

UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI
(UNSTPB)

Școala Doctorală de
Ingineria și Aplicațiile Laserilor și Acceleratorilor

Decizia Nr. ____ din ____ - ____ - ____

REZUMAT
TEZĂ DE DOCTORAT

ȚINTE DE MASĂ LIMITATĂ PENTRU
EXPERIMENTE CU LASERI DE MARE PUTERE

MASS-LIMITED TARGETS FOR HIGH-POWER LASER EXPERIMENTS

Student-doctorand: **Laurențiu-Christian Dincă**

COMISIA DE DOCTORAT

CS1 Dr. habil. Călin Alexandru UR	Președinte	IFIN-HH / ELI-NP
CS1 Dr. habil. Dimitar Loukanov BALABANSKI	Coordonator de doctorat	IFIN-HH / ELI-NP
CS1 Dr. habil. Daniel URSESCU	Referent	IFIN-HH / ELI-NP
Prof. Univ. Dr. habil. Ionuț Cristian TOPALĂ	Referent	Universitatea din Iași "Alexandru Ioan Cuza" / Facultatea de Fizică
Conf. Univ. Dr. habil. Cătălin Nicolae MARIN	Referent	Universitatea de Vest din Timișoara / Facultatea de Fizică

BUCUREȘTI
2024

Mulțumiri

CS2 Dr. **Bogdan Diaconescu** • IFIN-HH / ELI-NP, *Măgurele (Ilfov)*
Drd. **Cosmin Jalbă** • UNSTPB / SDIALA, IFIN-HH / ELI-NP, *Măgurele (Ilfov)*
CS1 Dr. **Bogdana Mitu** • INFLPR / PPMS Group, *Măgurele (Ilfov)*
CS3 Dr. **Veronica Sătulu** • INFLPR / PPMS Group, *Măgurele (Ilfov)*
CS3 Dr. **Cristina Gheorghiu** • IFIN-HH / ELI-NP, *Măgurele (Ilfov)*
CS3 Dr. **Valentina Mărăscu** • INFLPR / PPMS Group, *Măgurele (Ilfov)*
CS2 Dr. **Victor Leca** • IFIN-HH / ELI-NP, *Măgurele (Ilfov)*
Drd. **Alexandru Măgureanu** • IFIN-HH / ELI-NP, *Măgurele (Ilfov)*
Dr. Eng. **Mihail Cernăianu** • IFIN-HH / ELI-NP, *Măgurele (Ilfov)*
CS2 Dr. **Nikolay Djourelou** • IFIN-HH / ELI-NP, *Măgurele (Ilfov)*
Tehnician **Daniel Popa** • IFIN-HH / ELI-NP, *Măgurele (Ilfov)*

Echipa Grupului PPMS • INFLPR, *Măgurele (Ilfov)*

Echipa LDED și LSD • IFIN-HH / ELI-NP, *Măgurele (Ilfov)*

Acronime sau abrevieri pentru afilieri:

IFIN-HH – *Institutul Național de C&D pentru Fizică și Inginerie Nucleară
"Horia Hulubei"*

ELI-NP, din cadrul IFIN-HH – *Extreme Light Infrastructure - Nuclear Physics*

TL, din cadrul ELI-NP – *Targets Laboratory*

LDED, din cadrul ELI-NP – *Laser Driven Experiments Department*

LSD, din cadrul ELI-NP – *Lasers System Department*

INFLPR – *Institutul Național de C&D pentru Fizica Laserilor, Plasmei și Radiației*

Grupul PPMS, din cadrul INFLPR – *Grupul Plasma Processes, Materials and
Surfaces*

UNSTPB – *Universitatea Națională de Știință și Tehnologie "Politehnica București"*

SDIALA, din cadrul UNSTPB – *Școala Doctorală de Ingineria și Aplicațiile
Laserilor și Acceleratorilor*

Cuprins

Cuvinte cheie • Listă de abrevieri.....	iv
1 Introducere	5
2 Aspecte teoretice și metodologice	8
3 Fabricarea și caracterizarea de filme din DLC pe substraturi de Si	15
4 Filme autosuspendate din DLC pe substraturi de Cu nepoliate corodate prin litografie UV. Asamblare de ținte.....	19
5 Filme autosuspendate din DLC pe substraturi de Cu poliate corodate prin litografie UV. Asamblare de ținte.....	24
6 Concluzii	30
Bibliografie	35

Cuvinte cheie

Accelerare indusă laser; Ținte de filme subțiri; Filme auto-suspendate;
Caracterizare de rugozitate; Carbon similar diamantului;
Corodare de substrat pe bază de model; Litografie în ultraviolet

Listă de abrevieri

HPL – Laser de mare putere (*High-Power Laser*)
TNSA – Accelerare de înveliș pe direcția normalei țintei
(*Target Normal Sheath Acceleration*)
RPA – Accelerare prin presiunea radiației (*Radiation Pressure Acceleration*)
RIT – Transparență indusă relativist (*Relativistic Induced Transparency*)
BOA – Accelerare intensificată postinteracție laser (*Breakout Afterburner*)
DLC – Carbon similar diamantului (*Diamond-Like Carbon*)
CVD – Depunere chimică în fază de vapori (*Chemical Vapor Deposition*)
PECVD – Depunere chimică în fază de vapori asistată în plasmă
(*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*)
AFM – Microscopie de forță atomică (*Atomic Force Microscopy*)
XPS – Spectroscopie de fotoelectroni emiși în raze X
(*X-Ray Photoelectron Spectroscopy*)
EDX – Spectroscopie de raze X cu dispersie în energie
(*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*)
UV – Ultraviolet (*Ultraviolet*)
RF – Radiofrecvență (*Radiofrequency*)
MW – Microunde (*Microwave*)
RMS – Medie pătratică (*Root Mean Square*)
STD – Deviație standard (*Standard Deviation*)
3D – Tri-dimensional (*Three-Dimensional*)
2D – Bi-dimensional (*Two-Dimensional*)
IPA – Izopropanol (*Isopropanol*)
PMMA – Polimetilmetacrilat (*Polymethylmethacrylate*)
PVA – Alcool polivinilic (*Polyvinyl Alcohol*)

