

Raport stiintific privind implementarea proiectului in perioada ianuarie – noiembrie 2016

Programul: **IDEI**

Tipul proiectului: **Proiecte de cercetare exploratorie**

Cod proiect: **PCE_PNII-ID-PCE-2011-3-0522**

Titlul proiectului: **Giga and terra-watt laser interaction with carbon, tungsten and beryllium films »**

Director de proiect: Dr. Cristian P. LUNGU, INFLPR, Magurele

Obiective:

6.1 Interactia filmelor compozite ternare (Be-C -W) cu plasma produsa in deuteriu de laserul de mare putere (TEWALAS)

Activitati

6.1.1 Caracterizarea depunerilor de Be-C-W inainte de expunerea la fasciculul laser utilizand metodele: AFM, SEM, XPS, XRD, Raman, TDS.

6.1.2 Caracterizarea depunerilor de Be-C-W dupa expunerea la fasciculul laser utilizand metodele: AFM, SEM, XPS, XRD, Raman, TDS.

6.2 Diseminarea rezultatelor

6.2.1 Pregatire prezentari la Conferinte Internationale (Prezentare a 2 lucrari)

6.2.2 Pregatirea si transmiterea unei lucrari la o revista de specialitate ISI

6.2.3 Pregatirea si inregistrarea unei cereri de brevet la EPO (European Patent Office)

Rezumat

In perioada ianuarie-decembrie 2016, au fost abordate si indeplinite activitatile prevazute in cadrul obiectivului 6.1 respectiv studiul interactiei filmelor compozite ternare (Be-C - W) cu plasma produsa in deuteriu de laserul de mare putere (TEWALAS), (ceea ce implica depunerea de filme compozite Be-C-W in configuratie stationara, analiza acestora), pregatirea si publicarea unor lucrari stiintifice cu cotaie ISI (trei lucrari publicate si una trimisa spre publicare, fata de una singura prevazuta in planul de lucru) si trei prezentari la conferinte internationale, dintre care o lucrare invitata, fata de 2

prezentari prevazute initial). Toate lucrarile si prezentarile au mentionat Acknowledgement pentru sursa de finantare, respectiv Romanian National Authority for Scientific Research, CNCS - UEFISCDI, project number PN-II-ID-PCE-2011-3-0522.

A fost inregistrat un patent la European Patent Office (EPO), cu inregistrare prealabila la OSIM.

Lucrari ISI

1. L. Avotina, A. Marcu, C. Porosnicu, M. Lungu, A. Stancalie, A. G. Ilie, P. C.Ganea, D. Savastru, J. Kalnacs, C. P. Lungu, G. Kizane, S. Antohe, Multi-wavelength laser irradiation of Be-C-W coatings Digest Journal of Nanomaterials And Biostructures Vol. 11, No. 1, January - March 2016, p. 293 - 302
2. L. Avotina; Marcu, A; Lungu, M; Stancalie, A; Grigorescu, C; Ilie, AG; Porosnicu, C ; Mihai, L; Sporea, D ; Lungu; Somacescu; Kizane, G; Savastru; Antohe, S., Power density influence on laser-induced graphite structural modifications, Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, Vol.11 I. 3 p.973-981 2016
3. Liga Avotina, Mihail Lungu, Paul Dinca, Bogdan Butoi, Razvan Ungureanu, Aurelian Marcu, Catalin Luculescu, Claudiu Hapenciuc, Paul C. Ganea, Aleksandrs Petjukevics, Cristian Petrica Lungu, Gunta Kizane and Stefan Antohe, Deuterium Influence on Laser Irradiation of Be-C-W Materials, trimisa la publicare in revista *Fusion Engineering and Design*

Conferinte

1. C.P. Lungu / High power laser irradiation of mixed Be/C/W films used in fusion technology / 16th International Balkan Workshop on Applied Physics (IBWAP), Constanta, Romania, 7-9 , invited
2. A. Marcu, C.Viespe, I. Nicolae, B. Butoi, D.Paul, L.Avotina si C.P.Lungu, Patterned Laser-grown Nanowires for Hydrogen Isotopes Detection with SAW-sensors, 5-9 June 2016, international conference „CIMTEC 2016” Perugia, Italia, poster
3. A. Marcu, L. Avotina, C. Porosnicu , A. Marin, C.E.A. Grigorescu, R.Ungureanu, G. Cojocar, D. Ursescu, M. Lungu, N. Demitri and C.P. Lungu, Femtosecond

- Laser Induced sp^3 Bonds and Nanodiamonds Formation in Carbon Materials; 5-9 June 2016, international conference „CIMTEC 2016” Perugia, Italia, poster
4. A. Marcu, L. Avotina, C. Porosnicu, A. Marin, C.E.A. Grigorescu, R.Ungureanu, G. Cojocaru, D. Ursescu, M. Lungu, N. Demitri and C.P. Lungu, Femtosecond Laser Induced sp^3 Bonds and Nanodiamonds Formation in Carbon Materials, Applied Nanotechnology and Nanoscience International Conference – ANNIC 2016, nov 9-16, Barcelona, Spain
 5. Bogdan Calin, Catalina Albu, Laura Ionel, Ecaterina Iordanova, Georgi Yankov and Aurelian Marcu” Periodical surface nanostructures induced by femtosecond laser Applied Nanotechnology and Nanoscience International Conference – ANNIC 2016, nov 9-16, Barcelona, Spain

Brevete:

