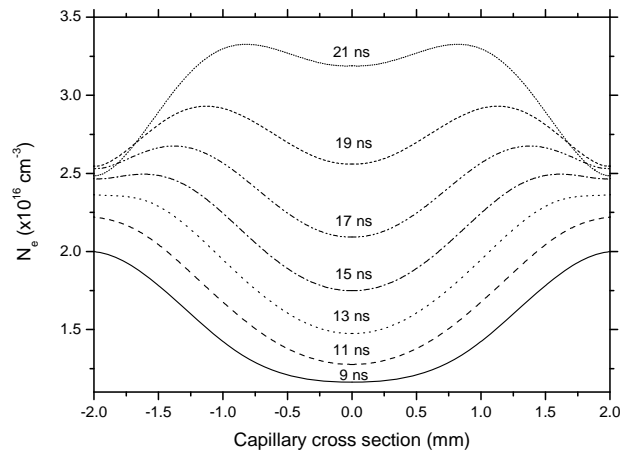
- elméletileg megvizsgáltuk a lézer potenciális alkalmazásait a hullámhossznál kisebb nanométeres skálán a közeli-térben működő optikában ("near-field subwavelength nano-optics") [6,7], a polikapilláris fókuszáló röntgen optikában és a plazma alapú hullámvezető optikában [5,8]. Megmutattuk, hogy a hullámhossznál kisebb nanométeres fém rés segítségével erősíteni lehet a visszavert fény intenzitását (pl. a lézerünk intenzitását) a közeli térben [6,7]. Továbbá megmutattuk, hogy a koherens röntgen fényt (pl. a lézerünk fényét) lehet hatékonyan vezetni és jól fókuszálni a polikapilláris fókuszáló röntgen optikával [8] és a plazma alapú hullámvezető optikában (pl. a lézerünk saját plazmájában, lásd 3. ábrát) [5].



2(a). ábra. Olasz-magyar lézer (Aquilai Tudományegyetem)

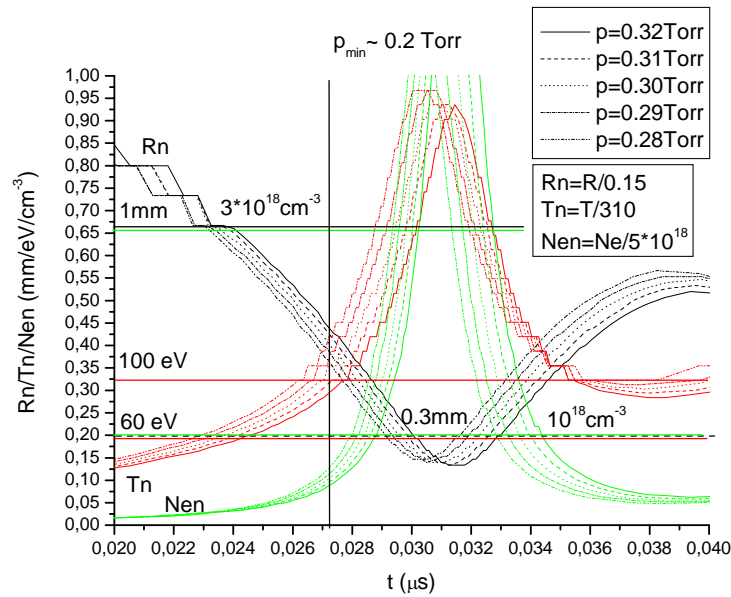


2(b). ábra. Magyar épülő lézer (Pécsi Tudományegyetem)