Capitolul 1

Introducere

Accelerarea ionilor și a particulelor subatomice încărcate este de mare importanță în multe domenii ale științei, ingineriei și medicinei, implicând interacțiunea acestor radiații cu materia sau cu alte fascicule de energie înaltă.

Tehnologia clasică de accelerare constă în utilizarea de sisteme electromagnetice (compuse din electrozi, bobine, magneți) care au dimensiuni relativ mari pentru un anumit câștig de energie cinetică a particulelor accelerate. Acest fapt constituie un dezavantaj al lanțului lung de dispozitive electromagnetice succesive necesare unui accelerator clasic. Din acest motiv, în ultimele decenii a început să se dezvolte o tehnologie optică pentru accelerarea particulelor încărcate electric, care implică surse HPL (accelerare cu laser) ale căror puteri au crescut relativ rapid datorită introducerii tehnicii de amplificare *chirped-pulse* [1] [2]. Această tehnologie constă în utilizarea un puls HPL focalizat, interacționând cu ținte în stare gazoasă, solidă sau lichidă. Ca urmare a acestei interacțiuni rapide, un flux ridicat de particule încărcate accelerate este emis practic instantaneu din țintă. Particulele emise constau în ioni pozitivi și electroni care provin din procesul de ionizare a atomilor țintei cauzat de câmpul electric extrem al pulsului laser în punctul de focalizare. Energia cinetică a acestor particule poate atinge valori în domeniul relativist (sute de MeV/nucleon pentru ioni [3]), chiar ultra-relativist pentru electroni. Un avantaj major al acestei noi tehnologii de accelerare este raportul foarte ridicat dintre câștigul de energie cinetică și lungimea parcursului de accelerare al particulelor, datorită intensității ridicate a câmpului electric în spotul de focalizare (chiar de $10^5 \div 10^6$ ori mai ridicat decât câmpul electric din acceleratoarele convenționale) [4] [5]. Un alt avantaj esențial al acestor sisteme este perspectiva reducerii dimensiunii acestora (acceleratoare laser *table-top*), un astfel de ansamblu experimental putând deveni mai compact decât unul bazat pe accelerator clasic [3]. Un aspect important constă în faptul că radiații electromagnetice

secundare sunt generate simultan în timpul accelerării (ex.: UV extrem, raze X și gamma), utile pentru aplicații care necesită radiații în aceste intervale spectrale.

Prin utilizarea de filme solide subțiri ca ținte pentru pulsurile HPL, se pot genera fluxuri de ioni accelerați la energii mai mari decât în cazul filmelor solide groase [6]. Filmele pentru ținte trebuie să fie realizate din compuși ce conțin specii atomice care vor fi accelerate ca ioni pozitivi.

Speciile de ioni care pot fi accelerați sunt de diferite tipuri, putând fi utilizate în experimente din diverse domenii (ex.: fizica nucleară, materiale de ecranare la radiații ionizante, hadron-terapia, producția de radioizotopi, imagistica industrială cu protoni, astrofizica experimentală) [7] [8]. Ionii de carbon accelerați sunt o categorie aparte în special datorită utilității lor în radioterapia cu ioni de înaltă energie pentru tratamentul anumitor tipuri de tumori [9]. Ionii pozitivi de înaltă energie (inclusiv ionii de carbon) au proprietatea că absorbția energiei cinetice de către mediul de propagare (țesuturi) este invers proporțională cu energia cinetică instantanee, astfel încât daunele chimice din țesuturi vor fi proporționale cu distanța de deplasare [10]. Acest lucru ajută la minimizarea leziunilor țesuturilor sănătoase (plasate înaintea tumorii) și la maximizarea distrugerii tumorii [11]. Există câteva alte aplicații ale ionilor/protonilor accelerați cu pulsuri laser cărora de asemenea li se acordă importanță: fuziunea cu aprindere rapidă, generarea de particule exotice și reconstrucția dinamică câmpurilor electrice de accelerare prin măsurători ale emisiei de protoni accelerați [12].

