

(12) CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2018 00304

(22) Data de depozit: 02/05/2018

(41) Data publicării cererii:
29/11/2019 BOPi nr. 11/2019

(71) Solicitant:
• UNIVERSITATEA "ALEXANDRU IOAN
CUZA" DIN IAȘI, BD. CAROL I, NR. 11,
IAȘI, IS, RO

(72) Inventatori:
• TIRON VASILE, STR. PODIȘULUI
NR. 63E, IAȘI, IS, RO;
• VELICU IOANA-LAURA, STR. CETĂȚUIA
NR. 2, BL. 763, SC. A, ET. 1, AP. 2, IAȘI, IS,
RO;
• POPA GHEORGHE,
STR. DR. CODRESCU NR. 7A, BL. D3,
SC. A, ET. III, AP. 15, IAȘI, IS, RO

(54) INSTALAȚIE ȘI PROCEDU DE OBȚINERE DE FASCICULE
ENERGETICE DE IONI METALICI CU APLICAȚIE
ÎN PROPULSIA ELECTRICĂ ÎN SPAȚIU

(57) Rezumat:

Invenția se referă la o instalație și la un procedeu pentru obținerea de fascicule energetice de ioni metalici cu fluxuri controlabile, cu aplicație în propulsia electrică în spațiu. Instalația conform invenției este alcătuită dintr-o incintă (1) cilindrică din oțel inoxidabil, depresiunată la o presiune mai mică de 10^{-5} Pa de un sistem alcătuit dintr-o pompă (2) turbomoleculară și dintr-o pompă (3) mecanică uscată, în care este introdus un sistem (9) care asigură menținerea unei distanțe constante de circa 1 cm între un anod (5) metalic situat pe axul incintei (1) cilindrice și încălzit prin bombardament cu electroni produși de un tub (8) Wehnelt din oțel inox, și un filament (7) de wolfram cu rol de catod dispus la un unghi de circa 60° față de ax și încălzit de o sursă de curent, electronii fiind accelerați într-un câmp electric generat între catod (7) și anod (5) de o tensiune de circa 2000 V aplicată de la o sursă (10) de putere. Procedeu conform invenției constă în aceea că vaporii metalici produși prin evaporarea unui anod încălzit prin bombardament cu electroni sunt ionizați și accelerați de un strat dublu de plasmă care mărginește un volum de plasmă generată în jurul anodului.

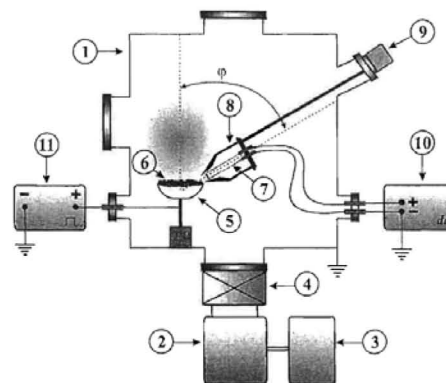


Fig. 1

Revendicări: 3
Figuri: 6

Cu începere de la data publicării cererii de brevet, cererea asigură, în mod provizoriu, solicitantului, protecția conferită potrivit dispozițiilor art.32 din Legea nr.64/1991, cu excepția cazurilor în care cererea de brevet de invenție a fost respinsă, retrasă sau considerată ca fiind retrasă. Întinderea protecției conferite de cererea de brevet de invenție este determinată de revendicările conținute în cererea publicată în conformitate cu art.23 alin.(1) - (3).



63

OFICIUL DE STAT PENTRU INVENȚII ȘI MĂRCI
Cerere de brevet de invenție
Nr. a 2018 00304
Data depozit 02-05-2018

1

INSTALAȚIE ȘI PROCEDEU DE OBTINERE DE FASCICULE ENERGETICE DE IONI METALICI CU APLICAȚIE ÎN PROPULSIA ELECTRICĂ ÎN SPAȚIU

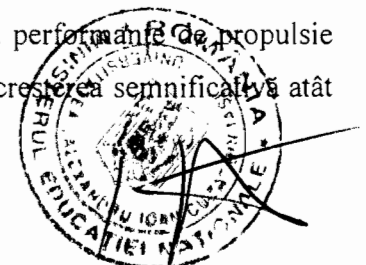
Prezenta invenție se referă la o instalație și un procedeu pentru obținerea de fascicule energetice de ioni metalici cu fluxuri controlabile, cu aplicație în propulsia electrică în spațiu. Propulsia electrică cuprinde toate tehnologiile de propulsie în care electricitatea este utilizată pentru a crește viteza de evacuare a combustibilului, cu scopul amplificării forței de propulsie. În comparație cu alte metode convenționale de propulsie (de exemplu, propulsia chimică), viteza mare de evacuare a combustibilului în cazul propulsiei electrice duce la o reducere semnificativă a cantității de combustibil necesar unei misiuni sau aplicații spațiale și implică la reducerea costurilor sau a duratei de timp necesare pentru realizarea misiunii. Principalii parametri funcționali ce definesc performanța unui propulsor electric sunt: forța de propulsie (T), impulsul specific (I_{sp}) și eficiența totală (η_T). Dintre toate tipurile de propulsoare electrice, cele mai performante și des utilizate în aplicațiile spațiale sunt cele de tip *Ion Thruster* și *Hall Thruster*. Ambele tipuri de propulsoare folosesc drept combustibil xenonul (Xe), gaz care este mai întâi ionizat și apoi expulzat cu viteze foarte mari, folosind diferite tehnici. Diferența majoră dintre modul de funcționare a celor două propulsoare constă în faptul că *Ion Thruster* folosește grile electrostatice pentru a crește viteza de expulzare a gazului ionizat, în timp ce în cazul *Hall Thruster* se folosește un câmp magnetic care duce la creșterea gradului de ionizare a gazului și la apariția unui câmp electric puternic ce accelerează ionii în afara propulsorului. În ambele cazuri, fascicul de ioni expulzat este neutralizat folosind plasma unei descărcări cu catod cavitat pentru a împiedica întoarcerea ionilor către vehiculul sau satelitul spațial. Puterea electrică consumată de aceste propulsoare este de ordinul sutelor sau miilor de W, obținându-se astfel impulsuri specifice de ordinul miilor de secunde, forțe de propulsie de ordinul zecilor sau sutelor de mN și eficiențe totale de peste 50%. Din cauza forțelor de propulsie mici, aceste propulsoare nu pot fi folosite în misiuni de lansare a vehiculelor spațiale de pe Pământ, dar sunt folosite pentru menținerea sau modificarea orbitelor sateliților artificiali folosiți în telecomunicații și în misiuni spațiale de lungă durată efectuate în afara zonei de influență a câmpurilor gravitaționale intense, în cazul de față cel terestru.

