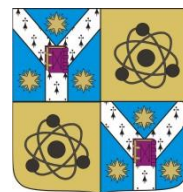


UNIVERSITATEA “ALEXANDRU IOAN CUZA”, IASI

FACULTATEA DE FIZICĂ



Centrul de Cercetări Avansate în Fizica
Plasmei din Iași (IPARC)



**Proprietățile tribologice la scală nanoscopică a suprafețelor
materialelor procesate cu plasma descărcărilor electrice în gaze
rarefiate**

- *Rezumatul tezei de doctorat* -

Sabina TEODOROFF - ONESIM (căs. Chiriac II)

**Coordonator științific,
Prof. Dr. habil Lucel SÎRGHI**

Iași, 2022

În atenția

.....

UNIVERSITATEA „ALEXANDRU IOAN CUZA” DIN IAȘI
FACULTATEA DE FIZICĂ

Vă facem cunoscut că în ziua de 09.09.2022, ora 12:00, în sala Laborator Plasmă 1, doctoranda **TEODOROFF-ONESIM N. SABINA (căs. CHIRIAC II)** va susține, în ședință publică, teza de doctorat cu titlul **„PROPRIETĂȚILE TRIBOLOGICE LA SCALĂ NANOSCOPICĂ A SUPRAFEȚELOR MATERIALELOR PROCESATE CU PLASMA DESCĂRCĂRILOR ELECTRICE ÎN GAZE RAREFIATE”,** în vederea obținerii titlului științific de doctor în domeniul fundamental **ȘTIINȚE EXACTE**, domeniul **FIZICĂ**.

Comisia de doctorat are următoarea componență:

Președinte:

Prof. univ. dr. **Diana MARDARE**, Directorul Școlii Doctorale, Facultatea de Fizică, Universitatea „Alexandru Ioan Cuza”, Iași.

Conducător științific:

Prof. univ. dr. habil **Lucel SÎRGHI**, Facultatea de Fizică, Universitatea „Alexandru Ioan Cuza”, Iași.

Referenți:

- C.S.I Dr. **Gheorghe DINESCU**, Institutul Național de Fizica Laserilor, Plasmă și Radiații, Măgurele, București.
- Prof. univ. dr. **Mihaela PASCU**, Universitatea de Medicină și Farmacie „Grigore T. Popa”, Iași.
- Prof. univ. dr. **Gabriela BORCIA**, Universitatea „Alexandru Ioan Cuza”, Iași.

Teza poate fi consultată la Biblioteca Facultății de Fizică.

Abstract

Sinteza de straturi subțiri stă la baza progreselor tehnologice continue realizate în domeniul cercetării și a dezvoltării de dispozitive electronice, optoelectronice, fotonice, magnetice, sisteme electromagnetice, etc. În ultimii ani straturile subțiri sunt intens studiate ca tehnică de modificare a proprietăților de suprafață a unor materiale, dezvoltându-se astfel noi domenii de cercetare în fizică și chimie.

În această teză sunt discutate și analizate rezultatele experimentelor efectuate în laboratorul de Fizica Plasmei de la Universitatea „Al. I. Cuza”, Iași, privind câteva materiale intens studiate în ultima perioadă ca straturi subțiri depuse pe diverse substraturi în scopul îmbunătățirii proprietăților tribologice a suprafețelor atât la scară microscopică cât și la scară macroscopică. Este vorba de depuneri de filme subțiri (moleculare) de octadecyltrichlorosilane (OTS) în scopul reducerii forțelor de adeziune și frecare la contacte micro- sau nano- scopice cu aplicații în fabricarea dispozitivelor MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems, eng*) și filme subțiri de carbon diamantat, DLC (*Diamond Like Carbon, eng*), un material care conferă duritate sporită, frecare scăzută, rezistență la uzură mare și inerta chimică suprafețelor atât la scară nanoscopică cât și la scară macroscopică. De asemenea au fost studiate proprietățile tribologice la scară nanoscopică a filmelor subțiri de nitrură de siliciu, (SiN_x) și nitrură de siliciu hidrogenată (SiN:H), materiale care de asemenea sunt intens studiate în ultimii ani pentru proprietățile lor tribologice superioare.

Filmele de OTS au fost depuse pe substraturi de sticlă sau siliciu hidroxilate în prealabil în plasma unei descărcări luminescente în aer saturat cu vapori de apă la presiune redusă și apoi expuse la vapori de OTS. În cazul acestor filme am studiat cinetica depunerii, rolul apei de pe substrat în formarea unui film monomolecular complet, precum fenomenele de frecare și de uzură la scară nanoscopică.

Filmele de DLC au fost obținute prin pulverizare a unei ținte de carbon în atmosferă de argon în descărcări magnetron în curent continuu (*DCMS, Direct Current Magnetron Sputtering, eng*) și în impulsuri de mare putere (*HIPIMS, eng*). În literatura de specialitate aceste filme sunt frecvent menționate ca având o multitudine de aplicații datorită proprietăților lor mecanice, termice, electrice, tribologice etc. Folosind diferite tehnici de depunere și modificând parametri ai depunerilor (compoziția gazului de lucru, amplitudinea pulsurilor de tensiune) am obținut filme cu structură variind de la cele mai apropiate de grafit la cele mai apropiate de diamant. Proprietățile tribologice la scară nanoscopică ale acestor filmelor au fost

investigate cu ajutorul microscopiei cu forță atomică în corelare cu structura lor în scopul stabilirii unei structuri optime pentru care filmele manifestă forță de frecare minimă și în același timp o duritate suficient de mare pentru a fi utilizate în diverse aplicații ca straturi cu aplicații tribologice.

Filmele subțiri de nitrură de siliciu (SiN_x) respectiv nitrură de siliciu hidrogenat (SiN:H) au fost depuse folosind o descărcare de tip HiPIMS. Am obținut filme cu suprafețe foarte netede (rugozitate la scară nanoscopică foarte mică), lucru care face ca aceste filme să fie interesante pentru aplicații ca straturi cu aplicații tribologice sau ca straturi optice antireflexive. Proprietățile tribologice la scară nanoscopică în aer și în apă a acestor filme au fost investigate cu ajutorul tehnicilor microscopiei cu forță atomică utilizând sonde cu vârfuri din nitrură de siliciu. Remarcabil pentru aceste filme este absența forțelor de adeziune în apă între suprafețele de nitrură de siliciu ale probei AFM și filmele studiate, ceea ce are ca rezultat forțe de frecare în apă foarte mici. Lucrarea se încheie cu un capitol de concluzii generale care sumarizează studiile experimentale întreprinse, rezultatele obținute și concluziile lor.

1. Introducere

Recenta evoluție a cunoașterii umane și a dezvoltării tehnologice a îndreptat atenția oamenilor de știință către fenomenele ce au loc la scară nanoscopică, astfel apărând o nouă ramură a științei și tehnologiei, și anume nanotehnologia. La această dezvoltare a contribuit foarte mult evoluția recentă a tehnicilor de microscopie, care a făcut posibilă cercetarea fenomenelor la scară microscopică și nanoscopică, astfel observându-se comportamente ale materialelor diferite la scară nanometrică față de scara macroscopică.

Prezenta teză de doctorat se concentrează pe sinteza cu ajutorul plasmei descărcărilor electrice în gaze rarefiate de filme subțiri cu proprietăți tribologice superioare urmărindu-se durificarea suprafețelor, micșorarea forțelor de adeziune, diminuarea efectelor condensării capilare a apei la contacte nanoscopice, micșorarea coeficientului de frecare, creșterea rezistenței la uzură și diminuarea pierderilor de energie prin frecare. Teza este focalizată pe studiul sintezei structurii și proprietăților filmelor monomoleculare de octadecyltriclorsilane (OTS), filmelor de carbon diamantat (*DLC*, eng. *Diamond Like Carbon*) și nitrură de siliciu. Structura și proprietățile fizice și chimice ale filmelor depuse sunt studiate în corelație cu procesele de depunere. De asemenea, caracterizarea tribologică a suprafețelor acestor filme este făcută la scară nanoscopică cu ajutorul microscopiei cu forță atomică.

Lucrarea este structurată în cinci capitole după cum urmează: Capitolul I, este o scurtă introducere în domeniul filmelor subțiri cu aplicații în tribologie unde sunt introduse principalele materiale folosite pentru modificarea proprietăților tribologice ale suprafețelor, metodele de sinteză a filmelor subțiri cu proprietăți tribologice îmbunătățite (frecare mică, rezistență la uzură mare, duritate mare) și principalele tehnici de evaluare a proprietăților tribologice la scară nanoscopică și macroscopică utilizate curent în cercetare. De asemeni sunt prezentate cele trei modele teoretice principale ale contactului mecanic la nivelul unei singure asperități la scară nanometrică și anume modelele Hertz (1882), Johnson-Kendall-Roberts (JKR 1971) și respectiv Derjaguin-Muller-Toporov (MDT, 1975), precum și tranziția de la modelul JKR la modelul MDT. În final sunt prezentate metodele de măsură a forțelor de frecare și adeziune la contactul într-un singur punct (asperitate) la scară nanometrică.

În cel de-al doilea capitol sunt prezentate materialele și metodele utilizate pentru realizarea studiilor întreprinse în această teză. Sunt prezentate detalii legate de optimizarea procesului de depunere în fază de vapori a straturilor moleculare de octadecyltriclorsilane (OTS) pe substrat de siliciu activat cu plasmă, dar și tehnicile folosite pentru depuneri de filme DLC și nitrură de siliciu (Si_3N_4) prin pulverizare magnetron.