Elementul chimic carbon poate exista în stare solidă în condiții normale de temperatură, putând fi astfel utilizat în compoziția filmelor țintă pentru experimentele de accelerare cu laser. Filmele subțiri cu grosimi de zeci/sute de nanometri pot fi obținute prin tehnici de depunere pe substraturi. Deoarece numai stratul de carbon este necesar în zona de focalizare a laserului, este necesar ca filmul să fie autosuspendat [13] pe suprafețe de cel puțin un milimetru pătrat pentru a proteja substratul împotriva deteriorării cauzate de curenții electrici mari induși în film în jurul zonei de focalizare atunci când interacționează cu pulsul laser. Aceasta înseamnă că dimensiunea zonei de autosuspendare a filmului este mult mai mare decât grosimea acestuia (*high-aspect ratio*) [14]. Astfel, riscurile de forfecare și zgâriere a filmului autosuspendat, cauzate de forțe mecanice externe sau interne existente până la momentul interacției cu pulsul laser, sunt prezente atât în timpul manipulării țintei, depozitării țintei, cât și după montarea acesteia. Din acest motiv este necesar să se utilizeze un film cu proprietăți mecanice suficient de bune (ex.: rezistență ridicată la tracțiune, duritate ridicată). Carbonul este potrivit pentru îndeplinirea acestor cerințe mecanice datorită posibilității de a fi crescut sub formă de DLC, diamant sau grafenă, utilizând procese de depunere adecvate. Aceste tipuri de materiale carbonice sunt cunoscute ca având un comportament mecanic bun. La ora actuală există disponibilitate comercială a foliilor de DLC fără substrat, având grosimi de la jumătate de micrometru sau un micrometru până la zeci de micrometri sau mai mult, utilizabile în experimentele de accelerare de ioni cu pulsuri laser. În schimb, gama de grosimi de la nanometri sau zeci de nanometri până la sute de nanometri este descoperită de acest tip de furnizare. Chiar dacă ar putea fi disponibile comercial folii DLC fără substrat cu grosimi de puțin sub o jumătate de micrometru, acestea ar fi foarte dificil de manipulat, cu păstrarea integrității, pentru a fi fixate pe suporturile de ținte. Prin urmare,

dezvoltarea de metode care utilizează substraturi solide pentru creșterea filmelor de DLC este stringentă, chiar dacă această modalitate implică corodarea pe bază de model a substratului pentru a obține zone de autosuspendare ale filmului. Pe de altă parte, în acest fel este implementat un lanț de fabricație *on-site* în cadrul facilității unui astfel de sistem laser, diminuând dependența de externalizare și chiar a termenelor lungi de livrare pe care un lanț *off-site* le-ar presupune. Teza de doctorat constă într-o dezvoltare experimentală care își propune să îndeplinească astfel de deziderate, în cadrul căreia țintele de DLC au fost studiate privind fabricarea, caracterizarea și aplicarea în experimentele HPL. Procesul de depunere PECVD a fost utilizat pentru creșterea de filme subțiri de DLC cu grosimi de 10 nm ÷ 600 nm, urmată de caracterizarea acestora în ceea ce privește îndeplinirea cerințelor pentru utilizarea ca ținte în experimentele HPL.

Filmele de DLC obținute pe substraturi au fost integrate pe suporturi de ținte pentru a fi utilizate în experimentele HPL efectuate în cadrul campaniei de comisionare a zonei experimentale a ELI-NP destinată pulsurilor laser de 1 PW [15] [16] [17] [18]. Experimentul HPL pentru care s-au fabricat și caracterizat ținte de DLC a vizat determinarea energiilor cinetice atinse de ionii de carbon și de protonii accelerați [16] [17]. Un alt experiment anterior a urmărit influența filmelor de DLC în ținte dublu-strat asupra contrastului pulsului laser incident, evidențiată prin măsurarea reflexiei luminii [18].

În capitolele care formează structura tezei este definit mai întâi cadrul general și teoretic implicat în cercetarea prezentată, apoi fiind discutate activitatea experimentală și rezultatele acesteia, începând cu optimizarea procesului de depunere a DLC și continuând cu implementarea acestei metode de depunere pe substraturi de cupru, realizarea de zone de DLC autosuspendat pe aceste substraturi acoperite și utilizarea acestor compozite de DLC/Cu în aplicațiile HPL.

Capitolul 2

Aspecte teoretice și metodologice

Accelerarea indusă laser este un proces complex bazat pe fenomene de interacțiune dintre un puls laser foarte intens și plasma formată de acesta. Există mai multe mecanisme de accelerare posibile prin care acest proces are loc în țintele solide. Prevalența unui mecanism sau altul, precum și combinația dintre acestea, depind de condițiile experimentale care pot influența eficiența mecanismului, caracteristicile fluxului de particule accelerate și spectrele de energie ale acestora, cum ar fi: grosimea filmului țintă, distribuțiile de masă și de sarcină electrică ale electronilor și nucleelor din interiorul țintei, prezența sau lipsa nano/micro-structurării, unghiul de incidență, intensitatea și polarizarea pulsului laser, contrastul dintre pulsul principal și prepuls/pedestal, profilul fasciculului laser. În această secțiune, sunt descrise pe scurt două mecanisme (regimuri) de accelerare distincte și importante, primul fiind descoperit timpuriu și cel mai cercetat în cadrul facilităților laser [19], iar al doilea descoperit mai târziu din cauza condițiilor mai restrictive pentru pulsurile laser (intensități și contraste cu câteva ordine de mărime mai mari decât cele necesare pentru TNSA), îndeplinite mai recent, în special odată cu progresul tehnologic al laserilor din gama petawatt. Există regimuri intermediare acestor două care ar putea depăși energiile cinetice maxime atinse de ionii accelerați prin TNSA, cum ar fi RIT, BOA, RPA-TNSA [7] [20], folosind ținte subțiri și ultrasubțiri până la grosimi de ordinul nanometrilor [16].

În afară de structurile cristaline, carbonul poate forma unele materiale amorfe care conțin atomi în una sau mai multe stări de hibridizare (amestec de stări de hibridizare). Un exemplu de astfel de material este DLC care este un amestec amorf compus predominant din carbon sp^3 și mai puțin din carbon sp^2 , DLC ideal conținând în întregime atomi sp^3 [21] [22].