Principalele probleme cu care se confruntă ambele tipuri de propulsoare sunt:



- Costurile mari ale combustibilului, costuri ce țin atât de prețul de producție (în funcție de puritate, un litru de Xe costă între 5 și 30 \$), cât și de îmbuteliere, transport, depozitare, sisteme de distribuție și de control al fluxului de gaz;
- Erodarea grilelor de accelerare (în cazul *Ion Thruster*) și a pereților propulsoarelor (*Hall Thruster*) din cauza bombardamentului ionic;
- Dificultatea de a controla independent forța de propulsie și impulsul specific. De exemplu, pentru menținerea pe orbită a unui satelit este nevoie de impuls specific mare și forță de propulsie mică. În cazul propulsoarelor clasice, valoarea impulsului specific crește odată cu creșterea forței de propulsie, fapt ce duce la creșterea consumului de combustibil și de energie.

Pentru a depăși aceste limitări, este necesară găsirea unei soluții alternative la propulsia electrică ce folosește motoarele ionice clasice (*Ion Thruster* și *Hall Thruster*). Astfel, este necesară dezvoltarea unui nou tip de propulsor ionic, cu performanțe (impuls specific, forță de propulsie și eficiență totală) comparabile sau chiar mai bune decât cele obținute până în prezent de către motoarele ionice clasice, dar care oferă posibilitatea controlului independent al impulsului specific și al forței de propulsie, necesitând costuri mai mici pentru fabricare și funcționare (combustibil, energie și mentenanță). Soluția propusă în prezenta invenție se referă la o instalație și un procedeu de obținere a fasciculelor energetice de ioni metalici, ce permite controlul independent al energiei și densității de ioni. Procedeu de obținere a fasciculelor energetice de ioni cu fluxuri controlabile, cu aplicație în propulsia electrică în spațiu, conform invenției, constă în utilizarea tehnicii arcului termo-ionic, în regim pulsant, pentru ablația și ionizarea unui material metalic și evacuarea acestuia cu viteze foarte mari. Prezenta invenție aduce o serie de elemente de noutate, dintre care cel mai însemnat constă în operarea, pentru prima dată, a arcului termo-ionic în regim pulsant. Până în prezent, arcul termo-ionic a fost operat doar în regim de curent continuu (DC), fiind, în principal, folosit pentru depunerea de straturi subțiri metalice. Caracteristică arcului termo-ionic este generarea unui strat dublu puternic (V. Tiron, L. Mihaescu, C.P. Lungu, G. Popa, Rom. Journ. Phys., 56 (2011) 41–46), ce permite accelerarea ionilor din plasmă la viteze foarte mari, de ordinul sutelor sau chiar miilor de eV. Totuși, gradul redus de ionizare a plasmă (câteva procente) duce la performanțe de propulsie relativ scăzute. Operarea arcului termo-ionic în regim pulsant permite creșterea semnificativă atât



a gradului de ionizare a vaporilor metalici, cât și a energiei lor, îmbunătățindu-se astfel considerabil performanțele de propulsie.

Exemplul de realizare a invenției se referă la o instalație și un procedeu de obținere de fascicule energetice de ioni metalici, în vederea optimizării performanțelor motoarelor ionice folosite în propulsia spațială și reducerii costurilor de fabricare și funcționare. Instalația și procedeul de obținere a fasciculelor energetice de ioni folosind arcul termo-ionic în regim de curent pulsant, precum și parametrii specifici de performanță sunt descrise în această invenție. Procedeul folosit permite creșterea gradului de ionizare a plasmă și crearea, în plasma arcului termo-ionic, a unui strat dublu cu o cădere de potențial foarte mare care poate asigura accelerarea ionilor din plasmă la energii de ordinul keV. Pentru anumite valori ale parametrilor de funcționare ai descărcării arcului termo-ionic, se obțin fascicule cvasi-monoenergetice de ioni metalici a căror energie și densitate pot fi controlate cu ajutorul parametrilor electrici ai descărcării. Instalația și procedeul sunt adecvate pentru obținerea de fascicule energetice de ioni ai unor metale pure, cum ar fi: Be, Al, Ti, Cr, Ni, Cu, Zn, Ag, In, W, Au etc.

Descărcarea arcului termo-ionic în impulsuri de mare putere este asigurată de un generator de pulsuri de mare putere sau o sursă de înaltă tensiune DC cu comandă externă care permite aplicarea de pulsuri pozitive de înaltă tensiune (1-3 kV) în intervale de timp scurte (câteva zeci sau sute de microsecunde). Camera în care se produce plasma arcului termo-ionic în vapori metalici constă într-o incintă de lucru din oțel inoxidabil ce este depresurizată până la o presiune limită inferioară de 10^{-5} Pa folosind un sistem de depresurizare alcătuit dintr-o pompă mecanică uscată și o pompă turbomoleculară.

Principiul metodei

Arcul termo-ionic în vid (cunoscut în literatură ca *Thermionic Vacuum Arc - TVA*) este o descărcare electrică produsă în vaporii metalici ai unui material din care este realizat un electrod cu rol de anod al descărcării (G. Musa, A. Baltog, A. Popescu, N. Betiu, I. Mustata, *Contr. Plasma Phys.* 26 (3) (1986) 171). Vaporii metalici sunt produși prin bombardament electronic în prezența unui câmp electric aplicat între catod și anod, câmp ce accelerează electronii emiși de către un filament (catod cald) spre anod. Filamentul este confecționat din sârmă de wolfram (W) și este înconjurat de un cilindru Wehnelt aflat la un potențial de referință adecvat (numit referențial), de regulă al catodului, care focalizează fasciculul de electroni pe suprafața anodului.



Ansamblul format din filament și cilindrul Wehnelt poartă denumirea de tun de electroni și poate avea diverse mărimi și/sau forme (H. Ehrich, J. Schuhmann, G. Musa, A. Popescu, I. Mustata, Thin Solid Films 333 (1998) 95-102), (P. Lungu, C. Porosnicu, I. Jepu, P. Chiru, A.M. Lungu, V.N. Zaroschi, V. Tiron, R. Vlădoiu, V. Ciupină, "Aliaj nanostructurat pe bază de beriliu", Patent RO127300-A0 2012). Tensiunea pe anodul descărcării este de ordinul sutelor sau chiar miilor de volți și poate fi aplicată în mod continuu (DC) sau pulsat. Anodul constă, de regulă, dintr-un creuzet (nacelă) confecționat din material refractar (W, C, Mo, Ta sau TiB) în care se găsește materialul folosit pentru alimentarea plasmei arcului termo-ionic. Anodul descărcării poate fi și sub formă de bară în cazul materialelor cu punct de topire foarte ridicat (C, Mo, Ta, W) sau cu conductivitate termică foarte mică (B, Ti), caz în care se poate renunța la nacelă. Sistemul de electrozi este plasat într-o incintă metalică cuplată la un sistem de pompare ce asigură o presiune limită inferioară mai mică de 10^{-5} Pa. Pentru a putea ajusta distanța dintre electrozii descărcării, este necesar ca cel puțin unul dintre electrozi să fie fixat pe un sistem de deplasare. Pentru aprinderea și menținerea descărcării este necesar ca termoelectronii proveniți de la filament să fie focalizați și accelerați spre anod astfel încât să producă topirea și evaporarea materialului anodic, iar în spațiul interelectrodic să se realizeze o presiune suficient de mare de vapori ai materialului folosit pentru alimentarea plasmei arcului termo-ionic. Pentru anumite valori ale tensiunii aplicate între electrozii descărcării, precum și a presiunii vaporilor de metal, se aprinde o descărcare electrică stabilă în vaporii metalici ai materialului aflat în nacelă. Datorită presiunii foarte scăzute în incintă, dar și a ratei mari de evaporare a materialului supus bombardamentului electronic, se produce o plasmă foarte intensă deasupra anodului, plasmă a cărei formă este cvasisferică datorită gradientului foarte mare de concentrație a vaporilor metalici. Faptul că pereții incintei și catodul (filamentul) sunt conectați la potențialul de referință al circuitului electric al descărcării electrice face ca anodul și, de asemenea, plasma produsă în vaporii metalici să se afle la un potențial pozitiv mult mai ridicat față de cel al electrodului de referință. Pentru anumite condiții experimentale, cum ar fi valori mici ale intensității curentului de descărcare și ale intensității curentului de termoemisie electronică, dar valori mari ale tensiunii aplicate pe anod, formațiunea de plasmă este înconjurată de o structură de potențial bine definită ce indică prezența unui strat dublu foarte puternic ($eV_{SD} \gg kT_e$, unde e reprezintă sarcina electrică a electronului, V_{SD} – căderea de potențial pe stratul dublu, k – constanta lui Boltzmann, iar T_e – temperatura electronilor). Prin urmare, ionii ce traversează această structură