Capitolul al treilea debutează cu o prezentare generală a filmelor de OTS, cum se obțin acestea precum și câteva domenii în care sunt folosite cu succes. În continuare este prezentată metoda de depunere în vapori a straturilor de octadecyltriclorsilane, utilizată în prezenta teză. Apoi sunt prezentate rezultatele experimentale privind cinetica creșterii filmului de OTS și importanța cantității de apă de pe substrat în timpul depunerii în vapori. Este evidențiat faptul că o cantitate insuficientă de apă duce la formarea incompletă a filmului monomolecular de OTS, în timp ce o cantitate prea mare de apă pe substrat duce la formarea de agregate 3D de OTS polimerizat. În cele din urmă sunt prezentate rezultate privind proprietățile fizice și chimice ale straturilor de OTS obținute în condiții optime de depunere și rezultate ale investigării uzurii la frecare și a forțelor de adeziune și frecare la scară nanoscopică.

Cel de-al patrulea capitol este dedicat studiului tribologic la scară nanoscopică a filmelor de diamond-like-carbon (DLC) și nitrură de siliciu (SiN_x) obținute prin depuneri prin pulverizare magnetron în curent continuu (*DCMS, eng. Direct Current Magnetron Sputtering*) și pulverizare magnetron în pulsuri de mare putere (*HiPIMS, eng. High Power Impulse Magnetron Sputtering*). Prin folosirea de tehnici diferite de depunere prin pulverizare magnetron (DCMS, HiPIMS monopolar și HiPIMS bipolar) și prin modificarea anumitor parametrii de depunere s-au obținut filme DLC cu structuri chimice diferite, i.e. valori diferite ale raportului densităților de legături chimice sp^2 (caracteristice grafitului)/, sp^3 (caracteristice

diamantului). În teză am obținut filme DLC cu o densitate de legături sp^3 ce a variat între 18% (filme depuse prin DCMS) și 51% (filme depuse prin HIPIMS bipolar). Proprietățile tribologice ale acestor filme la scară nanoscopică au fost investigate cu ajutorul microscopiei cu forță atomică în raport cu structura lor chimică în scopul stabilirii unei structuri optime pentru care filmele au forță de frecare minimă și în același timp o duritate suficient de mare pentru a fi utilizate în diverse aplicații ca straturi tribologice.

Lucrarea se încheie cu un capitol de concluzii generale care descrie în sinteză principalele rezultate obținute.

2. Rezultate

2.1 Sinteza filmelor monomoleculare de OTS în vapori pe substraturi de siliciu activate cu plasmă.

Filmele compacte de OTS SAMs pe substrat de siliciu au fost obținute printr-o succesiune de etape constând în 1) curățarea și hidroxilarea substratului de siliciu; 2) expunerea substratului la vapori de apă pentru a forma un monostrat molecular de apă adsorbită pe suprafață; 3) depunerea unui strat molecular autoasamblat de OTS în vapori; 4) coacerea substratului cu filmul depus la 100°C în aer. Hidroxilarea substratului de siliciu s-a realizat prin expunerea substratului la acțiunea plasmă luminii negative a unei descărcări în current continuu în aer saturat cu vapori de apă la presiune joasă. Pentru a reduce contaminarea substratului și a stratului molecular depus, precum și pentru a avea un bun control al cantității de apă pe substrat, activarea chimică a suprafeței substratului de siliciu prin hidroxilare și depunerea în vapori de OTS au fost efectuate în aceeași incintă. Acest lucru a permis controlul cantității de apă pe substratul de siliciu hidroxilat, știind că apa acționează ca un catalizator pentru reacția de silanizare dintre moleculele de OTS și substratul hidroxilat de siliciu.

Pentru a studia cinetica formării straturilor de OTS pe substraturi de siliciu hidroxilate am efectuat o serie de experimente în care am variat timpul de depunere de la 2 h la 12 h, menținând timpul de expunere a substratului hidroxilat la vapori de apă și presiunea parțială a acestora la valori optime (2 minute la presiunea de 23 mTorr). După cum se poate observa din **figura 2.1** după primele 2 ore de depunere aproape întreaga suprafață a substratului este acoperită cu un film de densitate redusă de molecule de OTS și insule mici de OTS SAM compact încep să se formeze. În timpul depunerii densitatea moleculelor de OTS crește ducând la formarea unui strat compact; imaginea topografică realizată după 12 h de depunere, arată o acoperire bună (peste 30 %) a suprafeței cu un strat monomolecular compact de OTS. În aceste

condiții experimentale, am constatat că finalizarea procesului de depunere a avut loc după 24 h. În urma depunerii pe durata a 24 h rezultă o acoperire de 100% a substratului cu un strat monomolecular de OTS. Grosimea stratului compact de OTS obținut după cele 24 h de depunere este de aproximativ 2.6 nm, grosime ce a fost măsurată pe baza analizei imaginii topografice a marginii stratului de OTS pe substratul neacoperit, pe care nu s-a realizat depunere deoarece a fost mascat de un strat de pastă de argint, strat care a fost îndepărtat după depunere.

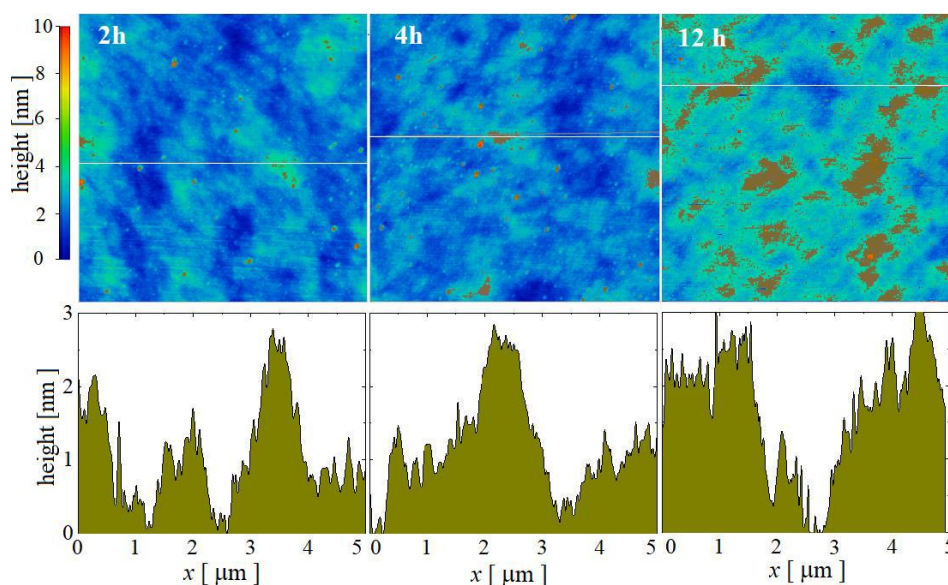


Figura 2.1 Imagini topografice ($5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$) care arată etapele de creștere ale filmului de OTS pe substrat de siliciu pentru timpi de depunere diferiți (2 h, 4 h, 12 h); Sub fiecare imagine topografică am reprezentat profilul de înălțime a filmului după o linie de scanare a cărei poziție este reprezentată în imaginile topografice.

Cinetica creșterii filmului de OTS indicată de analiza imaginilor AFM este confirmată și de rezultatele măsurărilor unghiului de contact al apei ale filmelor de OTS depuse pe durate de timp diferite (de la 2 h la 24 h). Astfel, unghiul de contact al apei crește repede de la mai puțin de 5° pentru substratul de siliciu hidroxilat (suprafață superhidrofilă), la aproximativ 70° pentru filmul de OTS depus timp de două ore, și apoi mult mai lent până la aproximativ 95° - 100° C pentru o depunere completă (24 h) (**figura 2.2**).

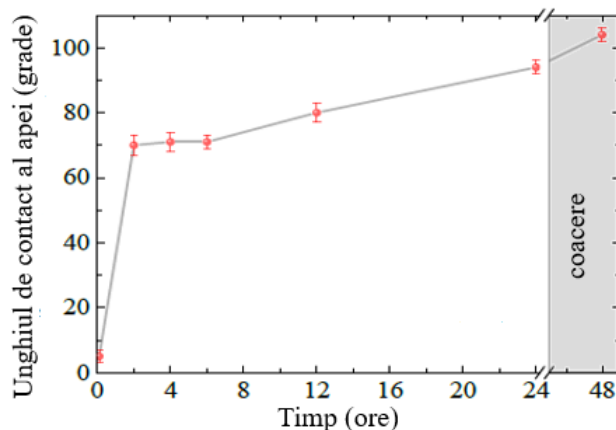


Figura 2.2 Reprezentarea unghiului de contact al apei a filmelor de OTS funcție de timpul de depunere a lor.

2.2 Rolul apei adsorbită pe substrat în obținerea de filme OTS monomoleculare

În procesul de optimizare a depunerii de straturi monomoleculare de OTS am constatat că cantitatea de apă pe substratul hidroxilat de siliciu joacă un rol hotărâtor. În experimentele de depunere am introdus între operația de hidroxilare a substratului și cea de depunere în vapori o etapă de fabricație constând în expunerea substratului pentru un anumit timp la vapori de apă. Expunerea substratului de siliciu pentru o perioadă mai mare de timp (> 2 minute) la vapori de apă la o presiune parțială mai mare (> 23 mTorr) a avut ca rezultat adsorbția unei cantități mari de apă pe substrat, ceea ce va duce la formarea unor conglomerate 3D de OTS. **Figura 2.3** este o imagine topografică AFM care evidențiază aceste formațiuni 3D de OTS pe suprafața filmului de OTS depus pe substrat de siliciu expus timp de 3 minute la vapori de apă la presiune parțială de 200 mTorr. În același timp, am constatat depuneri incomplete de filme de OTS pe substraturi de siliciu hidroxilat care nu au fost expuse la vapori de apă. Este necesară prezența unei cantități optime de apă pe substrat pentru a obține filme de OTS monomoleculare compacte.