Diamantul, DLC și grafena pot fi crescute sub formă de filme subțiri și prezintă un comportament mecanic bun [23] [24]. DLC prezintă o structură amorfă [21] căreia îi

lipsește ordinea cristalină pe distanțe lungi, manifestând fragilitate mai scăzută decât diamantul și grafitul, îmbinând flexibilitatea cu duritatea ridicată oferită de legăturile sp^3 C-C [25] [26]. Alte materiale care manifestă o rigiditate mecanică ridicată prezintă în schimb fragilitate, nefiind suficient de potrivite pentru utilizare acolo unde sunt necesare proprietăți mecanice bune. Acest material carbonic amorf poate fi crescut prin tehnica PECVD [21] [27], necesitând temperaturi sub 300°C , mai scăzute decât cele necesare la depunerile de diamant și grafen prin alte tehnici CVD, forme alotropice ale carbonului cu cristalinitate de lungă distanță. Depunerea prin PECVD a filmelor de DLC are avantajul de a fi adecvată aproape oricărui substrat compatibil cu vidul.

DLC poate fi crescut prin procese consumatoare de hidrogen (ex.: CVD), ceea ce poate duce la un conținut scăzut al acestui element în filme (DLC hidrogenat). În ceea ce privește utilizarea pentru accelerarea cu laser, astfel de ținte ar putea furniza fascicule conținând protoni pe lângă ionii de carbon. Acest flux suplimentar de protoni se adaugă acelor emisi din stratul de impurități de la suprafață, a cărui formare este inerentă cât timp suprafețele filmelor intră în contact cu urmele de H_2O și poluanți C_xH_y din atmosferă începând de la devidarea camerei de depunere până la vidarea camerei de interacțiune HPL.

În această teză, principalele obiective au fost creșterea și investigarea filmelor subțiri de carbon pentru experimentele de accelerare de ioni indusă laser. Pentru aplicațiile HPL este necesar ca filmele utilizate să îndeplinească condiții geometrice, mecanice, chimice și morfologice specifice [16]. În cadrul lucrării este propusă o configurație a țintelor de DLC în care filmul este parțial susținut de substrat, având zone autosuspendate înconjurată de restul filmului care este fixat pe substrat [16].

Dimensiunea de 1 mm pentru o zonă autosuspendată este suficient de mare pentru a evita deteriorarea substratului înconjurător ca urmare a interacțiunii dintre pulsul laser și aceasta [16] [17], dar suficient de mică pentru a evita riscurile de deteriorare mecanică generate de un raport *aspect ratio* foarte mare, chiar și pentru filme robuste [16] [22] [23] [28] [29].

În ceea ce privește morfologia, o constrângere de rugozitate pe baza criteriului Rayleigh [30] este necesară pentru asigurarea prevalenței propagării speculare a pulsurilor, prin filmul solid de DLC, la apariția incidenței. Pentru a considera suprafața de reflexie suficient de netedă pentru a prevala componenta coerentă a unde electromagnetice reflectate [31], parametrul de rugozitate Rayleigh (Ra_r) al suprafeței este limitat la maximum 0,8 de către criteriul Rayleigh pentru incidență normală [30]. Acest criteriu se aplică atunci când lumina traversează suprafața, utilizând pentru transmisie un parametru similar (Ra_t) care implică, de asemenea, o limită superioară [30]. Acest caz este valabil aici, cât timp absorbția pedestalului pulsului începe în timpul transmisiei în film, cauzând astfel formarea preplasmei. Volumul de absorbție este mai compact și mai bine delimitat odată ce transmisia difuză este minimizată. În Ecuația (2.1) [16], Ra_t depinde de rugozitatea R_q [30] prin factorul de reducere p pentru o valoare λ dată odată ce $R_q = \lambda/p$, de indicele de refracție al DLC crescut prin PECVD notat cu $n(\lambda)$ și considerat în intervalul $1,57 \div 2,32$ pentru lungimea de undă mediană a domeniului vizibil [32], și a vidului de pe partea frontală care este egal cu 1 [16]:

$$Ra_t = \frac{\pi|1 - n(\lambda)|}{p} \quad (2.1)$$

O valoare maximă de $\lambda/10$ pentru rugozitatea R_q [22] [23] [28] [29] a fost aleasă pentru a acoperi suficient de multe cazuri pentru criteriul Rayleigh la incidență normală [16]: intervalul $\lambda/5,3 \div \lambda/2,3$ pentru transmisia prin filmul de DLC conform Ecuației (2.1); $\lambda/8$ pentru reflexie [31]. Ultimul caz este luat în considerare pentru oglinzile de plasmă sacrificiale, alte aplicații ale filmelor subțiri în experimentele HPL (în afară de aplicațiile ca ținte) care ar putea beneficia în viitor de metodele de fabricare și caracterizare dezvoltate și prezentate în această teză [16]. Această aplicație este utilă pentru îmbunătățirea contrastului pulsului laser și pentru protecția împotriva retro-reflexiei și a micro-fragmentelor din țintă ce se pot răspândi în incinta experimentală ca urmare a interacției cu un puls laser de contrast foarte scăzut [33] [34]. Având în vedere cele de mai sus, limita maximă a rugozității pe care filmele fabricate trebuie să o îndeplinească pentru orice aplicație HPL a fost stabilită mai restrictiv decât pentru aplicațiile ca ținte care necesită doar criteriul Rayleigh pentru transmisie. În cercetarea desfășurată pentru această teză, preocuparea a fost legată de aplicațiile ca ținte. În cazul pulsurilor HPL generate de sistemul laser pe bază de Ti:safir de la ELI-NP, λ este aproximativ 810 nm [15] [35] [36], astfel, limita superioară pentru rugozitatea filmului în acest caz este de ≈ 81 nm, valoare considerată în această lucrare de cercetare.