1. OSIM: A/00698/03-10-2016, Iradierii cu laseri de putere TW/PW, Autori: C.P.Lungu, C.Porosnicu, I. Jecu, M. Lungu, R. Banici, A. Marcu, C.R. Luculescu, D. Ursescu
2. EPO: EP 16464009/14.10.2016, High power TW/PW laser irradiation, Autori: C.P.Lungu, C.Porosnicu, I. Jecu, M. Lungu, R. Banici, A. Marcu, C.R. Luculescu, D. Ursescu

1. Introducere

In intentia de a obtine energie curata in cantitati mari prin fuziune nucleara, una dintre problemele cele mai provocatoare este cea privind componentele care sunt in contact cu plasma de fuziune (PFC). Aceste componente (material) trebuie sa fie capabile sa reziste bombardamentului cu radiatii energetice, neutroni si fluxuri de ioni constante dinspre plasma si totodata si densitatilor mari de caldura ($>10 \text{ MW/m}^2$) [1, 2]. Aceste conditii vor conduce cu siguranta catre pulverizare chimica si fizica la interactia plasmei cu PFC. Migrarea materialului in plasma conduce la redepunerea filmelor subtiri compozite, care vor interactiona intr-o maniera diferita cu plasma, spre deosebire de PFC.

Datorita proprietatilor lor, beriliul (Be) si wolframul (W) depuse pe material formate din fibre compozite de carbon (CFC) au fost sugerate spre a fi folosite in dispozitivele

de fuziune de noua generatie precum ITER [3]. Aceasta configurare a PFC este deja testata la Joint European Torus (JET) din Culham, UK. Pentru iradierea cu diferite lungimi de unda [4], densitati de putere [5] similare parametrilor plasmei, procesele de interactie cu straturile de Be-C-W sunt teme importante, deoarece fenomenele respective nu sunt inca complet intelese [6,7]. Pentru a trata aceasta tema, straturi compozite de Be-C-W cu diferite procente atomice au fost obtinute folosind tehnologia arcului termoionic in vid (TVA) [8-10]. Grosimea stratului a fost de ~ 400 nm, similara cu cea intalnita in JET [11]. Filmele compozite de Be-C-W au fost expuse la iradierea cu laser de ordinal terawatt Ti: system laser Sapphire, cu o durata a pulsului de ~ 100 fs in modul mono puls si multi puls [12]. Au fost utilizate doua scenarii diferite de iradiere. Prima iradiere in atmosfera de deuteriu cu presiune mica pentru a simula interactia intr-un reactor de fuziune nucleara functional iar cel de-al doilea in aer atmosferic, un scenariu cu pierdere de vid. Modificarile induse de laser in morfologia straturilor depuse au fost studiate folosind microscopie electronica de baleiaj (SEM) si microscopie de forta atomica (AFM), iar compozitia si legaturile chimice ale probei au fost studiate prin spectrometrie de dispesie dupa energii (EDS), spectroscopie fotoelectronica cu raxe X (XPS) si spectroscopie Raman.

2. Procedeu experimental

Straturile mixte Be-C-W au fost depuse folosind tehnologia TVA [13-14]. Montajul experimental folosit pentru acest studiu este ilustrat in Fig. 1 si este compus din trei sisteme individuale anod-catod, distributia probelor fiind prezentata in Fig.2

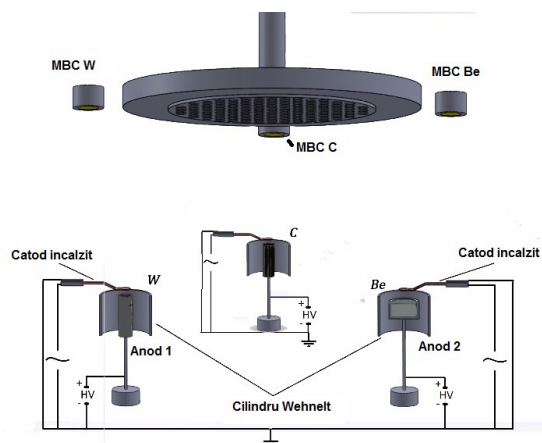


Fig. 1 Montajul experimental pentru depuneri mixate utilizand metoda TVA.

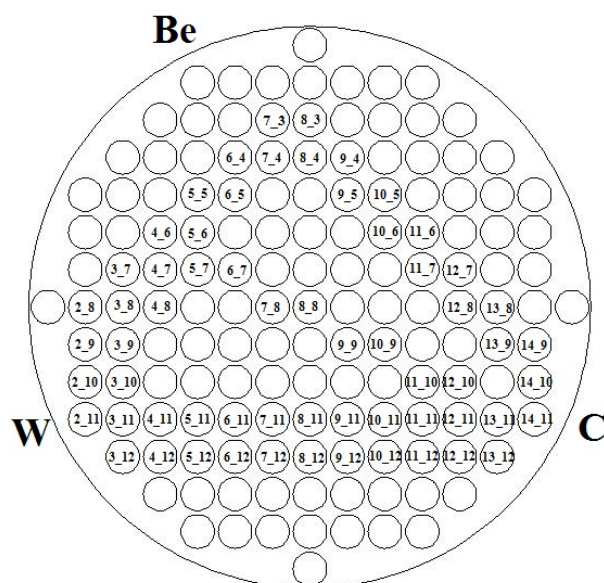


Fig. 2 Distributia si numerotarea probelor utilizand 3 evaporatoare (Be, C, W)

Ratele de depunere si grosimea au fost monitorizate in-situ pentru beriliu si wolfram folosind un sistem de micro-balanta cu cuarț. Aceasta a permis obtinerea procentului atomic Be-W de 9:1 si o grosime totala de 400nm. Ratele de depunere au fost 0.04 nm/s pentru W si 0.11 nm/s pentru Be iar pentru C au fost estimate la 0.1 nm/s avand la baza calibrarile anterioare.