de potențial vor căpăta energii comparabile cu căderea de potențial (de ordinul sutelor sau chiar miilor de volți) pe stratul dublu al descărcării electrice. Fluxul (energia și densitatea) de ioni metalici poate fi ajustat prin modificarea valorii tensiunii pe anod, curentului de descărcare, curentului de termoemisie pe filament, precum și prin modificarea geometriei și distanței dintre electrozi. În cazul propulsiei electrice, valoarea impulsului specific depinde liniar de viteza ionilor, iar cea a forței de propulsie depinde de produsul dintre viteza și densitatea de ioni din fascicul. În cazul arcului termoionic, atât energia cât și densitatea de ioni metalici depind de parametrii electrici ai descărcării care, la rândul lor, sunt puternic dependenți de natura materialului evaporat. Astfel, în cazul materialelor cu punct de topire ridicat (W, Ta, Re), ionii metalici au energie (viteză) foarte mare, dar concentrația lor în fluxul total de particule este mică, iar în cazul materialelor cu punct de topire scăzut (Zn, In, Sn, Pb), ionii metalici au energie mică, dar concentrație foarte mare.

Instalația și procedeul pentru obținerea de fascicule energetice de ioni metalici, **conform invenției**, prezintă următoarele avantaje:

- ✓ costul redus al materialului folosit pentru generarea de ioni metalici în comparație cu gazul folosit la motoarele ionice clasice (Xe);
- ✓ costurile reduse pentru transportul și depozitarea materialului folosit pentru generarea de ioni energetici datorită volumului redus al metalului în comparație cu cel al gazelor folosite pentru dispozitivele clasice de propulsie (*Ion Thruster* și *Hall Thruster*). De exemplu, în comparație cu Xe (comprimat la 200 atm.), aceeași cantitate masică de Cu ocupă un volum de 10 ori mai mic;
- ✓ eliminarea grilelor de accelerare/decelerare folosite în cazul motoarelor ionice clasice, care, în timp, se erodează și afectează performanțele dispozitivelor;
- ✓ controlul precis și independent al energiei și concentrației de ioni metalici din fasciculul de propulsie;
- ✓ parametri de performanță (impuls specific, forță de propulsie, eficiență totală) comparabili sau superiori dispozitivelor clasice de propulsie;
- ✓ posibilitatea folosirii unei game foarte variate de materiale pentru producerea de ioni metalici cu valori ale energiei (impuls specific) și densității (forță de propulsie) controlabile într-un domeniu foarte larg;





- ✓ sistemul propus poate fi utilizat deopotrivă pentru menținerea sau modificarea orbitelor sateliților artificiali folosiți în telecomunicații și în misiuni spațiale de lungă durată, dar și pentru obținerea în laborator de straturi metalice subțiri foarte compacte;
- ✓ sistemul propus funcționează în spațiul extraterestru și nu necesită incintă și sistem de depresurizare ca cele utilizate în experimentele din laborator;
- ✓ posibilitatea utilizării unui sistem de deplasare, de tip carusel, care permite alegerea materialului corespunzător controlului independent al impulsului specific sau al forței de propulsie;
- ✓ costul redus al soluției adoptate de prezenta invenție datorită simplității dispozitivului propus.

Se prezintă în continuare un **exemplu de realizare a invenției** în legătură cu Fig. 1,...6, care reprezintă:

Fig. 1. Schema instalației folosite pentru obținerea în laborator de fascicule energetice de ioni metalici cu ajutorul arcului termo-ionic pulsant în impulsuri de mare putere.

Fig. 2. Evoluțiile temporale ale tensiunii pe descărcare în cazul arcului termo-ionic pulsant.

Fig. 3. Evoluțiile temporale ale intensității curentului electric prin descărcare în cazul arcului termoinic pulsant.

Fig. 4. Evoluțiile temporale ale densității de curent ionic în cazul arcului termo-ionic pulsant.

Fig. 5. Distribuția axială a potențialului plasmei arcului termo-ionic ce funcționează în regim DC.

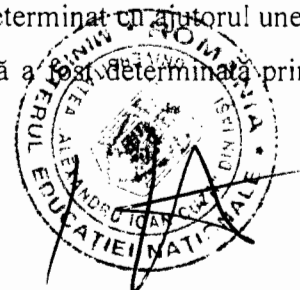
Fig. 6. Evoluțiile temporale ale potențialului plasmei arcului termo-ionic măsurate la diferite poziții față de anod. Parametrii descărcării arcului termo-ionic sunt: amplitudinea pulsului de tensiune aplicat pe catod de aproximativ +1,45 kV, durata pulsului de tensiune de circa 400 μ s, frecvența de repetiție a pulsurilor de tensiune de 1 kHz.

Instalația (**Fig. 1**), **conform invenției**, este compusă dintr-o incintă din oțel inoxidabil 1 sub forma unei incinte cilindrice cu diametrul de 80 cm și înălțimea de 40 cm, prevăzută cu diverse porturi pe care se montează ferestre pentru vizualizarea și diagnoza optică a plasmei, treceri electrice pentru diagnoza electrică a plasmei și sisteme de monitorizare a parametrilor fasciculului de ioni. Incinta poate fi depresurizată până la o presiune limită inferioară de Pa



folosind un sistem pentru producerea presiunilor joase (sistem de vidare sau de depresurizare) alcătuit dintr-o pompă turbomoleculară 2 și o pompă mecanică uscată 3. Sistemul de vidare este conectat la camera de depunere 1 prin intermediul unei trape de izolație 4. În incintă este montată o nacelă 5, sub formă de bărcuță, cu rol de anod al descărcării. Materialul 6 folosit pentru alimentarea plasmii arcului termo-ionic se prezintă sub formă de peleți de cupru cu formă paralelipedică, cu dimensiuni de 2 mm×3 mm×5 mm. Materialul este topit cu ajutorul unui tun de electroni format din filament 7 de wolfram și cilindru Wehnelt 8 din inox, fixat pe un sistem de deplasare 9 și alimentat de la o sursă de tensiune DC pulsată 10. Arcul termo-ionic este operat în regim DC pulsat cu ajutorul unui generator de pulsuri pozitive de înaltă tensiune 11 sau a unei surse DC de înaltă tensiune, cu polaritate pozitivă și comandă externă.