Pe baza celor de mai sus și a grosimilor necesare pentru a obține energia cinetică medie maximă a ionilor de carbon (≈ 80 nm pentru $\lambda=820$ nm și $I=5 \times 10^{22}$ W/cm²) [20], sunt necesare filme carbonice cu conținut ridicat de carbon sp³. DLC permite îndeplinirea cerințelor de grosime, motiv pentru care acest material a fost ales în cadrul lucrării.

Pentru a obține valori ridicate ale rezistenței mecanice a amestecurilor de carbon sp³ și sp² (de exemplu, DLC), se emite supoziția că este necesar a crește filme cu conținut sp³ ridicat. Aceasta constituie o condiție chimică vizată, derivată din cerința mecanică menționată mai sus.

Configurația geometrică a zonelor autosuspendate de DLC necesită un caracter alternant [37], în care regiunea non-autosuspendată a filmului completează restul suprafeței substratului între zonele autosuspendate ale filmului.

Pentru $\lambda=810$ nm, cel mai bun spot de focalizare (la dimensiunea minimă) are un diametru de $d=1,2 \cdot \lambda \approx 1$ μ m, luând în considerare limita de difracție a pulsului laser.

Filmele de DLC pot fi depuse pe un substrat folosind procese cu plasmă în vid înalt. În aceste procese, un amestec de gaze precursorare este introdus în camera de vid la debite parțiale controlabile. Unul dintre gazele din amestec trebuie să conțină elementul carbon care va fi sursa filmului de carbon depus (acest gaz este de obicei o hidrocarbură) [23]. Celelalte gaze din amestec pot fi un gaz inert (de exemplu, argon) și/sau hidrogen diatomic.

În timpul creșterii prin PECVD a filmelor de DLC, în materialul depus se formează simultan structuri de carbon sp² și sp³. Ioni de hidrogen din plasma formată joacă un rol important în corodarea de către plasmă a structurilor de carbon sp² formate, la viteze mai mari decât a structurilor de carbon sp³ formate. [38] [39]. Acest lucru favorizează formarea de structuri sp³ în detrimentul structurilor sp² [24], care este exact obiectivul

propus. Elementul hidrogen implicat în aceste două procese concurente de corodare în plasmă provine din hidrocarburile gazoase, dar și din H_2 dacă este prezent [38]. Pe de altă parte, cantități mici de hidrogen din plasmă ar putea fi încorporate în filmele obținute [40], această contaminare fiind utilă pentru experimentele HPL de accelerare a ionilor de hidrogen având numărul de masă $A=1$ (protoni), suplimentar ionilor de carbon [41].

Pe de altă parte, suprafața maximă de depunere folosind această tehnică poate fi mare, în funcție de dimensiunile electrozilor, ceea ce este util pentru creșterea filmelor pentru aplicații ca ținte HPL (este necesară o dimensiune de ordinul centimetrilor a filmului depus pentru a i se asigura un număr suficient de zone autosuspendate pe același substrat după o prelucrare ulterioară).

Amestecurile de precursori gazoși care conțin carbon combinat cu elemente ca hidrogen și/sau oxigen sunt reprezentate prin diagrama C-H-O (see Figura 2.1), care este valabilă pentru procesele CVD în general, implicând sau nu plasmă (PECVD fiind de asemenea inclus). Vizual, diagrama constă într-un triunghi echilateral cu fiecare vârf denumit la fel ca fiecare simbol chimic al acestor trei elemente. Diagrama are trei coordonate corespunzătoare câte unui punct de pe fiecare latură a triunghiului [42] [43]. Aceste coordonate sunt denumite X_{HC} , X_{OH} și X_{CO} , fiind definite de Ecuația (2.2) [42] utilizând notația comprimată $X_{HC;OH;CO}$. Această diagramă indică care stoichiometrii C:H:O ale mixturii precursorare gazoase sunt mai favorabile formării de structuri de carbon sp^3 în filmele crescute prin procese de depunere CVD.

$$X_{HC;OH;CO} = \frac{N_{H;O;C}}{N_{H;O;C} + N_{C;H;O}} \quad (2.2)$$

N indexat cu C, H sau O, reprezintă numărul total de atomi de carbon, de hidrogen sau de oxigen din amestecul aflat în camera de depunere. Privitor la reprezentarea triunghiulară, aceste trei valori corespund în mod unic la trei puncte de pe laturile triunghiului. În vârful 'C' (carbon) $X_{HC}=0$ și $X_{CO}=1$, pe când în vârful 'H' (hidrogen) $X_{HC}=1$ și $X_{OH}=0$; de asemenea, în vârful 'O' (oxigen) $X_{OH}=1$ și $X_{CO}=0$. De-a lungul laturilor triunghiului coordonatele variază liniar astfel încât în vârfuri acestea iau valorile menționate anterior. Punctul (starea) din această diagramă este obținut prin intersecția a trei linii, fiecare determinată de un punct coordonată și de vârful său opus [42].