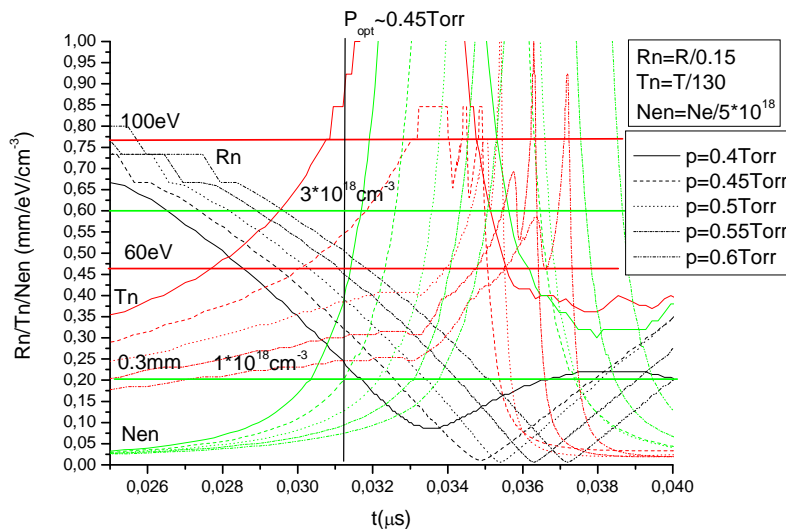


3. ábra. Tipikus elektronsűrűség-eloszlás a kapilláris z-pinch plazma-alapú hullámvezetőben a magneto-hidrodinamikai (MHD) modellünk szerint (pl. a lézerünk saját plazmájában) [5].

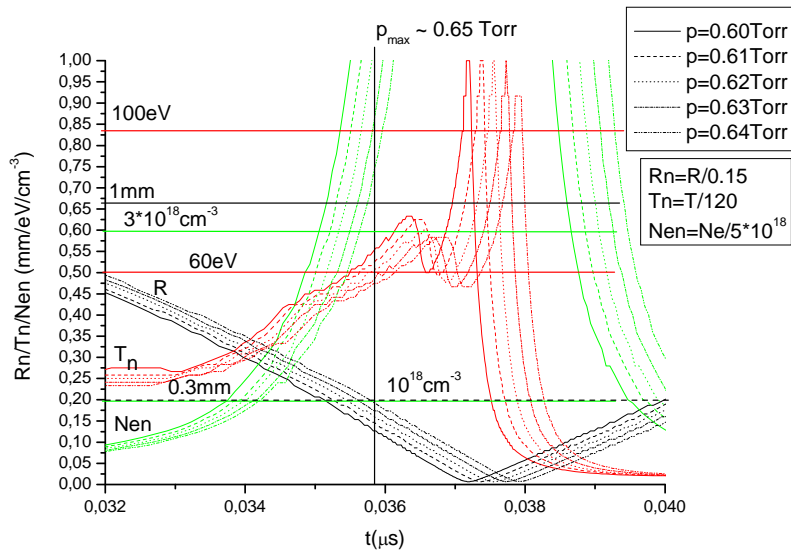
- 2005-ben el kívántuk érni, hogy az eddig használt 20-40 kA-es áramerősség helyett mindössze 5-15 kA-es árammal is lehessen lézerműködést létrehozni. Ennek segítségével lehetőség nyílta a széleskörű gyakorlati problémákhoz sokkal jobban alkalmazható, valóban kompakt (asztali méretű) lágy-röntgen lézer berendezés megvalósítására. Bár ezt kísérletileg nem sikerült megvalósítani, magneto-hidrodinamikai (MHD) modellünk azt mutatta, hogy ez lehetséges a különböző kísérleti paramétereknél (lásd 4. ábrát). [4].