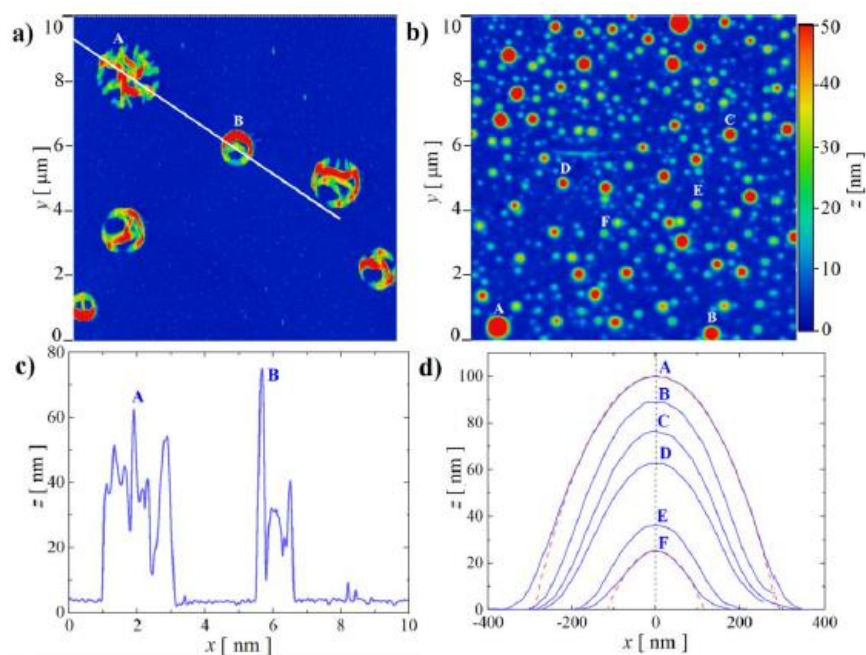


Figura 2.3 a) Imagine topografică AFM ($10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$) în care se evidențiază formațiunile 3D de OTS formate pe un substrat de siliciu hidroxilat, expus la vapori de apă la o presiune de 200 mTorr, timp de 2 minute înainte de depunerea în vapori de OTS. b) Imagine topografică AFM ($10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$) în care se evidențiază formațiunile 3D de OTS formate pe un substrat de siliciu hidroxilat, expus la vapori de apă la o presiune de 23 mTorr, timp de 10 minute înainte de depunerea în vapori de OTS. c) Profil de înălțime caracteristic formațiunilor A și B din imaginea topografică din partea stângă sus. d) Profil de înălțime pentru 6 formațiuni (A, B, C, D, E și F) din imaginea topografică din partea dreaptă sus. Liniile întrerupte scot în evidență asemănarea profilurilor cu forma de calotă sferică a acestor formațiuni.

2.3 Morfologia și structura filmelor monomoleculare de OTS

În studiile efectuate în prezenta teză de doctorat cantitatea de apă prezentă pe substrat în momentul depunerii în vapori de OTS a fost determinată prin expunerea controlată a substratului hidroxilat la vapori de apă

Figura 2.4 prezintă imaginile topografice de rezoluție mare ($500\ \text{nm} \times 500\ \text{nm}$) obținute cu Microscopul cu Forță Atomică ale straturilor de OTS obținute după 24 h în condiții optime de depunere înainte și după tratamentul termic (tratament post depunere constând în coacerea filmului

în aer la 100°C pentru 24 h). Variațiile de înălțime observate pe suprafața filmului de OTS depus pot fi atribuite variațiilor locale ale grosimii filmului, variații care sunt cauzate de modificări ale densității superficiale a moleculelor de OTS silanizat pe substrat.

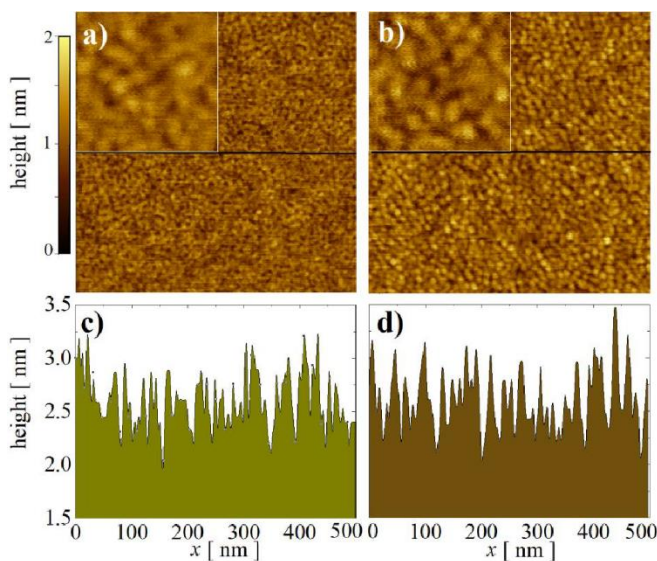
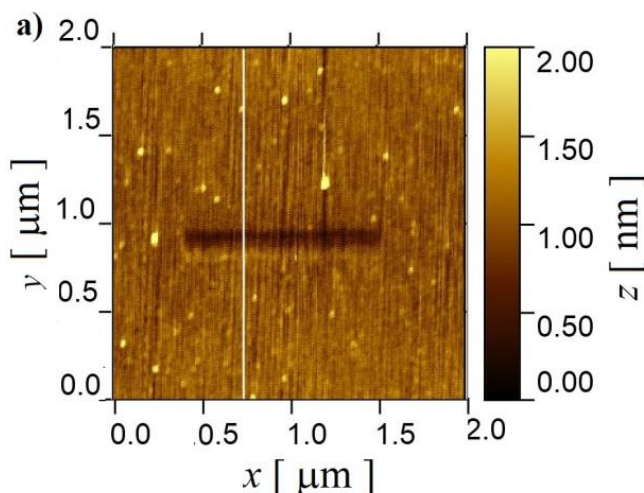


Figura 2.4 Imagini topografice obținute a) înainte și b) după tratamentul termic al straturilor subțiri auto-asamblate de OTS. c) și d) profilele de înălțime suprafeței filmului după liniile de scanare figurate în imaginile topografice

2.4 Proprietățile tribologice ale filmelor de OTS

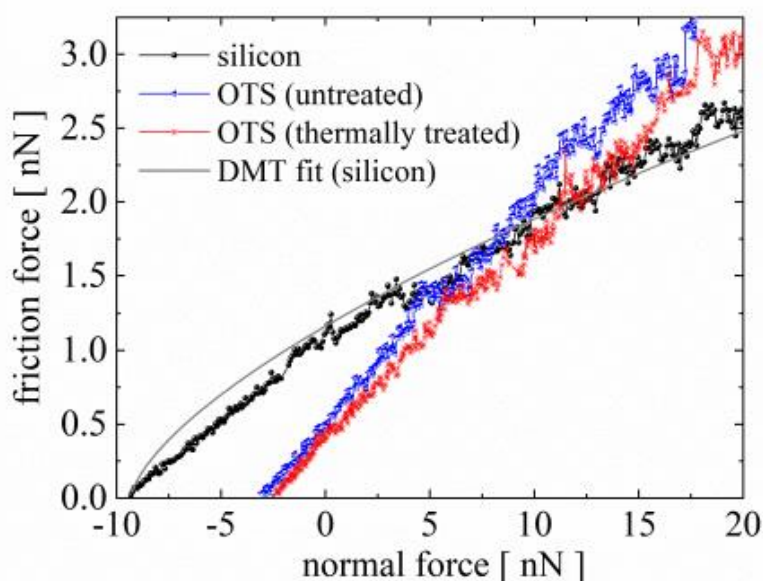
Pentru a studia rezistența la uzură a filmelor de OTS obținute am realizat un experiment constând în scanarea ciclică (dus-întors) cu ajutorul unei sonde AFM de siliciu sub acțiunea unei forțe de apăsare constante a unui segment de dreaptă cu lungimea de $1\ \mu\text{m}$ pe suprafața filmului, timp în care am monitorizat forța de frecare. **Figura 2.5** prezintă imaginea topografică a urmei de uzură pe suprafața filmului de OTS obținută după efectuarea unui număr de 1000 de cicluri de uzură. În timpul acestui experiment forța de frecare a scăzut semnificativ pe durata



primelor 200 de cicluri, timp în care s-a format urma de uzură.

Figura 2.5 Imaginea topografică ($2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$) a urmei de uzură rezultată pe suprafața filmului de OTS în urma a 1000 de cicluri de uzură constând în mișcări dus-întors pe un traseu cu lungimea de $1\ \mu\text{m}$. Forța normală aplicată pe contactul dintre vârful sondei AFM și suprafața filmului a fost menținută constantă, $F_n = 50\ \text{nN}$.