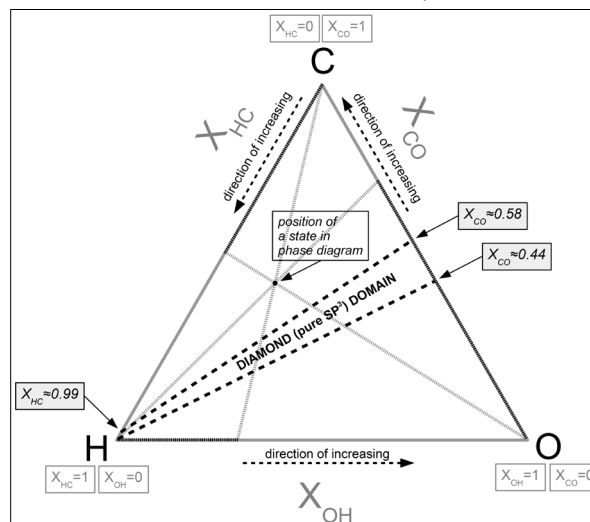


Figura 2.1: Reprezentarea geometrică a diagramei C-H-O (triunghi echilateral); redesenată după o figură din referința bibliografică [42]

În reprezentarea geometrică, X_{HC} , X_{OH} , și X_{CO} corespund distanței dintre punctele de coordonate și vârfurile 'C', 'H', respectiv 'O'. În aceeași reprezentare, $1-X_{HC}$, $1-X_{OH}$, și $1-X_{CO}$ corespund distanței dintre punctele de coordonate și colțurile 'H', 'O', respectiv 'C'.

La o temperatură dată, dacă presiunile parțiale ale speciilor moleculare gazoase sunt egale, atunci și concentrațiile lor moleculare (numărul de molecule per volum) sunt egale conform legii gazelor ideale (în continuare, aceste concentrații egale vor fi notate cu n^*). O astfel de condiție pentru presiunile parțiale a fost aplicată în procesul de creștere al DLC dezvoltat în cadrul prezentei lucrări. Numărul de atomi pentru fiecare element din amestecul precursor depinde de stoichiometria atomică și de debitul de gaz pentru fiecare specie moleculară componentă (a i -a specie moleculară este notată cu M_i pentru $i = \overline{1, q}$, unde q este numărul total de specii). De asemenea, acesta depinde de concentrația componentelor gazoase n^* și de timpul de depunere Δt care, de asemenea, este același pentru fiecare M_i . Aceste dependențe sunt exprimate în următoarea ecuație:

$$N_{C;H;O} = n^* \cdot \Delta t \cdot \sum_{i=1}^q N_{C;H;O}(M_i) \cdot \Phi_{M_i} \quad , \quad (2.3)$$

unde Φ_{M_i} este debitul de gaz (volum per timp), iar $N_{C;H;O}(M_i)$ este numărul de atomi de C, H sau O dintr-o moleculă M_i .

Ecuația (2.3) este utilă pentru a obține raportul stoichiometric vizat al amestecului precursor (rapoartele reciproce între N_C , N_H , and N_O) prin utilizarea unor rapoarte adecvate la reglarea fluxurilor de gaze ce formează acest amestec.

În același timp, este necesar a se menține o presiune totală în cameră în timpul procesului de depunere favorabilă creșterii filmului de DLC. Stoichiometria C:H:O necesară determină în mod direct doar raportul dintre fluxurile de gaze componente ale mixturii C/H/O, nu și valorile acestora. Astfel, presiunea totală și raporturile reciproce dintre fluxurile de gaze componente mixturii sunt esențiale pentru definirea procesului de creștere.

Raportul stoichiometric este legat de coordonatele diagramei triunghiulare, astfel încât debitele de gaze necesare sunt determinate prin cunoașterea coordonatelor X_{HC} , X_{OH} și X_{CO} care trebuie atinse pe diagramă și a stoichiometriei elementelor chimice ale gazelor componente. În Figura 2.1, limita superioară și inferioară din interiorul diagramei, corespunzătoare structurilor de carbon sp^3 pur (precum diamantul) din filmele carbonice depuse, sunt reprezentate prin linii discontinue negre. Fiecare dintre aceste două linii se intersectează cu fiecare dintre laturile triunghiului [CH] și [CO] după cum urmează: linia superioară între $X_{HC}=0,99$ și $X_{CO}=0,58$, iar linia inferioară între $X_{HC}=1$ și $X_{CO}=0,44$. Prin urmare, creșterea filmelor de carbon cu conținut sp^3 ridicat implică coordonatele din regiunea menționată a diagramei [42].

După etapa de depunere a filmului, este necesară corodarea pe bază de model a substraturilor pentru a obține o configurație de zone autosuspendate ale filmului, utilizând o procedură bazată pe litografie UV și corodare chimică cu $FeCl_3$ adecvată substraturilor de cupru [23].

Odată ce țintele sunt fabricate, este necesar a se verifica conformitatea acestora cu proprietățile necesare [16] utilizând tehnici de caracterizare specifice științei materialelor.

Metoda înălțimii trepte este o modalitate de determinare a grosimii unui film depus pe un substrat. Această metodă se bazează pe achiziționarea unui profil-linie $z(x)$ care trebuie să includă atât zona neacoperită, cât și cea acoperită, ale substratului (acest profil denumindu-se profilogramă 2D). Pe profilul-linie obținut, se selectează un interval în zona neacoperită și un altul în zona acoperită pentru a calcula mediile lui z : $\bar{z}_{neacoperit}$ și $\bar{z}_{acoperit}$. Grosimea asociată unui profil-linie este considerată a fi diferența (înălțimea trepte) dintre aceste medii [22] [28] [29]: $h = \bar{z}_{acoperit} - \bar{z}_{neacoperit}$. Profilometrul de contact este un instrument utilizat pentru astfel de măsurători datorită capacității de a scana un profil-linie chiar și de-a lungul câtorva milimetri, ținând cont de faptul că este necesar să se includă în linia de scanare cel puțin întreaga zonă de trecere dintre porțiunea neacoperită și cea acoperită.