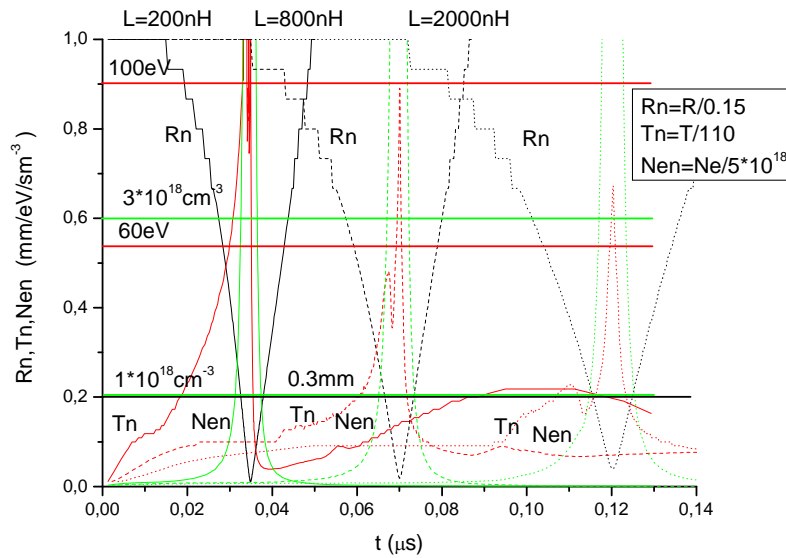
(a)



(b)



(c)



(d)

4. ábra. R a plazma sugara, T a hőmérséklete és N a sűrűsége: a)  $P = P_{\min}$ , b)  $P = P_{\text{opt}}$ , c)  $P = P_{\max}$ . (d)  $P = P_{\text{opt}}$ . [4]

Itt az áramerősség  $I_{\max} \sim 15 \text{ kA}$ ,  $P$  az argongáz nyomása,  $T$  az elektronhőmérséklet és  $N$  a sűrűsége:

- 1)  $P_{\min} \sim 0.2 \text{ Torr}$ ,  $T \gg (60-100\text{eV})$ ,  $N_e < 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
- 2)  $P_{\text{opt}} \sim 0.45 \text{ Torr}$ ,  $T \sim 60-100 \text{ eV}$ ,  $N_e \sim (1-5) \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
- 3)  $P_{\max} \sim 0.65 \text{ Torr}$ ,  $T < 60 \text{ eV}$ ,  $N_e \gg (5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} - 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3})$

A fentiekben felsorolt, elvégzett munkák összefoglalását megjelentettük a PTE – Dél-Dunántúli Kooperációs Kutatási Központjának 2005. évi záró beszámolójában. Az eredményünket, az OTKA támogatására hivatkozva, a következő publikációkban mutattuk be:

- 1) Kuhlevszkij Szergej: Kapilláris kisüléssel gerjesztett lágyröntgen-lézer, Fizikai Szemle, LV, N2, 53-56 (2005).
- 2) Földes B. István, Szatmári Sándor, Kuhlevszkij Szergej: Ultrarövid és koherens ultraibolya és röntgenimpulzusok keltése és alkalmazása, Magyar Tudomány, 2005/12, 1477.o.
- 3) Kukhlevsky, S.V., Almási, G., Hebling, J., Sánta, I., Szatmári, S., Földes, I., Experimental optimization of non-ablative z-pinches in long capillaries for a soft x-ray neon-like argon laser, Plasma Science, 2005. ICOPS'05, IEEE Conference Record – Abstracts, IEEE International Conference, p. 138 (2005) Monterey, CA, USA.
- 4) Kukhlevsky, S.V., Almási, G., Hebling, J., Sánta, I., Szatmári, S., Földes, I., MHD modeling non-ablative Z-pinches in 0.5-meter long capillaries for a soft X-ray laser, 19th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas and Asia Pacific Plasma Theory Conference, ICNSP&APPTC2005, 12-15 July 2005, Nara, Japan.
- 5) Kaiser, J., Liska, M., Samek, O., Egri, T., Ritucci, A., Reale, A., Tomasetti, G., Reale, L., Palladino, L., Kukhlevsky, S.V., Flora, F., Mezi, L., Feanov, A., Pikuz, T.: Non-adiabative capillary z-pinch for plasma-based waveguide, Czech J. Phys. 55, N1, 35-44 (2005).
- 6) Kukhlevsky, S.V., Mechler, M., Csapó, L., Janssens, K., Samek, O.: Resonant backward scattering of light by a subwavelength metallic slit with two open sides, Phys. Rev. B 72, N16, 165421 (2005).
- 7) Mechler, M., Kukhlevsky, S.V.: Anomalous backward scattering of light by a two-side-open subwavelength nano-slit in a metal film, Device and Process Technologies for Microelectronics, MEMS, and Photonics IV,” SPIE Microelectronics, MEMS, and Nanotechnology Symposium, 11-14 December 2005, Brisbane, Australia.
- 8) Janssens, K., Vincze, L., Kukhlevsky, S.V.: Coherent focusing laser-like X-ray radiation by polycapillary lenses, The International Conference on X-ray Optics and Microanalysis, ICXOM 2005, September 25 - 30, 2005 Frascati-Rome, Italy.