In detaliu, parametrii fiecarui evaporator TVA au fost: i) evaporatorul de carbon: $d_{C-balanta\ cuarț} = 25\text{ cm}$, $d_{C-probe} = 24\text{ cm}$, $f_{Corectie} = (25/24)^2 = 1,085$, $U_{descarcare}\text{ (V)} = 890\text{ V}$, $I_{descarcare}\text{ (A)} = 1.8\text{ A}$, Rata de depunere = 1,6 nm/s, grosime = 250 nm, timp depunere = 5 min, presiune reziduala = $P = 1.4 \times 10^{-5}\text{ torr}$; ii) evaporatorul de wolfram: $d_{W-balanta\ cuarț} = 36.5\text{ cm}$, $d_{C-probe} = 23\text{ cm}$, $f_{Corectie} = (36.5/23)^2 = 2.51$, $U_{descarcare}\text{ (V)} = 2300\text{ V}$, $I_{descarcare}\text{ (A)} = 1.9\text{ A}$, Rata de depunere = 0.51 nm/s, grosime = 280 nm, timp depunere = 125 min, presiune reziduala; $P = 6.5 \times 10^{-6}\text{ torr}$; iii) evaporatorul de beriliu: $d_{Be-balanta\ cuarț} = 25\text{ cm}$, $d_{C-probe} = 22\text{ cm}$, $f_{Corectie} = (25/24)^2 = 1,54$, $U_{descarcare}\text{ (V)} = 1250\text{ V}$, $I_{descarcare}\text{ (A)} = 1\text{ A}$, Rata de depunere = 2.72 nm/s, grosime = 500 nm, timp depunere = 184 sec, presiune reziduala; $P = 5 \times 10^{-6}\text{ tor}$

Probele au fost iradiate cu un laser de mare putere in conditii ambientale (temperatura camerei, aer) si respectiv in deuteriu ($\sim 20\text{ torr}$). O schema generica a montajului experimental este prezentata in Fig. 3. Laserul este focalizat deasupra suprafatei

substratului, dar substratul nu este orientat perpendicular pe directia fascicului laser, ci aproximativ paralel cu acesta, asa cum se poate observa in fig. 3. Marimea punctului focal este de aproximativ 0.5 micrometri si este pozitionat aproximativ deasupra tintei, unghiul incident este estimat la cateva grade ($\sim 5^0$). Rata de repetitie a laserului este 10 Hz in timp ce durata pulsului este de aproximativ 100 fs. Energia pulsului a fost de aproximativ 4 mJ, in timp ce numarul de pulsuri a fost intre 1 si 1000 pulsuri.

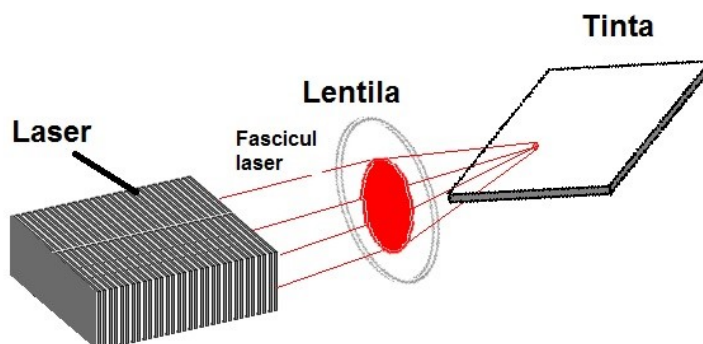


Fig. 3 Montaj experimental al sistemului de iradiere laser.

Prin microscopie electronica de baleiaj (SEM) au fost analizate probele iradiate cu 100 de pulsuri. Marimea zonei afectate se schimba in functie de compozitia probei dar de asemenea si in functie de gazul ambiental. Se poate observa ca zonele bogate in carbon tind sa fie mai mari, dar si ca prezenta deuteriului mareste toate zonele supuse iradierii, iar zonele afectate (partial) observate in aer (Fig. 4a) sunt afectate in mod mai clar in prezenta deuteriului (Fig. 4b). Rezultatul este o delimitare mai evidenta a zonelor afectate si o zona centrala afectata (supusa ablatiei) mai mult.

In toate cazurile, procesul de ablatie apare (cel mai mult) in centrul zonelor iradiate. Investigatiile EDX (realizate pe acelasi aparat SEM) ne ofera informatii suplimentare privind compozitia zonelor iradiate. Asa cum se poate observa in Fig. 4a, carbonul si Be sunt mai usor de ablat decat W. Pe langa intensificarea procesului de ablatie prezentat prin largirea zonelor bogate in W (asociate cu zonele ablate), se poate observa o largire mai mare a zonelor bogate in carbon, sugerand faptul ca elementul carbon ca fiind elemental cel mai rapid indepartat in mod special in prezenta deuteriului. Interesant de

remarcat este ca in aer acest process este mult mai putin evident. Din moment ce profilul fasciculului nu este uniform iar energia tinde sa scada la periferie, aceasta sugereaza ca pragul de ablatie scade cumva in prezenta deuteriului folosit ca gaz ambiental. Uitandu-ne mai atent la morfologia suprafetei zonelor periferice iradiate, putem observa ca perioada de formare a riplurilor formate [15-17] se modifica de asemenea in functie de gazul ambiental, respectiv se largeste in prezenta deuteriului. (Fig. 5)

