

Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-16-0612**
Fyzikálne aspekty laserovej diagnostiky pre termojadrovú fúziu

Zodpovedný riešiteľ **RNDr. Dr. Pavel Veis, CSc.**
Príjemca **Univerzita Komenského v Bratislave - Fakulta matematiky, fyziky a informatiky**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Katedra experimentálnej fyziky
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Univerzity Komenského
Mlynská dolina F1
842 48 Bratislava

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

VTT Helsinki, Finland
TU, Tartu, Estonia
DIFFER Eindhoven, Netherlands
IP, CAS, Prague, CR
JSI, Ljubljana, Slovenia
INFLPR, Bucharest, Romania
IPFN, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal
Indian Institute of Technology Kanpur, India
Ewing Christian College, Prayagraj, India
Shizuoka University, Hamamatsu, Japan

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

Žiadne.

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

- [1] P. Veis, A. Marín Roldán, J. Krištof: „Simultaneous vacuum UV and broadband UV-NIR plasma spectroscopy to improve the LIBS analysis of light elements“, In: Plasma Sources Science and Technology. – Vol. 27, No. 9 (2018), (pp18), Art. No. 095001.
Citations: 8
- [2] A. Anušová et al., Kinetics of highly vib. excited O₂(X) molecules in inductively-coupled oxygen plasmas, Plasma Sources Science and Technology 27(4) (2018) 045006
Citations: 16
- [3] P. Veis, A. Marín-Roldán, V. Dwivedi, J. Karhunen, P. Paris, I. Jögi, C. Porosnicu, C.P. Lungu, V. Nemanic, A. Hakola, Quantification of H/D content in Be/W mixtures coatings by CF-LIBS, Phys. Scr. – No. T171, Art. No. 014073 (7pp) (2020).

Citations: 4

[4] P. Veis, S. Atikkuke, A. Marin Roldan, V. Dwivedi, M. Veis, P. Barton, M. Jerab, R. Dejarnac, LIBS analysis of samples from the COMPASS vacuum chamber after liquid metal experiments – Li campaign, Nuclear Materials and Energy – Vol. 25 (2020) Art. No. 100809, <https://doi.org/10.1016/j.nme.2020.100809>.

Citations: 2

[5] G.S. Maurya, A. Marín-Roldán, P. Veis, A.K. Pathak, P. Sen, A review of the LIBS analysis for the plasma-facing components diagnostics, Journal of Nuclear Materials – Vol. 541, No. 1, Art. No. 152417 (2020) .

Citations: 11

[6] A. Marín Roldán, M. Pisarcik, M. Veis, M. Držík, P. Veis, Calibration-free analysis of a tungsten-based target for diagnostics of relevant fusion materials comparing picosecond and nanosecond LIBS, Spectrochimica Acta B. Vol. 177 (2021) (9pp), art. no. 106055.

Citations: 6

[7] H. J. Van Der Meiden, S. Almaviva, J. Butikova, V. Dwivedi, P. Gasior, W. Gromelski, A. Hakola, X. Jiang, I. Jögi, J. Karhunen, M. Kubkowska, M. Laan, G. Maddaluno, A. Marín-Roldán, P. Paris, K. Piip, M. Pisarčík, G. Sergienko, M. Veis, P. Veis, S. Brezinsek, Monitoring of tritium and impurities in the first wall of fusion devices using a LIBS based diagnostic, Nuclear Fusion Vol. 61, Art. No. 125001 (2021).

Citations: 0

[8] V. Dwivedi, M. Veis, A. Marín Roldán, E. Grigore, F. Baiasu, I. Bogdanovič Radovič, Z. Siketić, P. Veis, CF-LIBS study of pure Ta, and W-Ta+ D coating as fusion-relevant materials: a step towards future in situ compositional quantification at atmospheric pressure, The European Physical Journal Plus, Vol. 136, Art. No. 1177 (2021).

Citations: 0

Uplatnenie výsledkov projektu

1/ Monitorovanie záchyty termojadrového paliva D/T v stenách budúcich termojadrových reaktorov.

2/ Hĺbková profilometria spojená s elementárnu analýzu použitím bezkalibračnej metódy CF-LIBS pri použití ps laserovej ablácie (rozlíšenie niekoľko desiatok nm).

3/ Kvantifikácia ľahkých prvkov navrhnutou simultánnou CF-LIBS spektroskopiou vo vákuovej UV a klasickej UV-NIR oblasti (kritická detekcia a kvantifikácia ľahkých prvkov inými metódami).