**2006**-ben a kutatásunk célja a lézer energiájának és a relatív kis (0,1 Hz) ismétlési frekvenciájának növelése. A lézer ismétlési frekvenciáját a Marx generátor újratöltési sebessége valamint a szikraközök élettartama korlátozza. Tirátron alkalmazásával, akár egy nagyságrenddel növelhető lenne az ismétlési frekvencia. Azért, hogy megoldjuk az előbb említett problémákat, különféle elektromos gerjesztési elrendezések, eltérő kapilláris és elektróda konfigurációk részletes elméleti és kísérleti vizsgálatára van szükség. Ilyen jellegű vizsgálatok szükségesek az optimális Ne-szerű Ar koncentráció eléréséhez, a plazmaoszlopon belüli optimális térbeli eloszlásuk

megvalósításához. Az elméleti analízishez és a kísérletekkel való összehasonlításához a plazma dinamikájának (az összehúzódó kisülésben való) leírásához a magneto-hidrodinamikai (MHD) modellünket kívántuk használni. Várt **eredmény**: Megnövelt átlagteljesítménnyel működő lágy-röntgen lézer. Legalább kettő dolgozat publikálása nemzetközi folyóiratban.

A 2006. és 2007. évben a 2004. és 2005. évben történő elmaradásokat és az ezzel kapcsolatos feladatokat pótoltuk. A 2006-os és 2007-es évben a következő fő kutatási célt tűztük magunk elé:

- Működő lágy-röntgen lézer létrehozása a Pécsi Tudományegyetemen.

E célt teljes mértékben sikerült megvalósítani (lásd, 5. ábrát. [9]). Az előzetes kísérletek azt mutatták, hogy a lézer paraméterek hasonlóak a már korábban publikált olasz-magyar lézeréhez. A kisülés paramétereitől függően (1~20ka) a lézer impulzus energiája közelítőleg 0.5 mJ, a nyaláb divergenciája kb. 1 mrad és a nyaláb transzverzális intenzitásának eloszlása gyűrű, mogyoró (peanut) vagy Gauss alakú. Bár a következő eredményt még nem publikáltuk, a kísérleteink azt mutatták, hogy a relatív kis (0,1 Hz) ismétlési frekvenciával működő "olasz-magyar" lézerhez képest a magyar lézer néhány percig képes kb. 10-szer nagyobb ismétlési frekvenciával működni (2006. évi cél).

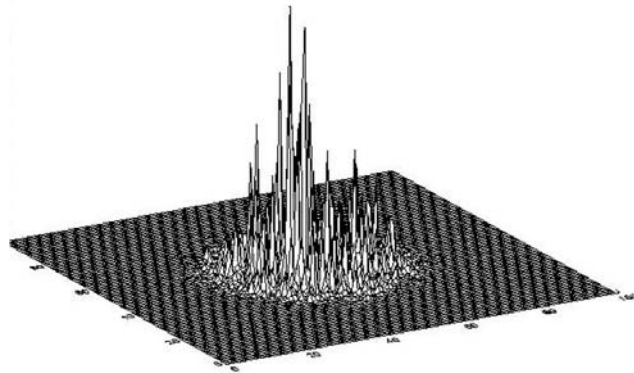
Ezenfelül célul tűztük ki a lézer potenciális alkalmazásainak további elméleti vizsgálatát néhány, manapság rendkívül fontos új kutatási és alkalmazási területen, nevezetesen:

- a hullámhossznál kisebb nanométeres skálán a közeli térben működő optikában ("near-field subwavelength nano-optics")
- röntgen fényt fókuszáló polikapilláris optikában és plazma alapú hullámvezető optikában.