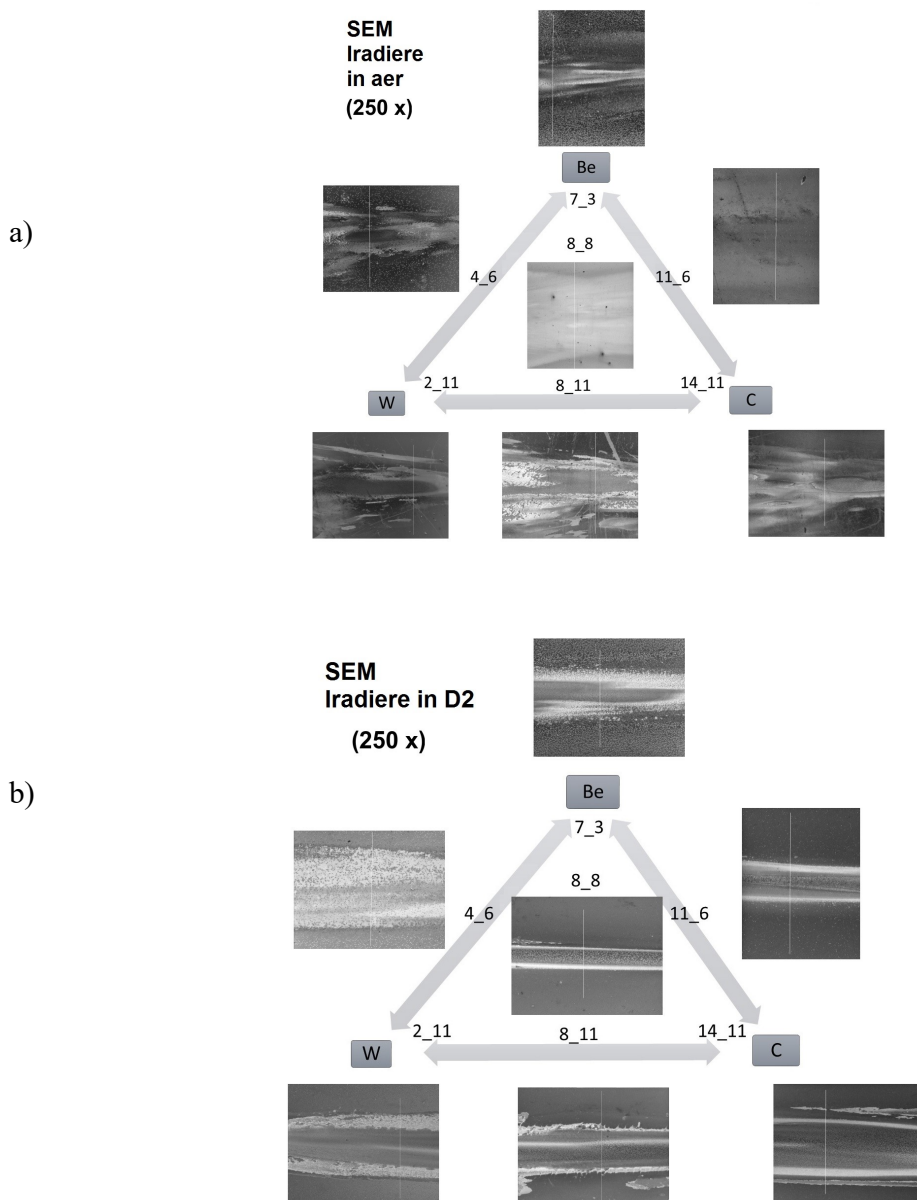


Fig. 4. Imagini SEM a zonelor iradiate in a) aer si b) in deuteriu

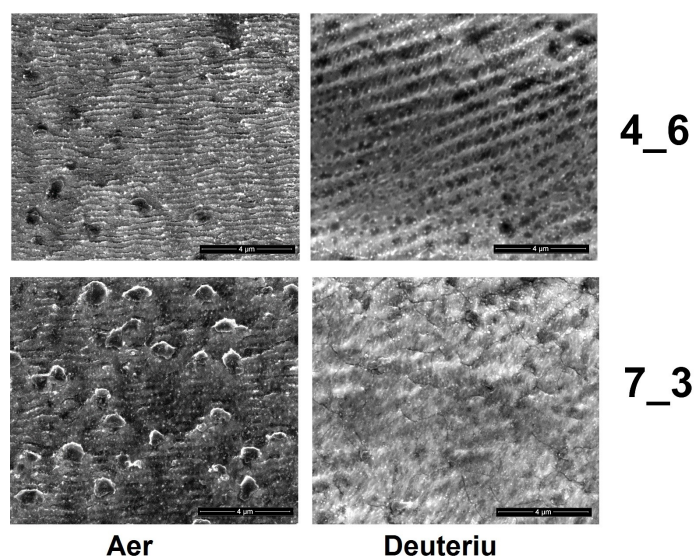
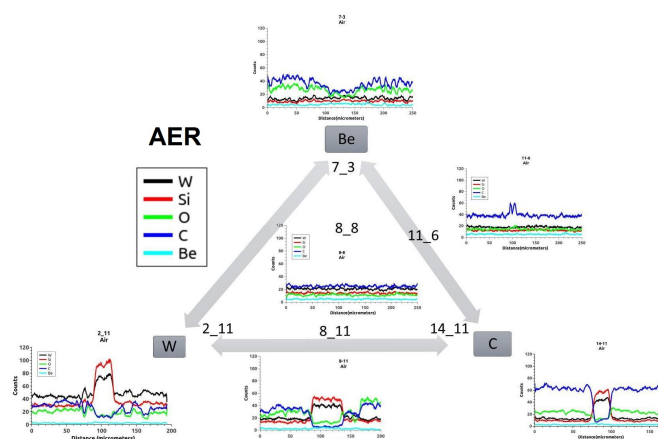
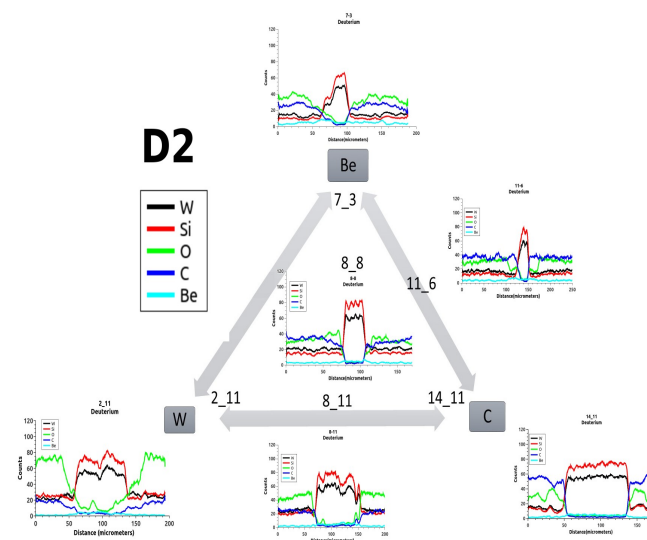