Pentru studiul dependenței forței de frecare de forța de apăsare normală am efectuat experimente în care am monitorizat forța de frecare în timp ce am scăzut forța normală până la desprinderea vârfului sondei AFM de pe suprafața filmului de OTS. În cazul contactelor pe o singură asperitate între suprafețele dure de siliciu și nitrură de siliciu celelalte componente ale forței de frecare sunt neglijabile, dependența forței de frecare de forța de apăsare normală este descrisă bine de modelul DMT (**figura 2.6**). Pentru suprafețele filmelor de OTS dependența forței de frecare de forța de apăsare normală este aproape liniară. Dependența liniară este caracteristică forței de frecare la scară nanoscopică, în care aria de contact nu crește notabil o dată cu creșterea forței de apăsare (datorită faptului că aria de contact este relativ mare, caz caracteristic vârfurilor mai puțin ascuțite). Rezultatele obținute arată că tratamentul termic a determinat o ușoară scădere a forțelor de adeziune și frecare.



2.6 Variația forței de frecare în funcție de valorile forței de apăsare normală înregistrată cu o sondă AFM cu un vârf de nitrură de siliciu, pe substrat de siliciu, un film de OTS netratat termic, și un film de OTS tratat termic.

2.5 Sinteza, structura și proprietățile tribologice ale filmelor DLC

În studiul de față, au fost depuse filme DLC cu diferite valori ale raportului sp^3/sp^2 prin pulverizare a unei ținte de grafit în descărcări magnetron în regim de pulsuri unipolare de mare putere (HiPIMS), pulsuri bipolare de mare putere (b-HiPIMS) și în current continuu (DCMS).

Am făcut depuneri în condiții experimentale diferite (*Tabel 2*) pentru a obține filme de DLC cu raportul densităților de legături sp^3/sp^2 diferite. Conținutul de legături de tip sp^3 în filmele de DLC depuse a fost evaluat cu ajutorul Spectroscopiei Raman. În cadrul tezei am obținut filme DLC cu o densitate de legături sp^3 ce a variat între 18% (filme depuse prin DCMS) și 51% (filme depuse prin b-HiPIMS).

Probă	U(V)	Tipul descărcării	Concentrație sp^3 (%)	Compoziția gazului de lucru
1	500	cc (curent continuu)	18	Ar
2	700	HiPIMS	22	Ar
3	900	b-HiPIMS	31	Ar/H ₂
4	900	HiPIMS	39	Ar
5	900	b-HiPIMS	40	Ar/Ne
6	900	b-HiPIMS	51	Ar

Tabel 1. Valorile tensiunii de descărcare U, tipul de descărcare, concentrația de sp^3 pentru filmele de DLC obținute și compoziția gazului de lucru.

Proprietățile tribologice la scară nanoscopică a filmelor de DLC depuse au fost investigate cu ajutorul microscopiei cu forță atomică în conexiune cu compoziția lor chimică în scopul stabilirii unei compoziții optime pentru care filmele au forță de frecare minimă și în același timp o duritate suficient de mare pentru a fi utilizate în diverse aplicații ca straturi tribologice.

2.5.1 Studiu comparativ a structurii și proprietăților tribologice ale filmelor DLC depuse prin trei tehnici de pulverizare magnetron, DCMS, HiPIMS și b-HiPIMS

Topografia suprafeței filmelor DLC depuse prin tehnici diferite de pulverizare magnetron (DCMS, HiPIMS, b-HiPIMS) a fost investigată cu ajutorul microscopiei cu forță atomică. În **figura 2.7** sunt prezentate imagini AFM topografice ale suprafețelor filmelor de DLC obținute prin cele trei tehnici menționate (aria scanată $3\mu m \times 3\mu m$).

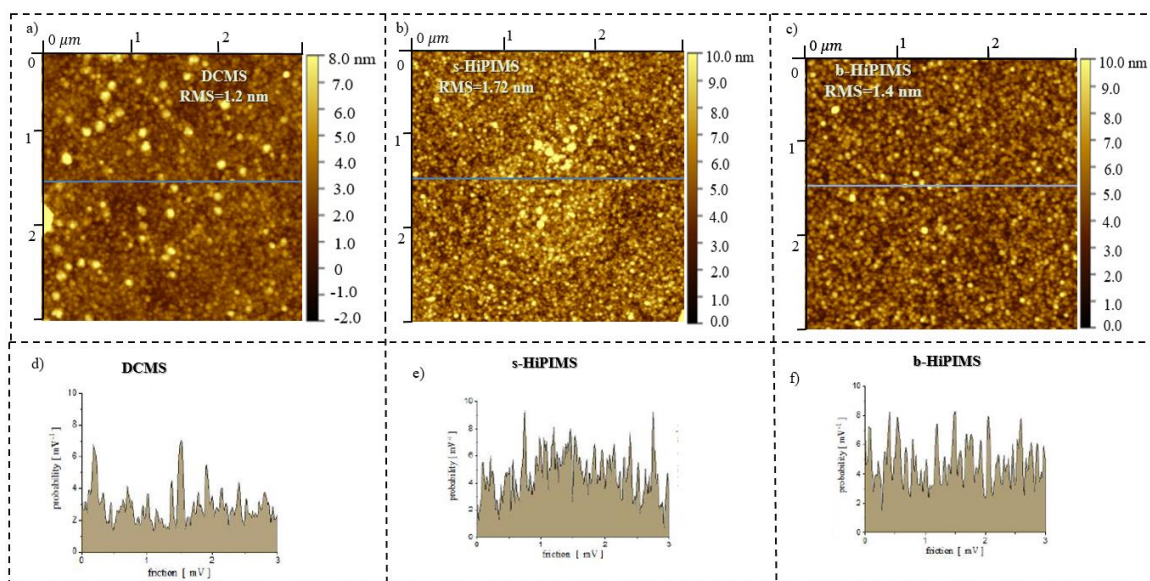


Figura 2.7 Imagini topografice 2D obținute cu Microscopul cu Forță Atomică ale suprafețelor depuse cu DLC caracteristice metodelor DCMS, s-HiPIMS, b-HiPIMS .

Datele relevă depuneri de filme cu suprafețe netede ($\text{RMS} < 1.7 \text{ nm}$) cu o structură granulară ce descrește în funcție de tehnica de pulverizare utilizată (DCMS, HiPIMS, b-HiPIMS). Suprafața filmului depus prin DCMS arată o granulație eterogenă, dimensiunile laterale ale granulelor fiind ceva mai mari decât la celelalte filme, în timp ce variațiile de înălțime sunt mai mici. Imaginile cu distribuția forței de frecare pe suprafața filmelor obținute sunt prezentate în **figura 2.9**. Forța de frecare depinde de material și în acest caz indică structura mai aproape de grafit (forță de frecare mică) sau de diamant (forță de frecare mare) a suprafeței filmelor. Filmul DLC depus prin descărcare magnetron de tip b-HiPIMS este foarte omogen, valori mai mici ale forței de frecare fiind distribuite la granițele dintre nanocristalele de diamant, în timp ce filmul DLC obținut prin DCMS are o structură eterogenă, pe suprafața lui fiind evidențiate regiuni de grafit (frecare mică).

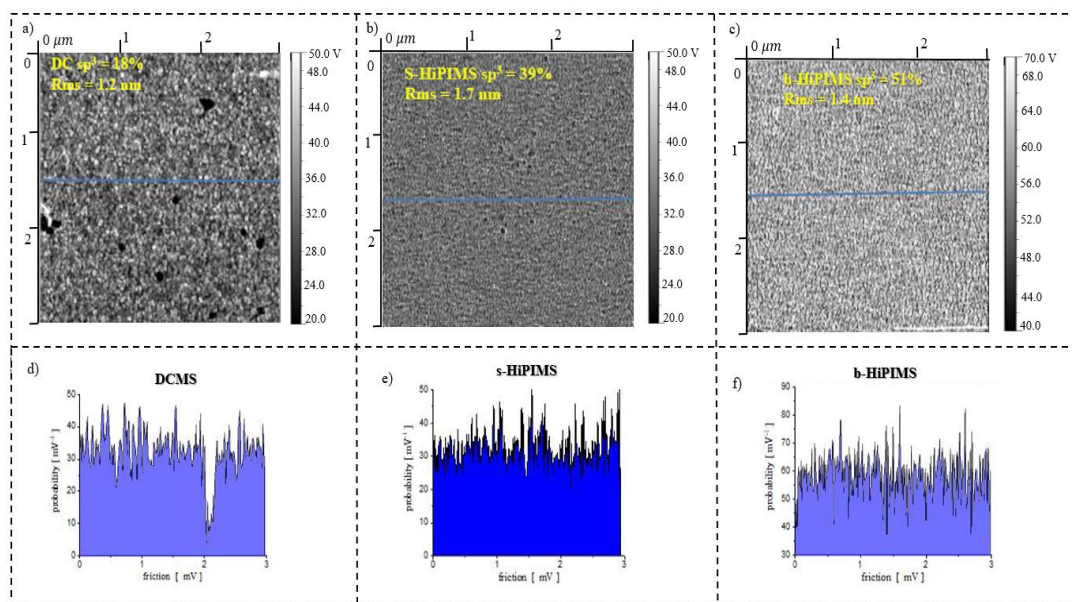


Figura 2.8 Imagini 2D reprezentând valorile forței de frecare obținute cu Microscopul cu Forță Atomică pe suprafețele filmelor de DLC depuse prin metodele a) DCMS, b) HiPIMS și c) b-HiPIMS. Distribuția forței de frecare pentru filmul DLC obținut prin DCMS indică prezența nano-domeniilor de grafit unde valoarea forței de frecare este foarte scăzută.