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

Tento projekt bol riešený v rámci národnej RIS3 stratégie, pričom prioritnou oblasťou bol materiálový a nanotechnologický výskum. Tím riešiteľov projektu je členom výskumného konzorcia v rámci aktuálne začínajúceho EUROfusion Horizon Europe projektu, ktorý začal minulý rok a výsledky tohto projektu sú dôležité pre ďalšie riešenie spomenutého EU projektu v oblasti energetiky pre budúcu bezpečnú prevádzku zariadení termonukleárnej fúzie, ako sú reaktory ITER alebo DEMO. Tento projekt mal štyri rôzne ciele, ktoré sa počas jeho trvania dosiahli:

1) Zvýšenie rozlíšenia pri hĺbkovej profilometrii (až na úroveň niekoľko desiatok nm) spojenej s prvkovou analýzou vzoriek použitím bezkalibračnej metódy (CF-LIBS). Bezkalibračná metóda CF-LIBS je veľmi dôležitá pri analýze neznámych vzoriek, ako napr. nadeponované vrstvy na prvej stene termonukleárnych reaktorov (tokamakov) po migrácii materiálu, ktoré nie je možné analyzovať použitím kalibračných štandardov. Plánovanými materiálmi pre ITER tokamak sú Be a W, ktoré môžu byť redeponované spolu s nečistotami (napr. N, O, C a B). Preto je dôležitá kvantitatívna analýza hĺbkového profilovania pomocou CF-LIBS v týchto zmiešaných materiáloch. Tento cieľ bol dosiahnutý zvýšením hĺbkového rozlíšenia až na niekoľko desiatok nm pomocou ps-LIBS namiesto ns-LIBS. Bolo to možné

vďaka niekoľkým výhodám laserovej ablácie ps oproti ns (nižšia hustota a teplota plazmy), čo viedlo k lepšiemu rozlíšeniu čiar (kľúč k presnejšej kvantifikácii).

2) Detekcia ľahkých prvkov (ako C a B) LIBS meraniami bola dosiahnutá simultánnou detekciou vo vákuovej UV a štandardnej UV-NIR oblasti.

3) Rozlíšenie izotopov vodíka H/D je kľúčové pre kvantifikáciu zadržaného paliva D/T v prvej stene termojadrového reaktora. Pri nízkom tlaku sa dá LIBS kvantitatívna analýza ľahko dosiahnuť. Pri atmosférickom tlaku (čo sú plánované podmienky pre merania zadržaného paliva v reaktore ITER) je vyriešenie tejto analýzy veľmi náročné (bezpečnostné obmedzenie < 1 kg T vo vnútri reaktora včítane stien). Tento cieľ kvantitatívnej H/D LIBS analýzy pri atmosférickom tlaku bol dosiahnutý a publikovaný v roku 2021 vo viacerých našich článkoch. Získané výsledky a publikácie boli dosiahnuté v spolupráci s niekoľkými európskymi laboratóriami, ako aj s dvoma indickými a jedným japonským.

4) Zosilnenie signálu LIBS sa dosiahlo reexcitáciou plameňa plazmy použitím iskrového výboja aplikovaného po laserovej ablácii.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

This proposed project was solved in the frame of the Slovak RIS3 strategy, being material and nanotechnology research a priority area. As a research facility member of the current EUROfusion Horizon Europe project starting this year, the results of this project are important in the field of energy for future safe working of thermonuclear fusion devices like ITER or DEMO reactors. This project had four different goal, which have been achieved during its duration:

1) Increasing the depth resolution in profiling (several tens of nm) for the elemental quantification of samples by the calibration-free method (CF-LIBS). CF-LIBS is very important for the analysis of unknown samples, like deposited layer on the first wall of tokamaks after the material migration. The planned materials for ITER are Be and W, which could be re-deposited together with some possible impurities like N, O, C, and B. Thus the importance of the depth profiling quantitative analysis by CF-LIBS in those mixed materials. This goal has been achieved with an increment of the depth resolution up to several tens of nm using ps-LIBS instead of ns-LIBS. This has been possible due to the several advantages of ps over ns laser ablation (lower plasma density and temperature), leading to a better line resolution, and key for a more precise quantification.

2) The detection of light elements like C and B was achieved by simultaneous vacuum UV and standard UV-NIR LIBS measurements.

3) The resolution of different H isotopes is crucial for the quantification of retained fuel in the first wall. At low pressure is easily done but at atmospheric pressure, which are the planned conditions for retained fuel measurements at ITER reactor where there is a limitation < 1 kg of T inside the wall, resolving these lines is very challenging. This goal has also been achieved, and published in 2021 in several papers. This work has been done in collaboration with several European laboratories as well as two Indian and one Japanese.

4) The LIBS signal enhancement was achieved by plasma plume re-excitation using a spark discharge applied after the laser ablation.