Fig. 5 Imagini comparative ale riplurilor obtinute in aer si deuteriu

In timp ce pentru acelasi material iradiat se stie ca dimensiunea riplurilor se modifica cu unghiul de incidenta al laserului [18] si fluenta [18,19], in acest caz nici unul dintre parametrii de mai sus nu se modifica. Singura modificare are loc in gaz ambiental care este de asemenea cunoscut ca influenteaza atat prin presiune cat si prin compozitie [20]. Mecanismul de formare a riplurilor general acceptat este prin formarea plasmonilor (unde rezonante) in timpul interactiei laser-materie [20] mediata de electroni. Astfel, prezenta deuteriului afecteaza de asemenea formarea plasmonilor si a procesului de ablatie pentru zone iradiate cu densitate scazuta.



a)



b)

Fig. 6 Profile EDX ale zonelor iradiate cu laser a) in aer and b) in deuteriu

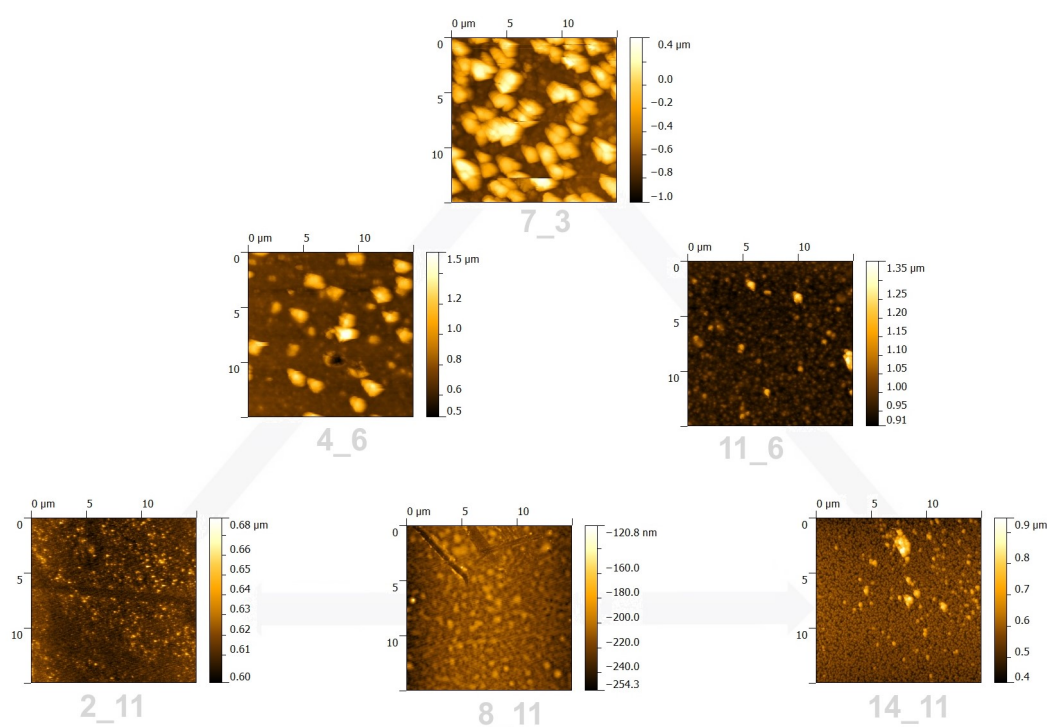


Fig. 7 Imagini AFM ale zonelor iradiate in deuteriu

Investigatiile AFM arata (Fig. 7) o crestere a rugozitatii in mod particular pe zonele bogate in Be, sugerand o posibila recrystalizare in zonele bogate in Be.

Investigiatiile XPS confirma distributia elementelor W, C si Be in proba si asociaza prezenta oxigenului cu zonele bogate in Be, sustinand ipoteza oxidarii Be si compozitia de BeO in structurile formate in zonele bogate in Be. Fig. 8 prezinta spectrele suprapuse ale probelor analizate, iar in Fig. 9 este prezentata sintetic cuantificarea procentuala a elementelor chimice prezente in probele analizate.