Figura 2.9 reprezintă histogramele rezultate din analiza valorilor forței de adeziune măsurată pe o matrice de 8×8 puncte omogen distribuite pe suprafața de arie 3μm × 3μm de pe suprafața filmelor. Se observă că valorile cele mai mici ale forței de adeziune se obțin pentru filmul depus prin DCMS.

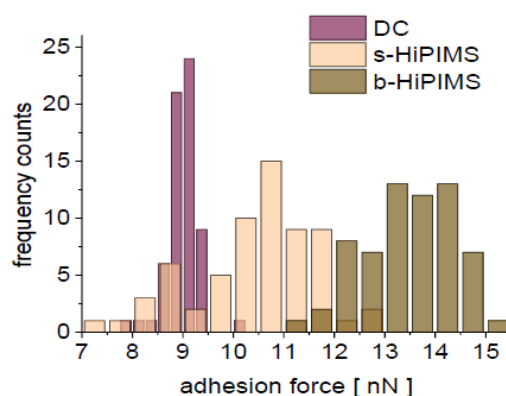


Figura 2.9 Histogramă a forțelor de adeziune înregistrate pentru filmele de DLC depuse prin tehnicile de pulverizare magnetron, DCMS, HiPIMS și b-HiPIMS

Figura 2.10 prezintă dependența forței de frecare funcție de forța de apăsare normală pentru cele trei filme. Deoarece forțele de frecare sunt calibrate în nN și dependența este liniară putem determina coeficienții de frecare la scară nanoscopică.

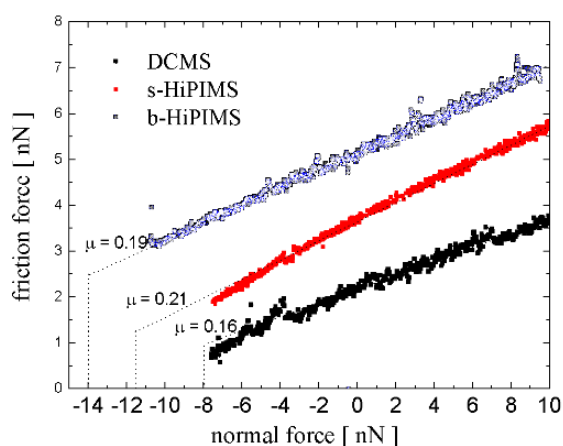


Figura 2.10 Variația forței de frecare în funcție de valorile forței de apăsare normală pentru filmele de DLC obținute prin DCMS, HiPIMS și b-HiPIMS.

2.5.2 Efectul compoziției gazului de lucru în b-HiPIMS

În acest studiu am depus filme DLC folosind descărcarea magnetron de tip b-HiPIMS în diverse amestecuri de gaze (Ar, Ar/H₂, Ar/Ne). Am constatat că introducerea Ne în gazul de lucru rezultă în o micșorare a raportului de legături sp³ în filmul depus de la 51% în Ar pur la 40% în amestec. De asemenea, introducerea de H₂ în gazul de lucru duce la o scădere și mai mare a raportului de legături sp³ în film (31% pentru filmul depus în amestec de gaze Ar/H₂). Explicația simplă pentru aceste rezultate este că introducerea unui gaz inert cu masa moleculară mai mică sau introducerea hidrogenului are ca efect reducerea energiei și gradului de ionizare a materialului pulverizat din țintă. Proprietățile morfologice ale suprafețelor filmelor subțiri obținute și a rugozității au fost determinate prin analiza imaginilor topografice ale acestora (**figura 2.11**).

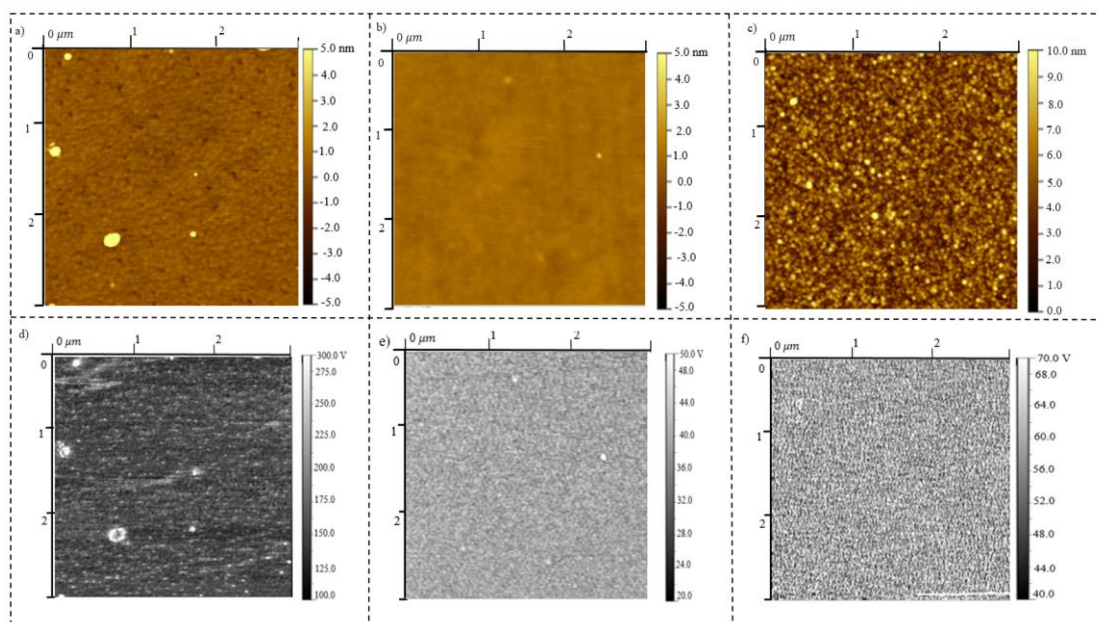


Figura 2.11 Imagini topografice 2D (sus) și imagini ale forței de frecare (jos) obținute cu Microscopul cu Forță Atomică ale suprafețelor depuse cu DLC în vederea analizei efectului compoziției gazului de lucru în b-HiPIMS pentru filmele C1 (a, d), C2 (b, e) și C3 (c, f).

În **tabelul 2**, sunt prezentate date privind valoarea medie pătratică (RMS) a rugozității și concentrația de sp^3 obținute în funcție de compoziția gazului de lucru.

Probă	RMS (Sq)	Concentrație sp^3 (%)	Compoziția gazului de lucru
1	182.1 pm	31	Ar/H ₂
2	365.3 pm	40	Ar/Ne
3	1.386 nm	51	Ar

Tabel 2. Valorile medii pătratice (RMS) obținute pentru filmele DLC în funcție de compoziția gazului de lucru.

Rezultatele relevă faptul că valoarea medie a rugozității crește pe măsură ce și concentrația legăturilor de sp^3 este în creștere.

2.5.3 Efectul amplitudinii pulsurilor de tensiune în HiPIMS

Pentru a investiga efectul amplitudinii pulsurilor de tensiune asupra proprietăților filmelor DLC depuse prin HiPIMS am depus filme DLC la două valori diferite ale amplitudinii pulsurilor de tensiune (700V, 900V). Investigațiile privind structura filmelor depuse astfel efectuate cu ajutorul spectroscopiei Raman au indicat o creștere a densității de legături sp^3 de la 22% pentru filmul depus în HiPIMS cu amplitudinea pulsurilor de 700 V la 39% pentru

filmul depus în HiPIMS cu amplitudinea pulsurilor de 900 V. Cum era de așteptat, creșterea amplitudinii pulsurilor de tensiune în HiPIMS a determinat o mărire a energiei particulelor pulverizate, ceea ce a favorizat formarea de legături sp^3 în filmele depuse.

În **figura 2.12** sunt prezentate imagini topografice ($3\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$) a filmelor de DLC depuse pe substrat de siliciu, în descărcări HiPIMS cu amplitudinea pulsurilor de 700 V (a), respectiv 900 V (b). Distribuția forței de frecare pe suprafața filmelor depuse (figura 12 c și d) arată că filmul de DLC depus în descărcări HiPIMS cu amplitudinea mai mică este eterogen, prezentând regiuni de grafît (frecare mică).