Parametrii definiți ai descărcării arcului termo-ionic în impulsuri de mare putere sunt: natura materialului folosit pentru producerea ionilor metalici (în cazul de față, Cu), amplitudinea pulsului de tensiune aplicat pe anod, frecvența de repetiție a pulsului de tensiune și durata pulsului de tensiune, valoarea intensității curentului electric pe descărcare, valoarea intensității curentului prin filamentul tunului de electroni, distanța dintre nacelă și tunul de electroni, precum și unghiul dintre normala la suprafața nacelei și axul tunului de electroni. Pentru operarea arcului termo-ionic pulsat se procedează astfel: se încălzește până la termo-emisie filamentul tunului de electroni prin aplicarea unei tensiuni, în modul DC, pe capetele acestuia, apoi se aplică pulsuri de înaltă tensiune și polaritate pozitivă între anodul din W, ce conține peleți (granule) de Cu, și tunul de electroni care este conectat, împreună cu pereții incintei, la electrodul de referință. Se ajustează parametrii de proces (amplitudinea pulsului de tensiune aplicat pe anod, frecvența de repetiție a pulsului de tensiune și durata pulsului de tensiune, valoarea intensității curentului prin filamentul tunului de electroni, distanța dintre nacelă și tunul de electroni) astfel încât în timpul funcționării arcului termo-ionic să nu apară fluctuații necontrolabile ale parametrilor electrici ai descărcării. Distribuția spațială și evoluția temporală a potențialului plasmii au fost măsurate cu ajutorul unei sonde emiseive. Energia ionilor metalici a fost măsurată cu ajutorul unui spectrometru cu deflexie în câmp magnetic (spectrometru Dempster). Fluxul de ioni metalici a fost măsurat cu ajutorul unui colector, cu formă de disc, cu diametrul de 50 mm, polarizat cu -100 V față de referință. Fluxul total de particule, ioni și neutri, a fost determinat cu ajutorul unei micobalanțe cu quartz, iar rata de consumare a materialului din nacelă a fost determinată prin măsurători gravimetrice.



În **Fig. 2** sunt prezentate evoluțiile temporale ale tensiunii aplicate pe descărcare, măsurate cu ajutorul unei sonde de tensiune 1:100. Pentru aceasta, plasma arcului termo-ionic este aprinsă în vapori metalici din cupru aplicând pulsuri de tensiune cu amplitudinea pulsului de tensiune cuprinsă între 0.8 până la 1.2 kV, cu durata de circa 100 μ s și frecvența de repetiție de 3 kHz. Distanța dintre nacele și tunul de electroni a fost de 10 mm, iar unghiul dintre normala la suprafața nacelei și axul tunului de electroni a fost de 60°. Modificând valoarea intensității curentului mediu pe descărcare între 0,2 și 0,5 A, valoarea maximă a tensiunii pe durata pulsului de tensiune crește de la 800 la 1050 V. În anumite condiții, de exemplu, reducând frecvența de repetiție la 1 kHz, se pot atinge valori ale tensiunii pe descărcare de +3 kV.

Intensitatea curentului electric prin descărcare (**Fig. 3**), măsurată cu ajutorul unei sonde de curent (factor de transformare 1V/1A), suferă variații mari atât pe durata pulsului de tensiune, cât și după întreruperea tensiunii pe descărcare. În timpul pulsului de tensiune, intensitatea curentului electric crește cu creșterea tensiunii pe descărcare, atingând valoarea maximă de 1,2 A, iar pentru valori ale tensiunii pe puls de 2 kV, valoarea maximă a intensității curentului este de 2 A.

Densitatea de curent ionic (**Fig. 4**), măsurată la distanța de 200 mm de suprafața nacelei cu ajutorul unui colector electrostatic polarizat la -100 V față de referință, suferă de asemenea modificări pe durata pulsului de înaltă tensiune. Valoarea maximă a densității de curent ionic atinge valoarea de 1,12 mA/cm² pentru valori ale tensiunii și curentului de descărcare de 1050 V, respectiv, 1,2 A. Creșterea densității curentului ionic de saturație se datorează proceselor de ionizare ale atomilor de cupru evaporați sub acțiunea electronilor proveniți atât din plasma arcului termo-ionic, cât și de la tunul de electroni.

În **Fig. 5** este prezentată distribuția axială a potențialului plasmei arcului termo-ionic ce funcționează în regim DC. Parametrii descărcării arcului termo-ionic sunt: tensiune aplicată pe anod de aproximativ +850 V, intensitatea curentului de descărcare de 200 mA, distanța dintre nacele și tunul de electroni de aproximativ 10 mm, iar unghiul dintre normala la suprafața nacelei și axul tunului de electroni de 60°. Distribuția axială a potențialului plasmei indică prezența unui puternic strat dublu cu valori ale căderii de tensiune comparabile sau chiar mai mari decât tensiunea aplicată pe descărcare. Stratul dublu format în plasma arcului termo-ionic facilitează obținerea de fascicule de ioni foarte energetice, valoarea energiei (sute de eV sau câțiva keV)



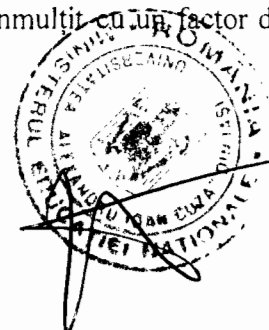
fiind comparabilă cu energia câștigată de ioni în căderea de potențial a stratului dublu. Mai mult, măsurătorile electrice realizate cu ajutorul spectrometrului Dempster au arătat că fasciculul de ioni este cvasi-monoenergetic, căderea de potențial pe stratul dublu fiind aproximativ egală cu tensiunea aplicată pe anod (V. Tiron, M. Dobromir, V. Pohoata and G. Popa, *IEEE Transaction on Plasma Science* 39 (2011) 1403-1407).