2006-2007-ben elméletileg megvizsgáltuk a lézer potenciális alkalmazásait a hullámhossznál kisebb nanométeres skálán a közeli térben működő optikában [12-15] és a polikapilláris fókuszáló röntgen optikában [10,11]. Továbbá részletesebben mutattuk meg, hogy a hullámhossznál kisebb nanométeres fém rés segítségével meg lehet erősíteni és lokalizálni lehet a visszavert vagy áteresztett fény intenzitását (pl. a lézerünk intenzitását) a közeli térben [12-15]. Továbbá megmutattuk, hogy a koherens röntgen fényt (pl. a lézerünk fényét) lehet hatékonyan vezetni és jól fókuszálni valamint lokalizálni térben és időben a polikapilláris fókuszáló röntgen optikával [10,11] (lásd 6. ábrát).



5. ábra. Pécsi Tudományegyetemen működő lézer [1].



6. ábra. A polikapilláris lencsével 7 mikrométerre fókuszált koherens 0.1-keV-os fény. Modell [10, 11].

A fentiekben felsorolt, elvégzett munkák összefoglalását megjelentettük a PTE – Dél-Dunántúli Kooperációs Kutatási Központjának 2006. évi záró beszámolójában. Az eredményünket a következő publikációkban mutattuk be:

9) Kukhlevsky, S.V., Szász, J., Almási, G., Hebling, J., Sánta, I., Szatmári, S., Földes, I., Soft-x-ray Ar<sup>+8</sup> lasers by non-ablative slow Z-pinches in 0.5-m capillaries: Experiment and theory, 23rd Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, Kopaonik, Serbia and Montenegro, August 28 – September 1, 2006. (invited presentation).

10) Kukhlevsky, S.V., Spatiotemporal Localization of Coherent and Incoherent X-Rays by Mono- and Polycapillary Optics: from Micrometer/Second to Nanometer/Attosecond, International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena, Channeling 2006, 3 - 7 July 2006, Frascati (Rome), Italy (invited presentation).

11) Kukhlevsky, S.V. : Focusing of coherent x-ray radiation by polycapillary lenses, NURT-2006, V. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NUCLEAR & RELATED TECHNIQUES, Havana, Cuba, April 3-7 (invited presentation)



12) Kukhlevsky SV, Mechler M, Samek O, Janssens K., Analytical model of the enhanced light transmission through subwavelength metal slits: Green's function formalism versus Rayleigh's expansion, APPLIED PHYSICS B-LASERS AND OPTICS 84, 19-24 (2006).

13) Kukhlevsky, S.V., Resonant Enhancement and Near-Field Localizations of FS Pulses by Subwavelength NM-Size Metal Slits; in a book: Lasers and electro-optics research at the cutting edge, Steven B. Larkin (editor). New York: Nova Science Publishers, 2006.

14) Kukhlevsky, S.V., Diffraction-free Subwavelength-Beam Optics on Nanometer Scale, in a book: Localized waves / edited by Hugo E. Hernández-Figueroa, Michel Zamboni-Rached, Erasmo Recami, Hoboken, N.J. USA, John Wiley, ISBN: 9780470108857 (2007).

15) Mechler, M., Samek, o., Kukhlevsky, S.V., Enhanced Transmission and Reflection of Few-cycle Pulses by a Single Slit, Phys. Rev. Lett. 98, 163901 (2007).