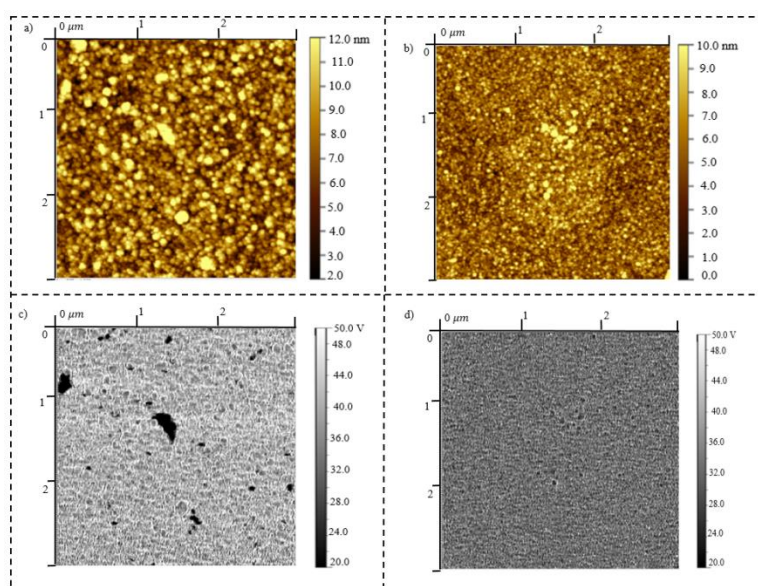


Figura 2.12 Imagini topografice 2D obținute cu Microscopul cu Forță Atomică ale suprafețelor depuse cu DLC în vederea analizei efectului amplitudinii pulsului de tensiune HiPIMS, asupra proprietăților filmelor depuse; a) –partea stângă C2 (700 V), b) –partea dreaptă C4 (900V)

2.6 Sinteza și proprietățile tribologice ale filmelor SiN_x și $\text{SiN}_x\text{:H}$ obținute în depuneri prin pulverizare magnetron

În acest studiu am obținut filme de nitrură de siliciu (SiN_x) respectiv nitrură de siliciu hidrogenat ($\text{SiN}_x\text{:H}$), filme ce au fost depuse folosind o descărcare de tip HiPIMS. Deoarece proprietățile tribologice ale filmelor subțiri depind de morfologia suprafețelor și de structura filmelor depuse, am investigat proprietățile morfo-structurale a filmelor de SiN_x și $\text{SiN}_x\text{:H}$ obținute în depuneri prin pulverizare magnetron, utilizând tehnicile AFM, XRD și SEM. Cu ajutorul Microscopiei cu Forță Atomică au fost evaluate atât morfologia suprafețelor filmelor cât și proprietățile lor tribologice.

Difractograma filmului de SiNx:H indică o structură amorfă, în timp ce difractograma filmului de SiNx indică o structură cristalină de rază scurtă (nanocristalite), prezentând un maxim de difracție corespunzător structurii cristaline Si₃N₄ (110) situat la 23.40.

Imaginile AFM topografice relevă suprafețe netede ce prezintă granule foarte fine distribuite uniform pe suprafața filmelor. Valoarea medie pătratică (RMS) a rugozității este 0.7 nm pentru filmele SiNx și, respectiv, 0.4 nm pentru filmele SiN:H.

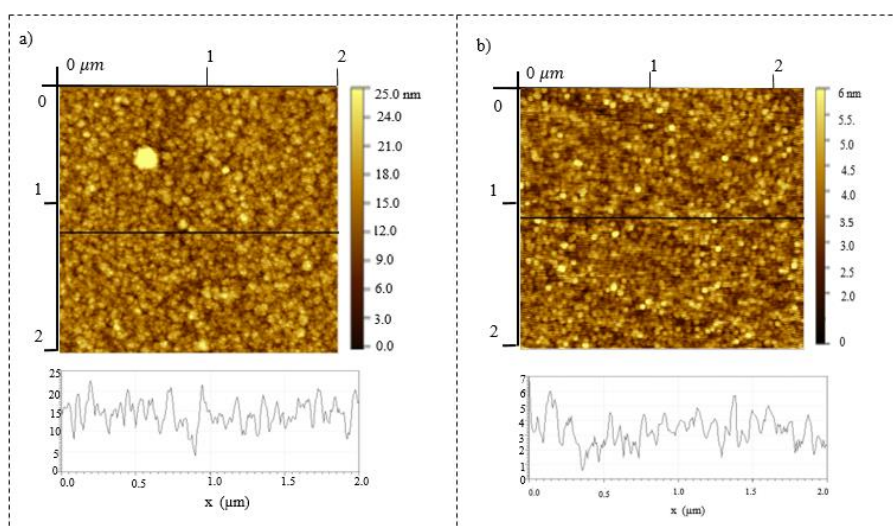


Figura 2.13 Imagini topografice obținute în modul contact în lichid cu ajutorul microscopului cu forță atomică pentru filmele de a) SiN și b) SiN:H depuse pe substrat cristalin de siliciu

În cazul măsurătorilor efectuate în aer s-a constatat că forțele de adeziune sunt mari și se datorează condensării capilare a apei din aerul atmosferic în regiunea contactului dintre vârful sondei AFM și suprafața filmului (**figura 2.14**). Pentru filmul SiN_x s-au obținut rezultate similare.

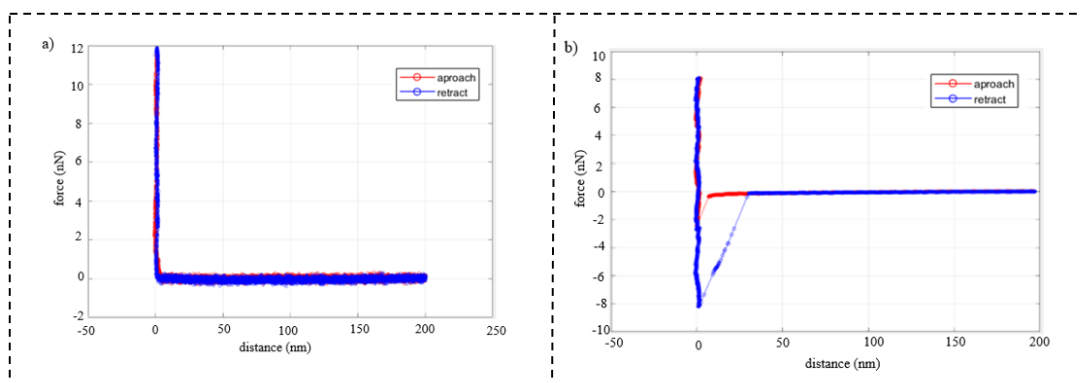


Figura 2.14 Reprezentarea curbei forță-distanță măsurată în apă deionizată cu o sondă AFM de nitrură de siliciu pe filmul de SiN:H în a) lichid și în b) aer

În cazul măsurătorilor de forță de frecare în lichid cu ajutorul Microscopului cu Forță Atomică pentru filmele de SiN_x , respectiv SiN:H , (figura 2.16) s-a constatat că forța de frecare în apă deionizată crește liniar cu forța de apăsare normală în cazul ambelor filme. Cum era de așteptat, forțele de frecare în apă sunt foarte mici în comparație cu cele în aer deoarece forța de adeziune între suprafețele de nitrură de siliciu este practic nulă (figura 2.15).

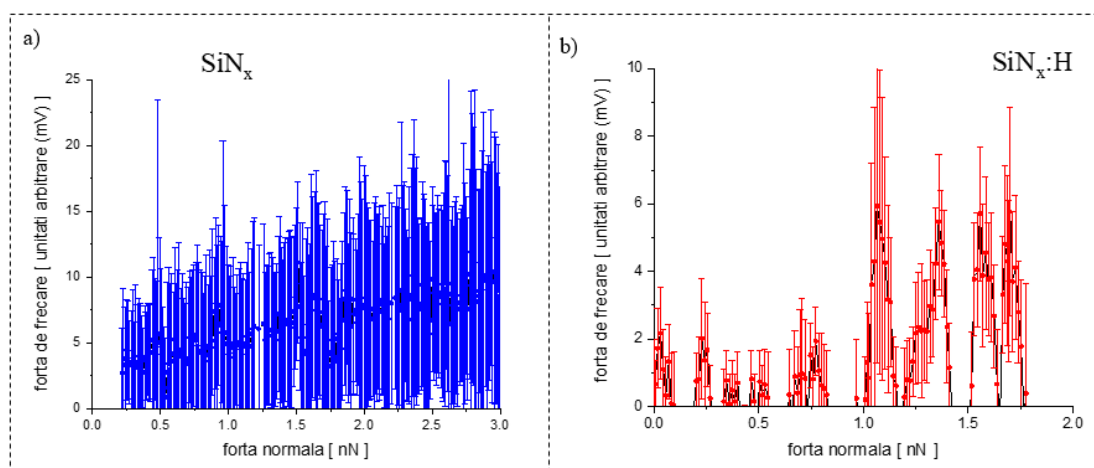


Figura 2.15 Reprezentarea forței de frecare în apă deionizată funcție de forța de apăsare normală în cazul filmelor de a) SiN și b) SiN:H .

Figura 2.16 prezintă dependența forței de frecare funcție de forța de apăsare normală în apă respectiv aer cu ajutorul Microscopului cu Forță Atomică pentru filmul de SiN:H .

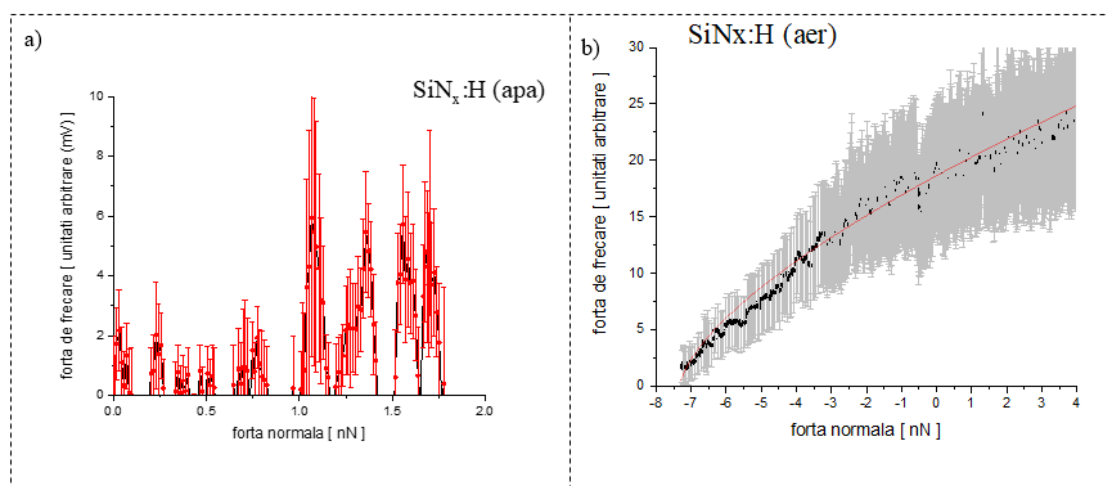


Figura 2.16 Reprezentarea forței de frecare în a) apă deionizată și b) aer funcție de forța de apăsare normală pentru filmul de SiN:H .