În **Fig. 6** sunt prezentate evoluțiile temporale ale potențialului plasmei arcului termo-ionic în regim pulsant, măsurate la diferite distanțe de anod (nacelă). Parametrii descărcării arcului termo-ionic sunt: amplitudinea pulsului de tensiune aplicat pe catod de aproximativ +1450 V, durata pulsului de tensiune de circa 400 μ s, frecvența de repetiție a pulsurilor de tensiune de 1 kHz. Distanța dintre nacelă și tunul de electroni a fost de 10 mm, iar unghiul dintre normala la suprafața nacelei și axul tunului de electroni a fost de 60° . Dintre caracteristicile prezentate în **Fig. 6**, se pot obține distribuțiile spațio-temporale ale potențialului plasmei (similare celor din **Fig. 5**), care pun în evidență prezența unui puternic strat dublu, cu căderi de potențial de aproximativ 1500 V, la diferite momente de timp. Coroborarea datelor prezentate în **Fig. 5** și **6** arată că plasma din regiunea anodului, respectiv stratul dublu asociat acesteia, expandează în incinta depresurizată în care presiunea la nivelul pereților este de 10^{-3} Pa, cu viteza medie supersonică de aproximativ 450 m/s.

Rezultatele experimentale prezentate în **Fig. 1-6**, precum și rezultatele obținute cu ajutorul collectorului electrostatic (fluxul de ioni), microbalanței cu quartz (fluxul total de particule) și spectrometrului Dempster (energia ionilor metalici) oferă informațiile necesare pentru calcularea parametrilor specifici de performanță pentru propulsorul electric. În continuare, se definesc și se calculează valorile parametrilor de performanță (**Tabel 1**): forța de propulsie (T), impulsul specific (I_{sp}) și eficiența totală (η_T) (Dan M. Goebel and Ira Katz, *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters*, JPL SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY SERIES, 2008).

Forța de propulsie (T) se definește ca forța exercitată de către propulsor asupra vehicului spațial și este egală cu variația în timp a impulsului mecanic datorat "consumului de combustibil" care, în cazul de față este materialul evaporat de la anod, înmulțit cu un factor de corecție γ :

$$T = \gamma \frac{d}{dt} (m_c v_{ev}) = \gamma \frac{dm_c}{dt} v_{ev} = \gamma \dot{m}_c v_{ev}$$



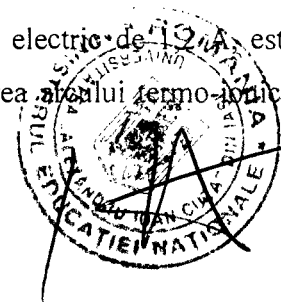
unde \dot{m}_c este rata de consum a combustibilului, exprimată în kg/s, v_{ev} este viteza de evacuare a combustibilului care, în cazul de față este reprezentat de viteza ionilor din fasciculul generat de sistem. În cazul în care fasciculul de ioni este unidirecțional, monoenergetic și format doar din ioni cu o singură sarcină electrică această viteză este constantă în timp. γ reprezintă factorul de corecție al forței de propulsie.

Factorul de corecție γ este egal cu produsul a doi factori, unul datorat divergenței fasciculului de ioni, iar celălalt datorat faptului că fasciculul de ioni este format dintr-un amestec de ioni care pot fi cu o singură sarcină electrică sau cu multiple sarcini electrice. Așadar,

$$\gamma = F_i \alpha$$

unde F_i este factorul de divergență, iar α este factorul datorat speciilor ionice cu sarcină multiplă. $F_i = \cos \theta$, unde θ reprezintă jumătate din valoarea unghiului de divergență a fasciculului.

În cazul arcului termo-ionic, combustibilul este format din ionii de Cu ($\dot{m}_c = \dot{m}_i$), iar viteza de evacuare a combustibilului este egală cu viteza ionilor de cupru ($v_c = v_i$) ce sunt accelerați în căderea de potențial a stratului dublu. Pentru un set dat de parametri de proces ai arcului termo-ionic, cum ar fi valoarea tensiunii pe arc de 1 kV (Fig. 2) și valoarea intensității curentului electric pe durata pulsului de 1,2 A (Fig. 3), valoarea energiei cinetice a ionilor de Cu (măsurată cu ajutorul spectrometrului Dempster) a fost în jur de 1 keV, ceea ce corespunde unei viteze de aproximativ 55 km/s. Pentru același set de parametri de proces, ținând cont de rezultatele măsurătorilor asupra ratei de consum a materialului din nacelă (calculată folosind metoda gravimetrică), a ratei de depunere și a densității de curent ionic (Fig. 4), rata de consum a combustibilului, adică a ionilor de Cu, este de aproximativ 9×10^{-7} kg/s. Dacă se ia în considerare că fasciculul de ioni este format doar din ioni cu o singură sarcină electrică ($\alpha = 1$), iar unghiul de divergență a fasciculului de ioni este de 60° , rezultă un factor de corecție $\gamma = 0.866$. Ținând cont de toate aceste valori, rezultă o forță de propulsie $T = \gamma \dot{m}_i v_i$ de aproximativ 43 mN. Pentru valori ale tensiunii și intensității curentului electric de descărcare de 2 kV, respectiv 2 A, se pot atinge valori ale forței de propulsie de până la 87 mN. Ținând cont că valoarea forței de propulsie depinde de puterea electrică consumată de propulsor, pentru a putea compara performanțele propulsoarelor electrice, este indicat ca forța de propulsie să fie normată la puterea electrică consumată de către propulsor. În cazul arcului termo-ionic, puterea electrică totală consumată pentru a obține tensiuni pe arc de 1 kV și intensități ale curentului electric de 1,2 A este de aproximativ 450 W. Puterea electrică medie consumată de descărcarea arcului termo-ionic este



de aproximativ 330 W, iar cea consumată de tunul de electroni de aproximativ 120 W (tensiune de 17 V, curent de 7 A). Așadar, forța de propulsie normală la puterea consumată este de aproximativ 95,5 mN/kW. Puterea electrică consumată de către tunul de electroni poate fi puternic diminuată prin folosirea de filamente confecționate din materiale cu emisivitate foarte mare, cum ar fi wolfram thoriat, wolfram acoperit cu oxid de lanthanium sau hexaborură de lanthanium (LaB6).

Impulsul specific (I_{sp}) reprezintă eficiența forței de propulsie și se definește ca raportul dintre forța de propulsie și produsul dintre rata de consum a combustibilului folosit pentru propulsie și accelerația gravitațională, g :

$$I_{sp} = \frac{T}{\dot{m}_c g}$$

Ținând cont că $T = \gamma \dot{m}_i v_i$, rezultă

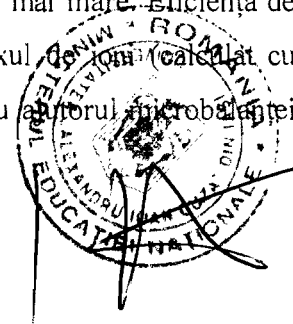
$$I_{sp} = \frac{\gamma \dot{m}_i v_i}{\dot{m}_c g}$$

Raportul $\frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_c} = \eta_m$ definește eficiența de utilizare a masei combustibilului și reprezintă fracția de combustibil convertită în ioni care sunt folosiți pentru propulsie prin accelerarea lor în câmpuri electrice.