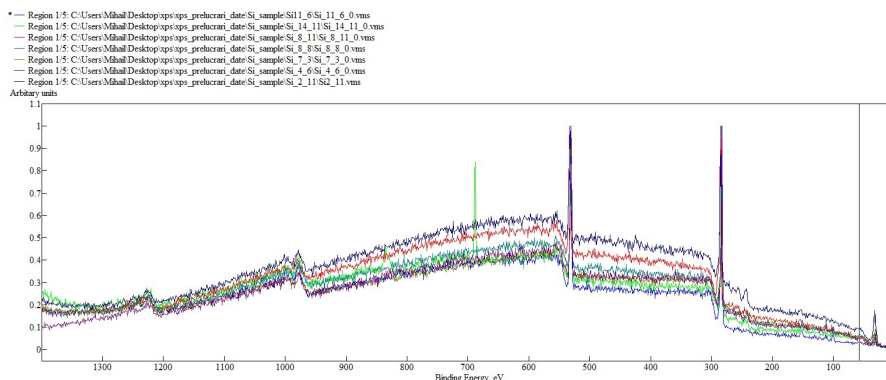


Fig. 8 Spectre XPS ale probelor analizate

Sample code 0-original 1-irradiated	C (%)			O (%)			Be (%)			W (%)		
	O-C=O (289eV)	C-OH (287eV)	C-C, C-H (285 eV)	Bounde d oxigen to organic species 531eV	Bounde d oxigen to organic species 534eV	Organic oxygen (533eV)	BeC (111eV)	Be metallic	BeO (114eV)	W Metali c (31eV)	WO2 (33eV)	W03 (36eV)
Si2_11	41.1			18.0			39.4			1.5		
	1.7262	4.6443	34.7295	0.612	1.566	15.822	0.617	22.3398	15.8782	0.639	0.519	0.342
Si_4_6_0	42.2			16.1			41.3			0.4		
	2.9118	3.8824	35.448	0.1127	1.4812	14.5061	0.61174	24.367	12.2661	0.1876	0.178	0.0344
Si_4_6_1	44.3			17.9			37.6			0.2		
	2.215	3.8098	38.2752	0.179	1.6468	16.0742	0.6192	21.8456	14.6264	0.0806	0.0808	0.0386
Si_7_3_0	6.1			28.9			64.6			0.4		
	0.2745	0.6039	5.2216	0.289	1.2716	27.3394	0.82145	8.398	47.5456	0.164	0.1792	0.0564
Si_7_3_1	39.9			19.9			39.5			0.6		
	0.6384	2.6733	36.5883	0.0796	0.4776	19.3428	0.18865	27.6895	8.058	0.2322	0.231	0.1362
Si_8_8_0	40.7			17.6			41.1			0.6		
	1.7501	2.5641	36.3451	0.176	1.32	16.104	0.54252	24.9066	13.5219	0.2694	0.2532	0.0774
Si_8_8_1	29.2			17.7			52.6			0.5		
	1.1096	2.482	25.6084	0.1062	0.6549	16.9212	0.34448	29.6664	18.2522	0.2395	0.229	0.031
Si_11_6_0	43.8			16.3			39.7			0.1		
	3.2412	3.9858	36.5292	0.0326	0.1793	16.1044	0.07118	20.0485	17.9841	0.0412	0.045	0.0138
Si_11_6_1	43.2			16.5			40.2			0.1		
	0.2592	4.6656	38.2752	0.0165	1.749	14.718	0.7031	20.8236	18.5322	0.0422	0.0352	0.0226
Si_14_11_0	40.1			15.8			43.5			0.6		
	1.7243	3.8496	34.5261	0.4582	2.0698	13.272	0.90036	25.317	16.269	0.18	0.1932	0.2268
Si_14_11_1	42.2			18.9			38.5			0.5		
	0.422	2.0678	39.7524	0.7938	1.5309	16.5564	0.5894	20.9055	16.2085	0.1535	0.156	0.1905

Fig. 9. Cuantificarea procentuala a elementelor chimice prezente in probele analizate

Din analiza rezultatelor masuratorilor XPS se sugereaza o stricta corelare intre procentele de C si concentratiile C-C (Fig. 10) (Excludem prezenta C-OD din moment ce oxigenul si deuteriul nu sunt simultan in concentratii comparabile in camera de iradiere).

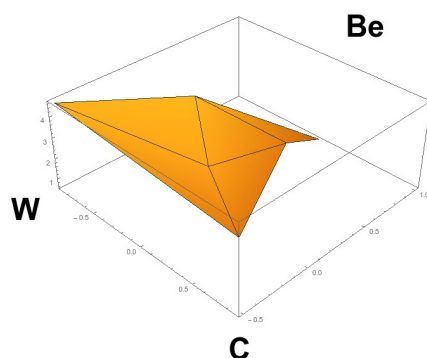


Fig. 10 Rezultate XPS: legaturi C-C (si posibil C-OH / C-OD) in zonele iradiate laser

Spectrele FT-IR masurate peste zonele iradiate laser prezinta cateva semnale largi: un semnal in jurul $1040\text{-}1060\text{ cm}^{-1}$ atribuit vibratiilor Si-O-Si si un semnal la 1180 cm^{-1} care poate apare datorita domeniilor Si-O-Si. Banda de absorbtie la 1100 cm^{-1} poate apare datorita legaturilor C-O-C.. Deoarece in regiunea $2800\text{-}2950\text{ cm}^{-1}$ nu s-a observat o crestere in legatura C-H si nici legaturi de tip C-D in regiunea $2100\text{-}2200\text{ cm}^{-1}$, se poate concluziona ca semnalele la 1410 and 1500 cm^{-1} corespund legaturilor C-C in inelul aromatic, probabil prin procesele de tranzitie a fazei induse de laser [21, 22] confirmand prezenta carbonului in structurile cu continut de grafit. Semnalul la 860 cm^{-1} poate indica prezenta prezenta oxizilor de Si si/ sau W.