3. Concluzii

Au fost sintetizate și caracterizate câteva materiale intens studiate în ultima perioadă ca straturi subțiri depuse pe substraturi de siliciu în scopul îmbunătățirii proprietăților tribologice a suprafețelor atât la scară microscopică cât și la scară macroscopică. Pentru sinteza straturilor subțiri s-au folosit tehnici cu plasmă pentru activarea substraturilor de siliciu în cazul depunerii în vapori de filme monomoleculare de octadecyltrichlorosilane (OTS) sau pentru pulverizarea materialului sursă (carbon, siliciu) în descărcări magnetron în cazul sintezei de straturi subțiri de carbon diamantat și nitrură de siliciu. Straturile subțiri de OTS, DLC și Si_xN_y sunt în prezent intens studiate pentru proprietățile lor tribologice superioare (frecare mică, rezistență la uzură mare).

Cantitatea de apă pe substratul hidroxilat a fost controlată prin introducerea unei noi etape de fabricație între procesele de hidroxilare și de depunere în vapori, etapă care constă în expunerea substratului hidroxilat la vapori de apă. Astfel, cantitatea de apă absorbită pe substrat a fost controlată de timpul de expunere și de presiunea parțială a vaporilor de apă în incintă. Această tehnică de fabricare a monostraturilor de OTS pe siliciu este originală și a permis un studiu detaliat a rolului apei în reacția de depunere în vapori a unui strat monomolecular de OTS. Am ajuns la concluzia că, pentru formarea unui strat monomolecular compact de OTS, substratul de siliciu trebuie acoperit de un strat uniform de molecule de apă. În caz contrar, depunerea de OTS pe un substrat uscat are ca rezultat formarea unui film de OTS neuniform, incomplet, în timp ce depunerea pe un substrat cu o cantitate mare de apă absorbită are ca rezultat sinteza de nano agregate 3D de OTS peste filmul monomolecular de OTS. În ultimul caz cantitatea mare de apă pe substrat favorizează polimerizarea moleculelor de OTS în structuri care pot avea forma de nanopicături sau structuri dendritice complexe.

Condiționarea polimerizării moleculelor de OTS de cantitatea mare de apă pe substrat a fost verificată de rezultatele unui experiment în care depunerea s-a făcut pe un substrat acoperit de o mască coloidală formată din nanosfere de polistiren cu diametrul de 500 nm. Nanosferele de polistiren au fost funcționalizate chimic de producător pentru a fi hidrofile. Ca urmare fiecare sferă de polistiren a format la contactul cu substratul hidroxilat de siliciu un menisc de apă. După depunere și îndepărtarea sferelor am constatat formarea unor structuri 3D sub forma unor inele în jurul fiecărui contact a sferelor de polistiren cu substratul. Acest rezultat confirmă că într-adevar polimerizarea moleculelor de OTS pentru a forma nano-agregate 3D pe substrat este controlată de cantitatea de apă aflată pe substrat.

Mecanismul formării filmului monomolecular de OTS pe substrat în condiții optime de depunere a fost studiată cu ajutorul analizei imaginilor AFM topografice a filmelor depuse pe durate diferite, de la 2 h la 24 h, și prin analiza rezultatelor măsurătorilor de unghi de contact al apei efectuate pe aceleași filme. Imaginile topografice indică depunerea completă a unui strat monomolecular de OTS în 24 h. Depunerea unui monostrat de molecule în acest timp a fost confirmată de imaginea AFM a marginii stratului depus. Pentru a obține o asemenea margine s-a făcut depunere de OTS pe un substrat mascat cu o mască din pastă de argint. După depunere masca de argint a fost înlăturată. Imaginea marginii substratului a arătat că grosimea acestuia corespunde lungimii unei molecule de OTS (2.4 nm). Imaginile topografice ale filmelor depuse pe durate mai scurte de timp indică faptul că depunerea filmului începe cu formarea de insule de densitate mai mare de molecule. Pe măsură ce crește timpul de depunere crește și dimensiunea insulelor și densitatea de molecule ce reacționează cu substratul. Măsurătorile de unghi de contact al apei arată o creștere rapidă a unghiului de contact de la sub 5° pentru substratul hidroxilat la peste 70° în numai două ore de depunere. Această creștere importantă a unghiului de contact indică faptul că molecule de OTS s-au depus în densitate mică pe toată suprafața substratului, insulele vizibile în imaginile topografice AFM fiind doar regiuni unde densitatea de molecule de OTS legate chimic de substrat este mai mare. Odată cu creșterea timpului de depunere unghiul de contact al apei pe suprafețele filmelor depuse a crescut la peste 90° . Tratatamentul termic post depunere are ca rezultat o creștere a unghiului de contact la peste 105° , valoare raportată și de alți autori pentru filme monomoleculare de OTS.

Utilizând tehnicile microscopiei cu forță atomică am evidențiat formarea de nanodomenii corespunzătoare fazelor de lichid expandat și lichid condensat în structura filmului monomolecular de OTS. Acestea se datorează incompatibilității dintre diametrul moleculei de OTS și lungimea legăturilor de O-Si-O în structura de legături cu silan pe substrat. Tot cu ajutorul tehnicilor AFM am analizat proprietățile tribologice la scară nanoscopică ale filmelor obținute. În ceea ce privește uzura, am folosit o sondă AFM de siliciu cu care am scanat repetat un segment de dreapta pe suprafața filmului. Cu ajutorul aceleași sonde AFM am obținut imaginea topografică a urmei de uzură formată în urma a 1000 de cicluri de scanarea repetată sub acțiunea unei forțe normale constante. Din analiza profilului de înălțime obținut pentru o linie de scanare perpendiculară pe urma de uzură am observat că mișcarea dus-întors a produs pe suprafața filmului subțire de OTS o urmă de uzură cu o adâncime de aproximativ 0.8 nm, valoare mult mai mică decât grosimea stratului de OTS (aproximativ 2.4 nm). Acest

lucru a indicat faptul că uzura nu a îndepărtat filmul de OTS de pe substrat, însă a generat un canal pe suprafața filmului de OTS prin crearea unui spațiu între moleculele legate chimic de substrat și prin alinierea lor în lungul direcției de scanare. Această interpretare se bazează pe analiza rezultatelor obținute prin monitorizarea forței de frecare pe durata celor 1000 de cicluri de uzură. Astfel forța de frecare a scăzut semnificativ pe durata primelor 200 de cicluri, fapt explicat de alinierea moleculelor după direcția de scanare. Pentru investigarea frecării la scară nanoscopică între suprafața straturilor de OTS depuse și vârful de siliciu al sondei AFM am efectuat determinări ale forței de frecare în funcție de forța de apăsare pe direcția normală pentru diferite viteze de alunecare a contactului dintre cele două suprafețe. În contrast cu legile frecării la scară macroscopică am observat o dependență neliniară a forței de frecare de forța de apăsare pe direcție normală. Am constatat că forța de frecare la viteze de scanare moderate (1 μm/s) nu depinde de viteza de scanare. De asemenea am constatat că tratamentul termic pentru 24 h la 100°C în aer al filmelor de OTS îmbunătățește proprietățile lor tribologice (reduce forța de frecare). Tratamentul termic are ca efect și o ușoară creștere a unghiului de contact al apei și o modificare semnificativă a morfologiei suprafeței filmului.

Prin folosirea de tehnici diferite de depunere prin pulverizare magnetron (DCMS, HiPIMS monopolar și HiPIMS bipolar) și prin modificarea anumitor parametrii de depunere s-au obținut filme DLC cu structuri chimice diferite, i.e. valori diferite ale raportului densităților de legături chimice sp^2 (caracteristice grafitului)/, sp^3 (caracteristice diamantului). În cadrul tezei am obținut filme DLC cu o densitate de legături sp^3 ce a variat între 18% (filme depuse prin DCMS) și 51% (filme depuse prin b-HiPIMS). Conținutul de legături de tip sp^3 în filmele de DLC depuse a fost evaluat cu ajutorul Spectroscopiei Raman.