Așadar,

$$I_{sp} = \frac{\gamma \eta_m v_i}{g}$$

În cazul arcului termo-ionic, pentru valori ale tensiunii pe arc de 1 kV și ale intensității curentului electric pe durata pulsului de 1,2 A, eficiența de utilizare a materialului evaporat și ionizat este de aproximativ 20%, iar valoarea impulsului specific este de 975 s. Este foarte important de menționat faptul că această valoare a fost calculată pentru cazul în care ne plasăm în imediata vecinătate a Pământului și accelerația gravitațională medie are valoarea de 9,81 m/s². În cazul sateliților geostaționari, de exemplu, situați la altitudini de aproximativ 35 000 km, ținând cont de variația accelerației gravitaționale cu altitudinea, aceasta scade până la valoarea de 0,23 m/s² ceea ce ar duce la o valoare a impulsului specific de 42,65 ori mai mare. Eficiența de utilizare a materialului evaporat a fost estimată din raportul dintre fluxul de ioni calculat cu ajutorul colectorului electrostatic și fluxul total de particule (măsurat cu ajutorul microbalanței



cu quartz). Pentru valori ale tensiunii pe arc de 2 kV și ale intensității curentului electric pe durata pulsului de 2 A, eficiența de utilizare a materialului evaporat și ionizat este de aproximativ 70%, iar valoarea impulsului specific este de 4825 s.

Eficiența totală a propulsorului (η_T) definește raportul dintre puterea jetului de ioni și puterea totală consumată de către propulsor și are expresia:

$$\eta_T = \gamma^2 \eta_e \eta_m$$

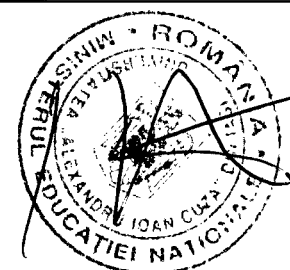
unde η_e reprezintă eficiența electrică a propulsorului și se definește ca raportul dintre puterea fascicului de ioni și puterea totală consumată de propulsorul electric.

În cazul arcului termo-ionic în vid, pentru valori ale tensiunii pe arc cuprinse între 1 și 2 kV și valori ale intensității curentului electric cuprinse între 1,2 și 2 A, eficiența electrică variază între 75 și 90%, iar cea totală între 11 și 47%.

În **Tabelul 1** sunt comparați parametrii experimentali și de performanță ai plasmei arcului termo-ionic cu cei obținuți în cazul unor motoare ionice clasice de tip *XIPS Ion Thruster* și *STP Hall Thruster*. Pentru anumite condiții experimentale, parametrii de performanță ai plasmei arcului termo-ionic sunt comparabili sau superiori (I_{sp} și T/P_T mai mari) celor ai motoarelor ionice clasice de tip *XIPS Ion Thruster* și *STP Hall Thruster*.

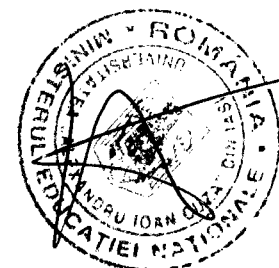
Tabel 1 Comparație între parametrii experimentali și de performanță ai plasmei arcului termo-ionic și cei obținuți în cazul unor motoare ionice de tip *Ion-Thruster* sau *Hall Thruster*.

Parametri specifici	XIPS ion thruster	STP Hall thruster	TVA thruster
Putere (W)	2000 - 4300	350 - 1350	450 - 1350
Impuls specific I_{sp} (s) (calculat pentru $g = 9,81$ m/s^2)	3420 - 3550	1100 - 1600	975 - 4825
Thrust T (mN)	80 - 166	20 - 80	43 - 87
Eficiență totală η_T (%)	67,0 - 68,8	35 - 50	11 - 47
Eficiență electrică η_e (%)	87,0 - 87,5	-	75 - 90



5/

Eficiență de utilizare a masei η_m (%)	80,0 - 82,5	-	20 - 70
T/P_T (nm/kW)	40,0 - 38,6	57 - 59	95,5 - 64,4
Tensiune accelerare (V)	1215	300	1000 - 2000
Curent ionic (A)	1,45 - 3,05	1,17 - 4,50	1 - 2



INSTALAȚIE ȘI PROCEDEU DE OBȚINERE DE FASCICULE ENERGETICE DE IONI METALICI CU APLICAȚIE ÎN PROPULSIA ELECTRICĂ ÎN SPAȚIU

Revendicări

1. **Instalație și procedeu** de obținere a fasciculelor energetice de ioni metalici cu fluxuri controlabile, cu aplicație în propulsia electrică în spațiu, caracterizate prin aceea că utilizează plasma arcului termo-ionic pulsat, ablația materialelor metalice și controlul energiei și densității de ioni metalici în fascicul.
2. **Procedeu** de obținere a fasciculelor energetice de ioni metalici, **conform revendicării 1**, caracterizat prin aceea că operând arcul termo-ionic în regim pulsat se poate controla energia ionilor în domeniul 0,8 – 3 keV fără a folosi grile pentru accelerare sau câmpuri magnetice.
3. **Instalație** pentru propulsia electrică, **conform revendicării 1**, caracterizată prin aceea că parametrii de performanță (impulsul specific și forța de propulsie) pot fi controlați într-un domeniu larg prin: alegerea adecvată a metalului care, prin natura sa (punct de topire, masă atomică) permite controlul independent al impulsului specific sau al forței de propulsie; alegerea convenabilă a configurației de pulsuri (durata, frecvența, tensiunea și intensitatea curentului electric pe puls) a curentului de termoemisie a filamentului; respectiv, alegerea convenabilă a geometriei electrozilor și a dispunerii lor.



INSTALAȚIE ȘI PROCEDEU DE OBTINERE DE FASCICULE ENERGETICE DE IONI METALICI CU APLICAȚIE ÎN PROPULSIA ELECTRICĂ ÎN SPAȚIU

Desene

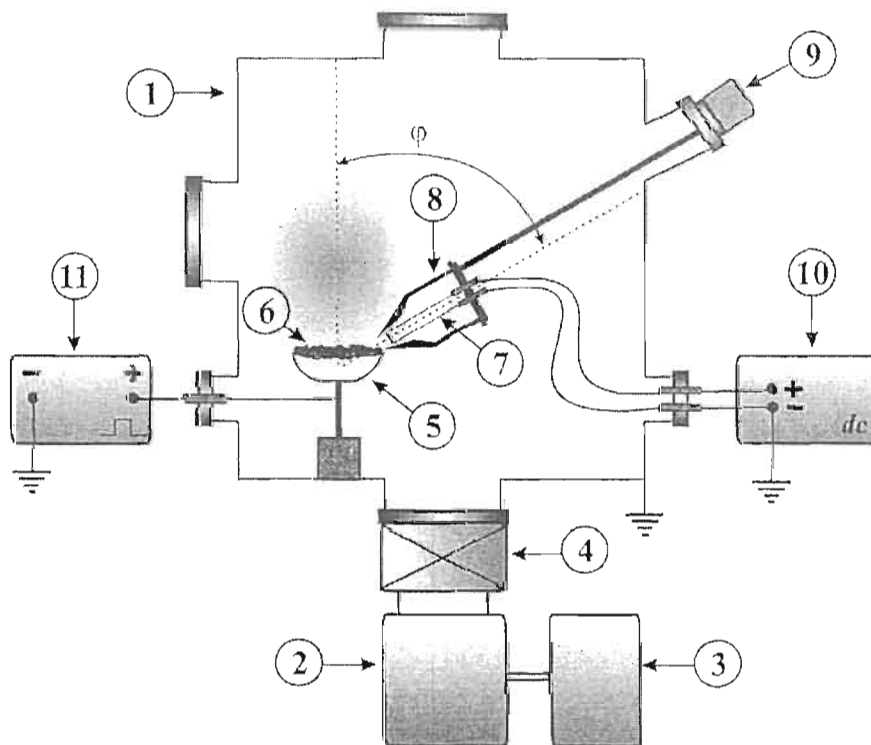


Fig. 1. Schema instalației folosite pentru obținerea de fascicule energetice de ioni metalici cu ajutorul arcului termo-ionic pulsat în impulsuri de mare putere.