Deuteriul nu a fost gasit in legaturile formate cu elementele probei. Oricum, investigatiile Raman au aratat unele diferente intre probe inainte si dupa expunerea la plasma produsa cu laserul in atmosfera de deuteriu. Investigatiile Raman in zonele neexpuse ale probelor au fost realizate si o diagrama a benzii G a grafitului inainte si dupa expunerea la deuteriu este prezentata in Fig. 11.

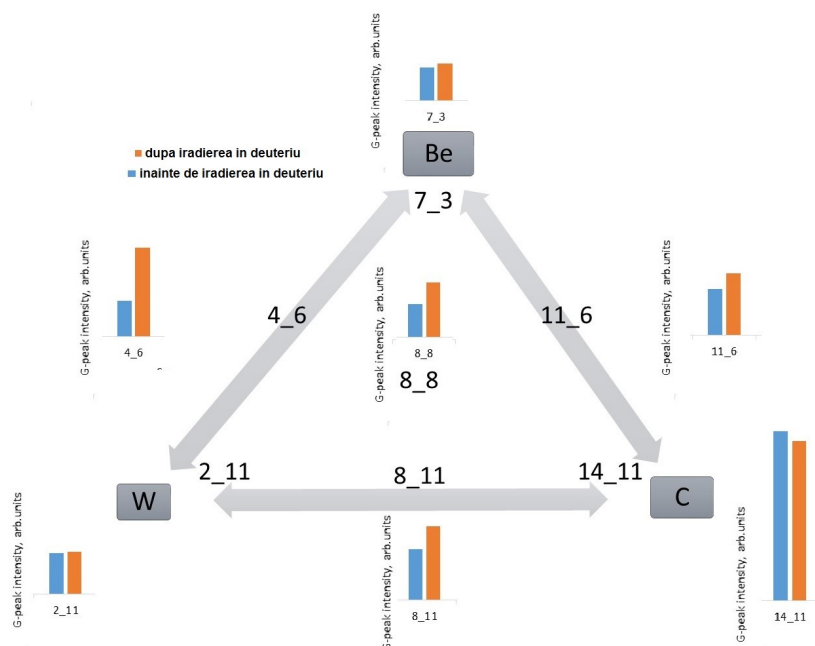
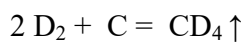


Fig. 11. Comparatia intensitatilor benzii G Raman in zonele neiradiate si in zonele iradiate in atmosfera de deuteriu

Se poate observa o tendință generală a creșterii benzii G după expunerea la deuteriu.

Deoarece prezenta deuteriului și, (în mod particular a deuteriului ionizat) pare să intensifice intensitatea vârfului G al grafitului, atunci o modalitate posibilă este reducerea prezentei carbonului amorf. O astfel de reducere poate să apară prin simplă reacție cu atomii de carbon legați slab:



Prin evaporarea metanului procentul de grafit cristalin se poate explica intensificarea benzii G Raman și slăbirea structurii materialului și amplificarea viitoare a preceselor de ablație (termice) [23].

4. Concluzii

Straturile depuse prin metoda TVA similare cu materialele depuse pe peretele instalatiilor de fuziune au fost iradiate cu fascicul laser de densitate ridicata in conditii de aer ambiental si in deuteriu la 20 torr, pentru a intelege compozitia si influenta izotopilor de hidrogen in modificare morfologiei si structurii materialelor. Continutul de carbon a fost cel care a sporit procesul de ablatie in timp ce wolframul a diminuat procesul.

Deuteriul a intensificat procesul de ablatie pentru toate probele investigate.

Analizand suprafetele neiradiate, intensitatea benzii G a carbonului a sugerat o indepartare a carbonului amorf datorita prezentei deuteriului, posibil prin formarea metanului deuterat, in timp ce modificarea dimensiunii riplurilor formate in zonele iradiate sugereaza diferente in formarea plasmonilor in functie de compozitia gazului ambiental si a presiunii. Asadar, acestea sunt cele doua mecanisme propuse pentru intensificarea ablatiei materialelor Be-C-W (si in mod particular pe baza de carbon) in prezenta deuteriului.

Activitatile prevazute in cadrul proiectului au fost efectuate cu succes. Valorificarea rezultatelor stiintifice s-a efectuat prin 3 comunicari stiintifice prezentate ca lectii invitate, comunicari orale, sau poster in cadrul unor conferinte internationale sau nationale, prin 3 lucrari publicate in reviste ISI sau in curs de publicare si inregistrarea la EPO si OSIM a unui brevet de inventie

Bibliografie

- [1] G. Federici, C.H. Skinner, J.N. Brooks, J.P. Coad, C. Grisolia, A.A. Haasz, A. Hassanein, V. Philipps, C.S. Pitcher, J. Roth, W.R. Wampler, D.G. Whyte, *Plasma-material interactions in current tokamaks and their implications for next step fusion reactors*, Nucl. Fusion 41 (2001) 1967–2137
- [2] V. Philipps, J. Roth, A. Loarte, *Key issues in plasma-wall interactions for ITER: a European approach*, Plasma Phys. Control. Fusion 45 (2003) A17–A30
- [3] C. Thomser, V. Bailescu, S. Brezinsek, J.W. Coenen, H. Greuner, T. Hirai, JET EFDA Contributors, *et al. Plasma Facing Materials for the JET ITER-Like Wall*, Fusion Sci Technol, 62 (2012), pp. 1–8