Grosimile filmelor determină rata de depunere a procesului de obținere a acestora în condiții specifice, extragând această rată din fitarea liniară a graficului experimental al grosimii în funcție de timpul de depunere trasat în baza filmelor crescute.

Asperitatea suprafeței unui material este cuantificată prin parametrul de rugozitate ce caracterizează topografia zonei scanate. După această scanare, care se realizează cu ajutorul instrumentelor profilometrice (de exemplu, profilometru optic, microscop AFM), se generează o profilogramă 3D $z(x,y)$, unde z este nivelul înălțimii punctului de pe suprafața scanată [23]. În Ecuțiile (2.4), cantitatea S_q (rugozitatea RMS 3D) este definită în conformitate cu standardul ISO 25178. Produsul $M \cdot N$ este numărul de perechi (x_i, y_i) corespunzătoare punctelor de măsurare a lui z din zona de scanare dreptunghiulară, după translația pe Oz a profilogramei cu $\Delta z = |z_{average}|$ spre originea axei. O altă funcție care caracterizează topografia este profilul-linie $z(u)$ unde u este coordonata de-a lungul acesteia. Cantitatea R_q măsoară rugozitatea 2D a profilului-linie, fiind definită similar cu S_q precum în Ecuțiile (2.4), unde P este numărul de puncte de coordonate u_k ale profilului după translația menționată anterior. Profilurile-linie pot fi achiziționate direct cu un echipament profilometric sau extrase cu ajutorul unui *software* dintr-o profilogramă 3D achiziționată. Extragerea profilelor în acest din urmă caz poate fi utilă pentru măsurarea rugozității pe o regiune de interes mai restrânsă în dimensiune decât profilograma de suprafață mare achiziționată, cu atât mai mult cu cât suprafața prezintă o caracteristică de undulație.

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{i,j=1}^{M,N} z^2(x_i, y_j)} \quad , \quad R_q = \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{k=1}^P z^2(u_k)} \quad (2.4)$$

Raportul dintre concentrația stărilor de hibridizare sp^3 și sp^2 ale carbonului în filmele caracterizate va oferi o indicație cu privire la comportamentul în condiții de stres mecanic care poate apărea în timpul manipulării țintelor care conțin filme în formă autosuspendată. În ceea ce privește procesul de accelerare indusă laser, concentrațiile speciilor de ioni din fluxul emis vor depinde de compoziția elementală a filmului țintă, pe lângă grosimea și

densitatea acestuia, parametrii pulsului HPL și alte condiții de interacțiune laser-țintă. Prin urmare, filmele din DLC necesită o caracterizare chimică care poate fi efectuată prin XPS pentru a determina raportul de hibridizare a carbonului și prin EDX pentru compoziția elementelor chimice.

XPS este o tehnică de analiză cantitativă pentru concentrațiile de carbon sp^3 și sp^2 din filmele subțiri de carbon [23]. Se asumă faptul că filmele din DLC au o rezistență mecanică mai mare decât filmele grafitice poli-amorfe, prin urmare, se va urmări creșterea filmelor de DLC cu o concentrație mare de carbon sp^3 . Astfel, XPS este o modalitate de a verifica calitatea procesului de creștere în ceea ce privește abundența de diamant/lonsdaleit în filmele obținute.

Aria *peak*-ului este direct proporțională cu conținutul formei alotropice corespunzătoare, permițând determinarea concentrației procentuale alotropice a speciilor atomice analizate. Pozițiile *peak*-urilor în spectrele XPS sunt în jur de 284,4 eV pentru carbonul sp^2 [44] și mai mari cu $0,6 \pm 0,9$ eV pentru carbonul sp^3 [44] [45].

EDX este o tehnică de analiză semi-cantitativă pentru concentrațiile de specii atomice din interiorul filmelor subțiri obținute, fiind o funcționalitate suplimentară a microscopiei electronice de baleiaj.

Capitolul 3

Fabricarea și caracterizarea de filme din DLC pe substraturi de Si

În continuare sunt prezentate experimentele de optimizare a obținerii filmelor de carbon, efectuate în vederea atingerii obiectivelor menționate anterior ale tezei, privitor la grosime, rugozitate și raport sp^3 - la sp^2 - C.

Pentru a canaliza cercetarea de optimizare numai asupra parametrilor procesului de creștere propriu-zis, au fost utilizate substraturi curate, cu suprafețe foarte netede (plachete de Si). Această alegere a permis excluderea unei rugozități mari a substratului ca fiind cauza unei rugozități mari a filmului, dacă o astfel de caracteristică nedorită a filmului depus s-ar fi obținut.

Tehnica PECVD cu alimentare prin radiofrecvență (100 W la 13,45 MHz) și pompare la vid înalt a fost utilizată pentru a crește două seturi de filme subțiri de carbon (DLC) în condiții diferite la INFLPR. Suportul metalic de substraturi a fost rotit cu 100 rot/min pe parcursul procesului pentru a crește uniformitatea spațială a filmului depus. Înainte de introducerea în camera de depunere, substraturile au fost acoperite parțial cu o mască pentru a lăsa o zonă neacoperită pe substraturi după proces, utilă pentru determinarea grosimii filmului prin metoda înălțimii treptei. Anterior procesului de depunere, pe substraturi a fost efectuat un tratament cu plasmă timp de 10 minute în aceleași condiții ca și depunerea ulterioară (putere, radiofrecvență și viteză de rotație a suportului), dar în atmosferă de Ar/H₂ la joasă presiune (debit de 20 sccm pentru fiecare specie gazoasă). În literatura de specialitate, acest lucru este raportat ca o metodă de eliminare a impurităților de suprafață [27], ceea ce duce la o mai bună aderență a filmului obținut.