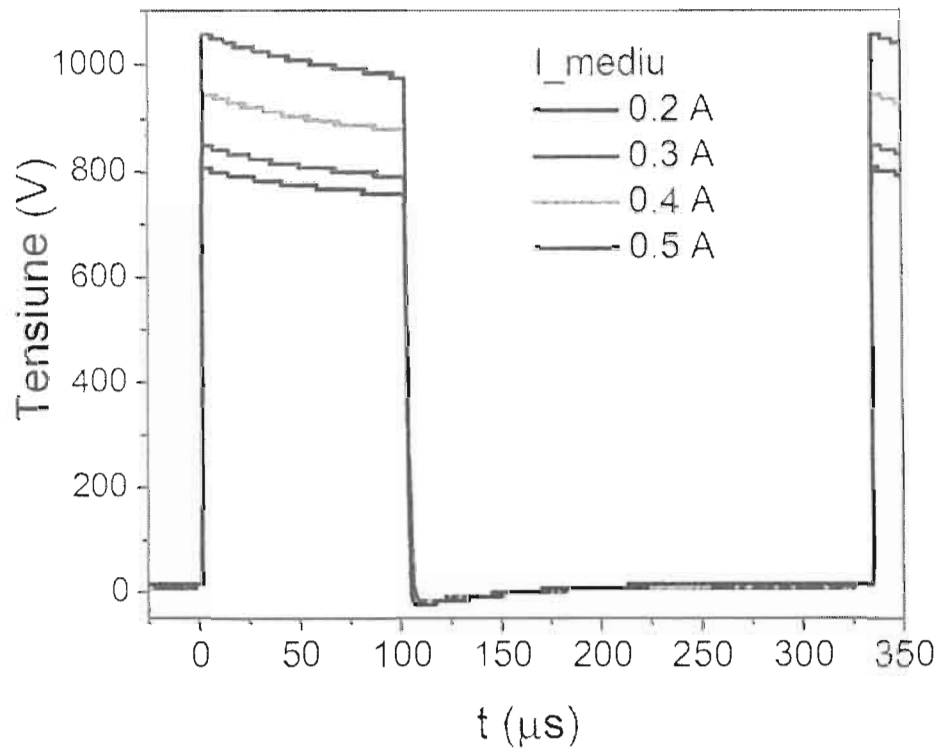


Fig. 2. Evoluțiile temporale ale tensiunii pe descărcare în cazul arcului termo-ionic pulsat.



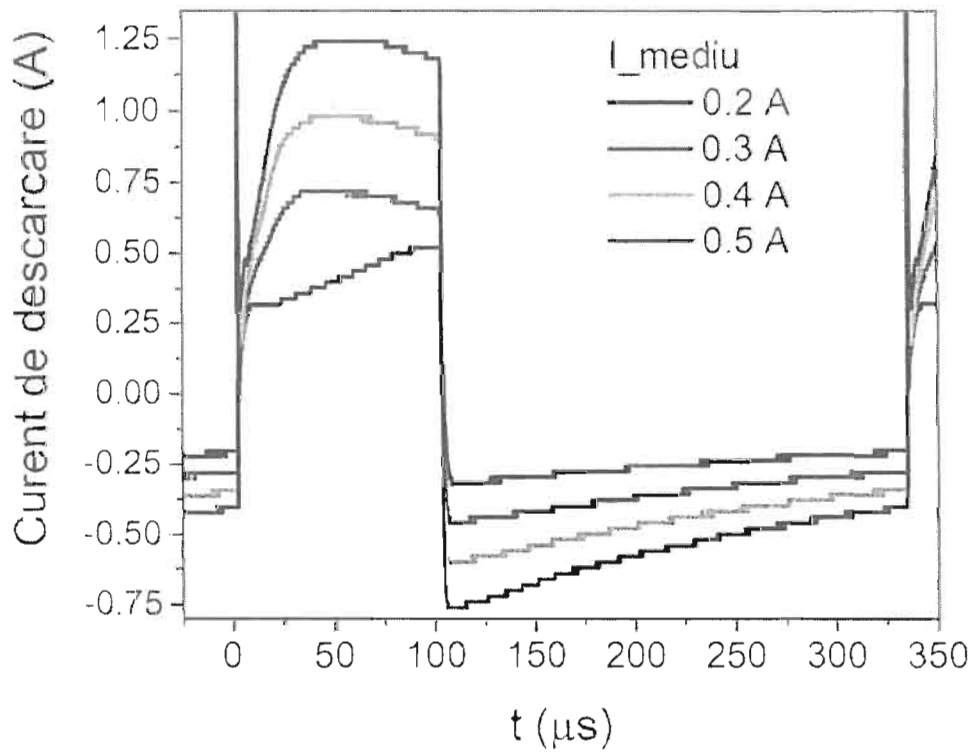


Fig. 3. Evoluțiile temporale ale intensității curentului electric pe descărcare în cazul arcului termoinic pulsat.