- [4] L. Avotina, A. Marcu*, C. Porosnicu, M. Lungu, A. Stancalie, A.G. Ilie, P. C.Ganea, D.Savastru, J. Kalnacs, C.P. Lungu, G. Kizane, S. Antohe, *Multi-Wavelength Laser Irradiation of Be-C-W Coatings*, Digest Journal of Nanomaterials and Biostructure **11** (2016), p. 293 – 302
- [5] L. Avotina, A. Marcu*, M. Lungu, A.Stancalie, C. Grigorescu, A.G. Ilie, C. Porosnicu, L.Mihai, D.Sporea, C. P. Lungu, S. Somacescu, G. Kizane, D. Savastru, S. Antohe, *Power Density Influence on Laser-Induced Graphite Structural Modifications*, Digest Journal of Nanomaterials and Biostructure **11** (2016).
- [6] Ch Linsmeier, M. Reinelt, K. Schmid, *Surface chemistry of first wall materials – From fundamental data to modeling*, J. Nucl Mat, 415 (2011), pp. S212–S218
- [7] G.M. Wright, M. Mayer, K. Ertl, G. de Saint-Aubin, J. Rapp, *TMAP7 simulations of deuterium trapping in pre-irradiated tungsten exposed to high-flux plasm*, J Nucl Mat, 415 (2011), p. S636-S640
- [8] I. Jepu, C. Porosnicu, I. Mustata, C.P. Lungu, V. Kunkser, M. Osiac, *et al*, *Simultaneously thermionic vacuum arc discharges in obtaining ferromagnetic thin films*, Rom Rep Phys, 63 (2011), pp. 804–816
- [9] C.P. Lungu, I. Mustata, V. Zaroschi, A.M. Lungu, A. Anghel, P. Chiru, *Beryllium Coatings on Metals: Development of Process and Characterizations of Layers*, JET-EFDA Contributors, *et al*. Phys Scr, T128 (2007), pp. 157–161
- [10] A. Marcu, C.M. Ticoş, C. Grigoriu, I. Jepu, C. Porosnicu, A.M. Lungu, *et al*. *Simultaneous carbon and tungsten thin film deposition using two thermionic vacuum arcs* Thin Solid Films, 519 (2011), pp. 4074–4077
- [11] L. Horton, UK EFDA-JET Contributors *The JET ITER-like wall experiment: First results and lessons for ITER*, Fus Eng Des, 88 (2013), pp. 434–439
- [12] R. Dabu, R. Banici, C. Blanaru, C. Fenic, L. Ionel, F. Jipa, *et al*. *TEWALAS 20-TW femtosecond laser facility*, J Optoelectron Adv Mater, 12 (2010), pp. 12–18
- [13] C.P. Lungu, I. Mustata, G. Musa, *et al.*, *Low friction silver-DLC coatings prepared by thermionic, vacuum arc method* Vacuum 127–130 (2004) 76,
- [14] A. Anghel, I. Mustata, C. Porosnicu, *et al.*, *Influence of the bias voltage on the formation of beryllium films by a thermionic vacuum arc method*, J. Nucl. Mater. 242–245 (2009) 385.

- [15] U. Kalsoom, S. Bashir, N. Ali, M. Akram, K. Mahmood, R. Ahmad. *Effect of ambient environment on excimer laser induced micro and nano-structuring of stainless steel*. Appl. Surf. Sci., 261 (2012), 101–109
- [16] C. P. Lungu, C. M. Ticos, C. Porosnicu, I. Jepu, M. Lungu, A. Marcu, C. Luculescu, G. Cojocaru, D. Ursescu, R. Banici, and G. R. Ungureanu, *Periodic striations on beryllium and tungsten surfaces by indirect femtosecond laser irradiation*, Appl. Phys. Lett. **104** (2014), pp. 101604
- [17] B. Tan and K. Venkatakrishnan, *A femtosecond laser-induced periodical surface structure on crystalline silicon*, J. Micromech. Microeng. 16 (2006) 1080–1085
- [18] Thibault J.-Y. Derrien, Tatiana E. Itina, Rémi Torres, Thierry Sarnet, and Marc Sentis, *Possible surface plasmon polariton excitation under femtosecond laser irradiation of silicon*, J. Appl. Phys. 114,(2013) 083104
- [19] Yusong Pan , Ming Yang, Yumei Li, Zhenhua Wang, Chunling Zhang, Ying Zhao, Jianghong Yao, Qiang Wu & Jingjun Xu, *Threshold Dependence of Deep and Near-subwavelength Ripples Formation on Natural MoS₂ Induced by Femtosecond Laser*, Scientific Reports 6 (2016) 19571,
- [20] A.Marcu, L.Avotina, A.Marin, C.P.Lungu, C.E.A.Grigorescu, N.Demitri, D.Ursescu, C.Porosnicu, P.Osiceanu, G.Kizane and C.Grigoriu, *Laser Irradiation of Carbon-Tungsten Materials*, J. Phys. D: Appl. Phys. **47** (2014), pp. 355305
- [21] A.Marcu, L.Avotina, C.Porosnicu, A.Marin, C.E.A.Grigorescu, D.Ursescu, M.Lungu, N.Demitri and C.P. Lungu, *Spatially Resolved Nanostructural Transformation in Graphite under Femtosecond Laser Irradiation*, Appl. Surf. Sci. **355** (2015), pp. 477–483
- [22] Mihai Stafe, Aurelian Marcu, Nicolae N. Puscas, *Pulsed Laser Ablation of Solids*, Springer Series in Surface Science **53**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2014)