Variind amestecul de gaze am constatat următoarele aspecte:

- ✓ introducerea neonului în gazul de lucru are ca efect o micșorare a raportului de legături sp^3 în filmul depus de la 51% în Ar pur la 40% în amestec;
- ✓ introducerea de H_2 în gazul de lucru duce la o scădere și mai mare a raportului de legături sp^3 în film (31% pentru filmul depus în amestec de gaze Ar/ H_2).
- ✓ în cazul depunerii în care am utilizat ca și gaz de lucru argonul, s-a constatat o suprafață mai rugoasă în raport cu celelalte două cazuri, pentru care s-a folosit un amestec de gaze (Ar/ H_2 și Ar/Ne). Valoarea medie a rugozității crește pe măsură ce și concentrația legăturilor de sp^3 este în creștere;

S-au depus filme DLC cu diferite valori ale raportului sp^3/sp^2 prin pulverizare magnetron a unei ținte de grafit în descărcări magnetron în regim de pulsuri unipolare de mare putere (HiPIMS), pulsuri bipolare de mare putere (b-HiPIMS) și în current continuu (DCMS). În urma analizei conținutului de legături de tip sp^3 pentru filmele de DLC depuse am observat că am obținut filme cu o densitate de legături sp^3 ce a variat între 18% (filme depuse prin DCMS) și 51% (filme depuse prin b-HiPIMS). Rezultatele obținute cu ajutorul spectroscopiei Raman relevă o creștere a densității de legături sp^3 de la 22% pentru filmul depus în HiPIMS cu amplitudinea pulsurilor de 700 V la 39% pentru filmul depus în HiPIMS cu amplitudinea pulsurilor de 900 V. De asemenea am constatat o micșorare a rugozității filmelor depuse în urma creșterii amplitudinii pulsurilor de tensiune în HiPIMS, suprafața filmului depus la amplitudinea de 900 V fiind mai netedă și prezentând o granulație mai fină. Imaginile reprezentative distribuției forței de frecare obținute cu ajutorul tehnicii AFM pe suprafața filmelor indică o omogenitate mult mai bună a structurii filmului DLC depus la amplitudine mai mare a pulsurilor de tensiune. Sunt nano-regiuni pe suprafața filmului DLC depus la amplitudinea de 700 V care prezintă o forță de frecare mult mai mică decât restul filmului. Aceste regiuni pot avea o structură mai apropiată de grafit decât de diamant.

În urma investigațiilor proprietăților tribologice pentru filmele de DLC depuse prin cele trei tehnici comparate în prezentul studiu am observat că filmul depus prin DCMS este eterogen, suprafața lui arătând regiuni cu valori foarte mici ale forței de frecare. Deoarece forța de frecare pe suprafața grafitului este mai mică decât pe suprafața diamantului, aceste regiuni pot fi considerate ca având o structură mai mult de grafit (sp^2) decât de diamant (sp^3). Filmele depuse prin HiPIMS sunt mult mai omogene dar au mici domenii cu valori ceva mai mici ale forței de frecare.

Cel de-al treilea material sintetizat și studiat în teză a fost nitrura de siliciu. S-au depus și caracterizat filme de nitrură de siliciu (SiN_x) și nitrură de siliciu hidrogenată ($SiN_x:H$) în depuneri HiPIMS în amestec de argon și azot și, respectiv, în amestec de argon, azot și hidrogen. Proprietățile morfo-structurale a filmelor de SiN_x și $SiN_x:H$ obținute în depuneri prin pulverizare magnetron, au fost evaluate utilizând tehnicile AFM, XRD și SEM. Difractograma XRD pentru filmul de $SiN_x:H$ a indicat o structură amorfă, în timp ce pentru filmul de SiN_x difractograma XRD corespunzătoare au indicat formarea de nanocristalite înglobate într-o matrice amorfă. Imaginile obținute cu ajutorul microscopiei electronice de baleiaj ale secțiunilor transversale ale filmelor depuse indică formarea de filme compacte și foarte netede. Cu ajutorul Microscopului cu Forță Atomică au fost evaluate morfologia suprafețelor filmelor dar și proprietățile lor tribologice. Imaginile AFM topografice obținute în aer evidențiază

rezultatele similare cu cele observate în imaginile SEM, indicând că filmele depuse au suprafețe netede la scară nanoscopică ce prezintă granule foarte fine (dimensiunea laterală tipică) distribuite uniform pe suprafața filmelor. Filmul de $\text{SiN}_x\text{:H}$ are suprafața mai netedă decât cel de SiN_x .

De asemenea, cu ajutorul microscopului cu forță atomică s-au efectuat măsurători ale forțelor de frecare și adeziune la scară nanoscopică în apă și în aer. Am constatat că în aer forțele de adeziune sunt mari și se datorează condensării capilare a apei din aerul atmosferic în regiunea contactului dintre vârful sondei AFM și suprafața filmului. Cum era de așteptat, forțele de frecare în apă sunt foarte mici în comparație cu cele în aer deoarece forța de adeziune între suprafețele de nitrură de siliciu este practic nulă.

În concluzie, în prezenta teză de doctorat plasmăle descărcărilor electrice în gaze rarefiate au fost utilizate pentru activarea chimică a substraturilor de siliciu utilizate în depunerea filmelor monomoleculare de OTS, sau pentru depuneri de straturi subțiri de carbon diamantat și nitrură de siliciu prin pulverizare magnetron. Aceste filme au aplicații în fabricarea de dispozitive MEMS, biosenzori, etc., aplicații în care suprafețele în contact mecanic la scară micro- sau nanoscopică trebuie modificate chimic pentru a diminua forțele de adeziune și frecare. Rezultatele obținute arată că plasma descărcărilor electrice în gaze rarefiate poate fi utilizată eficient în sinteza de straturi subțiri a căror suprafețe au proprietăți tribologice la scară nanoscopică îmbunătățite. Rezultatele prezentate în teză confirmă încă o dată versatilitatea mare a tehnicilor de depunere cu plasmă și bunul control al proceselor de depunere, optimizarea acestora conducând la obținerea de straturi subțiri cu proprietăți tribologice superioare.

Anexa II

Activitate științifică

Lucrări prezentate la conferințe științifice internaționale:

1. S. Teodoroff-Onesim, A. Beșleagă, L. Sîrghi, *Friction and adhesion forces at single-asperity contact between a silicon and polydimethylsiloxane surfaces*, 17th International Conference on Global Research and Education (Inter-Academia 2018), September 24-27, 2018, Kaunas, Lithuania. **(poster)**
2. A. Beșleagă, S. Teodoroff-Onesim, L. Sîrghi, *Chemical vapour deposition of octadecyltrichlorosilane on plasma activated surfaces o silicon atomic force microscopy probes*, 24th International Symposium on Plasma Chemistry, June 9-14, 2019, Naples, Italy. **(poster)**
3. A. Dascălu, S. Teodoroff-Onesim, V. Pohoata, K. Shimizu, L. Sîrghi *Infrared absorption spectroscopy investigation of molecular species generated by surface dielectric barrier discharge micro-plasma in humid air*, 24th International Symposium on Plasma Chemistry, June 9-14, 2019, Naples, Italy. **(poster)**
4. S. Teodoroff-Onesim, A. Beșleagă, L. Sîrghi, *Wearing and friction of octadecyltrichlorosilane layers deposited by chemical vapour deposition on plasma activated silica surfaces*, 18th International Conference on Plasma Physics and Applications, June 20th-22nd, 2019, Iași, România. **(poster)**
5. S. Teodoroff-Onesim, A. Besleaga, and L. Sirghi, *Chemical vapour deposition of octadecyltrichlorosilane on plasma activated silica surface*, 18th International Conference on Plasma Physics and Applications, June 20th-22nd, 2019, Iași, România. **(poster)**
6. S. Teodoroff-Onesim, G. Țifui, L. Sîrghi, *Modification of elasticity and work of adhesion of PDMS surface by treatment in negative glow plasma of a luminescent discharge in argon at low pressure*, 18th International Conference on Plasma Physics and Applications, June 20th-22nd, 2019, Iași, România. **(poster)**

7. S. Teodoroff-Onesim, A. Beșleagă, L. Sîrghi, *Nanoscale friction and wearing of octadecyltrichlorosilane covered silicon surface*, The 14th International Conference on Tribology, September 19-21, 2019, Cluj Napoca, România. **(oral)**
8. G. Tifui, S. Teodoroff-Onesim, L. Sîrghi, *Modification of mechanical properties of polydimethylsiloxane surface by low-pressure plasma treatment*, 19th International Conference on Plasma Physics and Applications, August 31 - September 3, 2021, Măgurele, București, România. **(oral)**
9. S. Teodoroff-Onesim, V. Tiron, L. Sîrghi, *Nanoscale tribological properties of diamond like carbon films deposited by different magnetron sputtering techniques*, 19th International Conference on Plasma Physics and Applications, August 31 - September 3, 2021, Măgurele, București, România. **(poster)**

Lucrări publicate în volumele unor conferințe (proceeding)

1. S. Teodoroff-Onesim, A. Beșleagă, L. Sîrghi, *Nanoscale friction and wearing of octadecyltrichlorosilane covered silicon surface*, The 14th International Conference on Tribology, September 19-21, 2019, Cluj Napoca, România.

Lucrări publicate în reviste științifice cotate ISI:

1. C. Racles, C. Ursu, M. Dascalu, M. Asandulesa, V. Tiron, A. Bele, C. Tugui, S. Teodoroff-Onesim, Multi-stimuli responsive free-standing films of DR1- grafted silicones *Chemical Engineering Journal* **401** (2020).
AIS: 1.450, IF: 10.652
2. S. Teodoroff-Onesim, A. Beșleagă, L. Sîrghi, Synthesis of octadecyltrichlorosilane self-assembled monolayer films by vapor deposition on plasma activated silicon substrates, *Thin Solid Films*, Volume 736 (2021).
AIS: 0.352, IF: 2.183

Beneficiară a unei burse POSDRU - proiectul POSDRU/187/1.5/S/155397 cu titlul *POCU/380/6/13/123623, Nr.233/23.10.2019, cu titlul “Doctoranzi și cercetători postdoctorat pregătiți pentru piața muncii !”*.