46

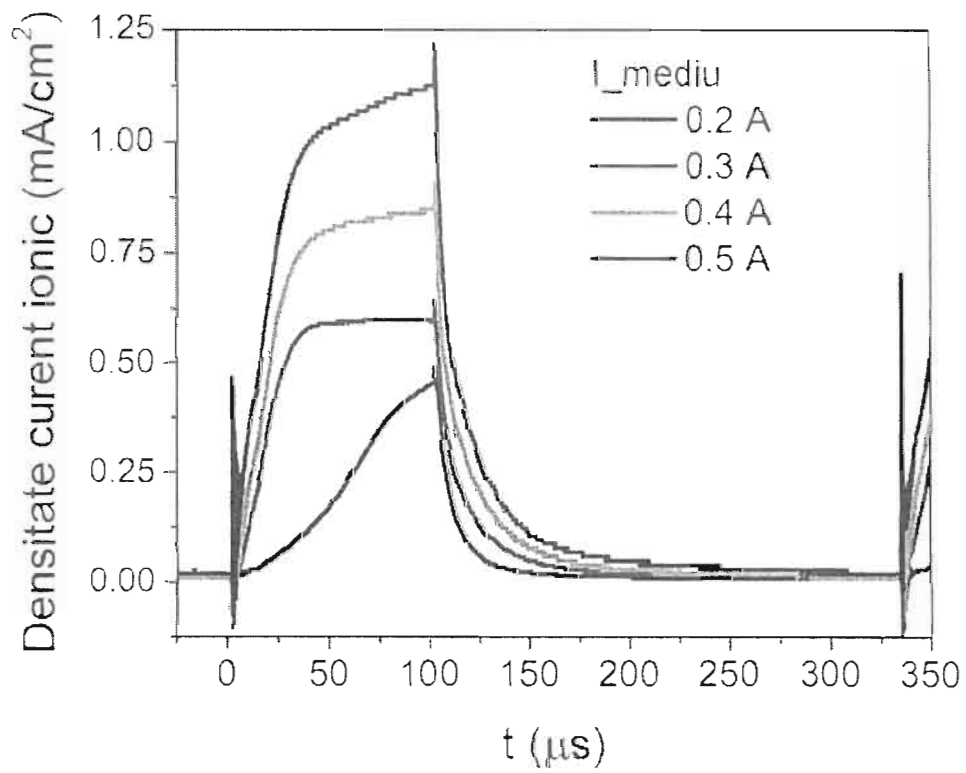


Fig. 4. Evoluțiile temporale ale densității de curent ionic în cazul arcului termo-ionic pulsat.



45

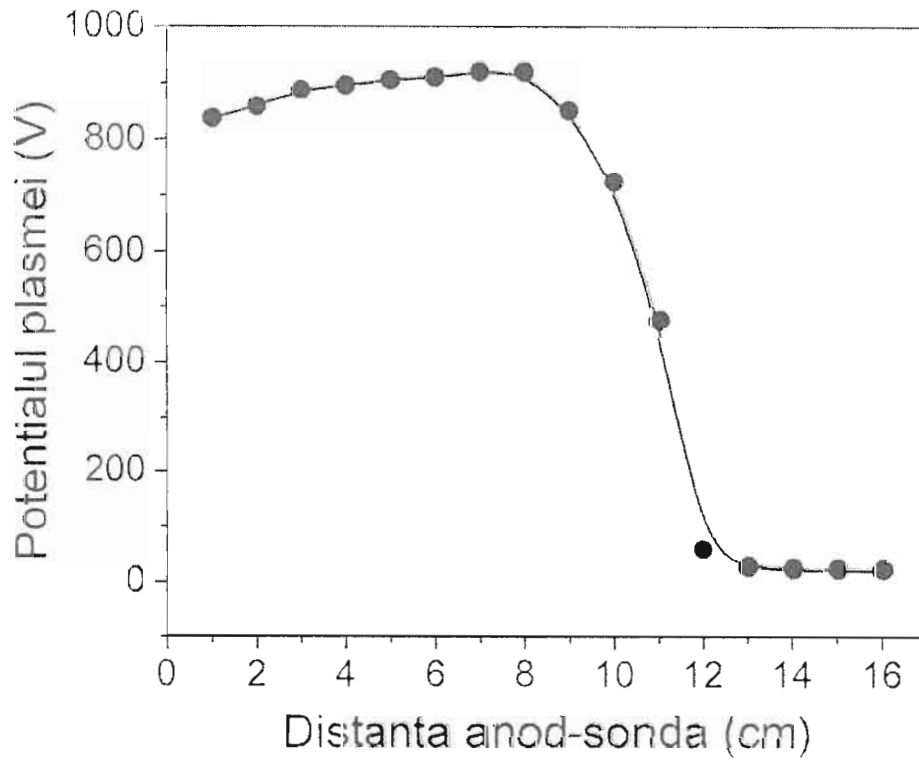
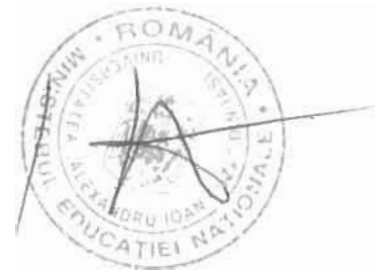


Fig. 5. Distribuția axială a potențialului plasmei arcului termo-ionic ce funcționează în regim DC.



ε

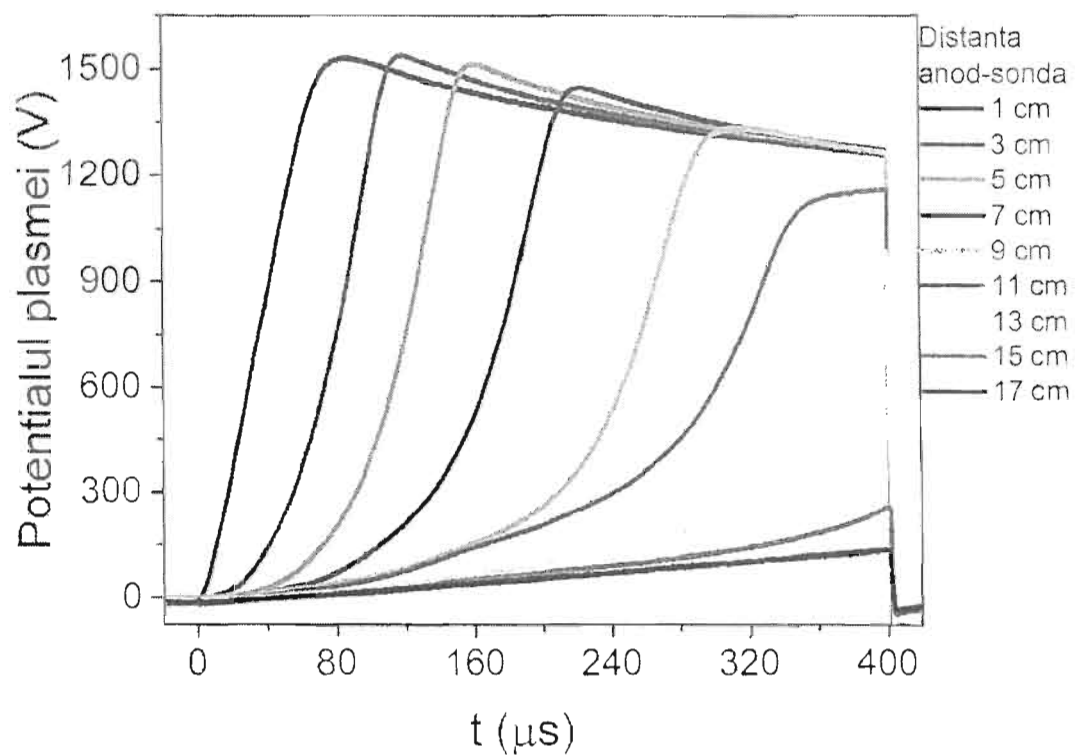


Fig. 6. Evoluțiile temporale ale potențialului plasmei arcului termo-ionic măsurate la diferite poziții față de anod. Parametrii descărcării arcului termo-ionic sunt: amplitudinea pulsului de tensiune aplicat pe catod în jur de +1,45 kV, durata pulsului de tensiune de circa 400 μs , frecvența de repetiție a pulsurilor de tensiune de 1 kHz.