Condițiile procesului PECVD utilizate în experimente sunt prezentate mai jos pentru fiecare set de probe obținut (set I, set II) [22] [28] [29].

Setul I a constat din două probe ale căror substraturi au conținut siliciu cu orientare cristalografică [001]. Amestecul gazos precursor a conținut CH₄ și Ar ($\Phi_{\text{CH}_4}=25$ sccm, $\Phi_{\text{Ar}}=50$ sccm) cu o stoichiometrie C:H carbon/hidrogen de 1:4 calculată folosind Ecuațiile (2.2) și (2.3) precedente.

Pentru setul I, presiunea totală din interiorul camerei a fost de $p \approx 10^{-3}$ mbar în timpul procesului de depunere. Timpul de depunere a fost diferit pentru fiecare dintre aceste probe. Valorile pentru Δt au fost de 200 min și 300 min.

Setul II a constat din patru probe ale căror substraturi au conținut siliciu cu orientare cristalografică [001]. Amestecul gazos precursor a conținut CH₄ și H₂ ($\Phi_{\text{CH}_4}=25$ sccm, $\Phi_{\text{H}_2}=62,5$ sccm) cu o stoichiometrie C:H carbon/hidrogen de 1:9 calculată în aceeași manieră ca pentru setul I.

Pentru setul II, raportul dintre fluxurile gazelor cu conținut C/H a fost în valoare de $\Phi_{\text{CH}_4} / \Phi_{\text{H}_2}=0,4$ și presiunea totală din interiorul camerei a fost de $p \approx 1,5 \cdot 10^{-3}$ mbar în timpul procesului de depunere. Timpul de depunere a fost diferit pentru fiecare dintre aceste probe. Valorile pentru Δt au fost de 23 min, 34 min, 45 min și 60 min.

Profilometrul de contact KLA Tencor-P7 a fost utilizat la INFLPR pentru a determina grosimea prin metoda înălțimii treptei. Valorile obținute sunt menționate mai jos pentru fiecare probă de DLC [22] [28] [29]. De asemenea, sunt prezentate curba de calibrare și rata de depunere a proceselor de creștere pentru fiecare set care au avut parametri de proces diferiți [22] [28] [29].

Pentru setul I de probe, au fost achiziționate profilele-linie care stau la baza grosimilor determinate, având valorile de 381,7 nm și 535,5 nm pentru $\Delta t=200$ min, și respectiv, $\Delta t=300$ min, cu erorile de 18,8 nm, și respectiv, 107,2 nm.

Prin fitarea liniară a punctelor experimentale, a fost trasată curba de calibrare a procesului (Figura 3.1), rezultând o rată de depunere (panta dreptei) de 1,8 nm/min pentru procesul de depunere a filmelor probelor setului I.

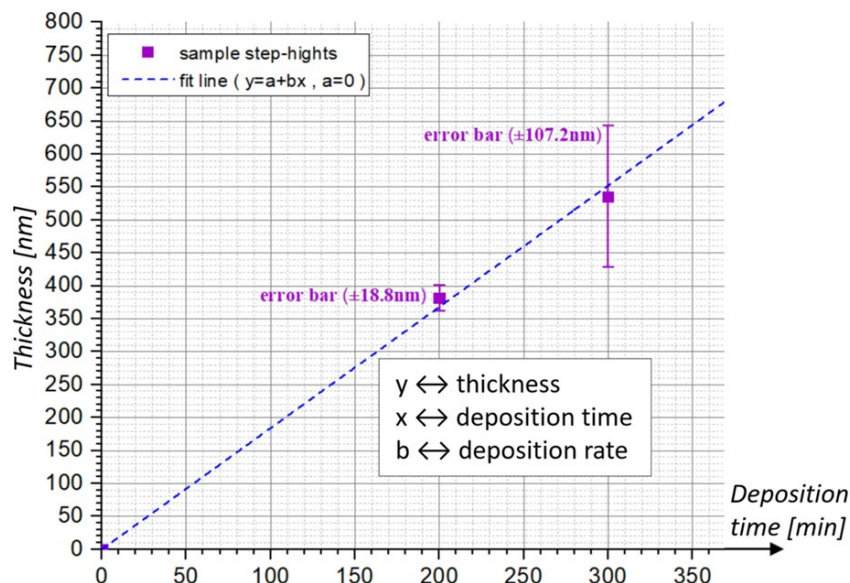


Figura 3.1: Curba de calibrare a procesului $f(x)=b \cdot x$ pentru setul I; grosimile sunt valorile înălțimii treptelor

Pentru setul II de probe, au fost achiziționate profilele-linie care stau la baza grosimilor determinate, având valorile de 21,8 nm, 26,4 nm, 50,5 nm și 57,4 nm pentru $\Delta t=23$ min, $\Delta t=34$ min, $\Delta t=45$ min, și respectiv, $\Delta t=60$ min cu erorile de 6,8 nm, 12,2 nm, 11 nm, și respectiv, 6,8 nm.

Prin fitarea liniară a punctelor experimentale, a fost trasată curba de calibrare a procesului (Figura 3.2), rezultând o rată de depunere (panta dreptei) de 1 nm/min pentru procesul de depunere a filmelor probelor setului II.

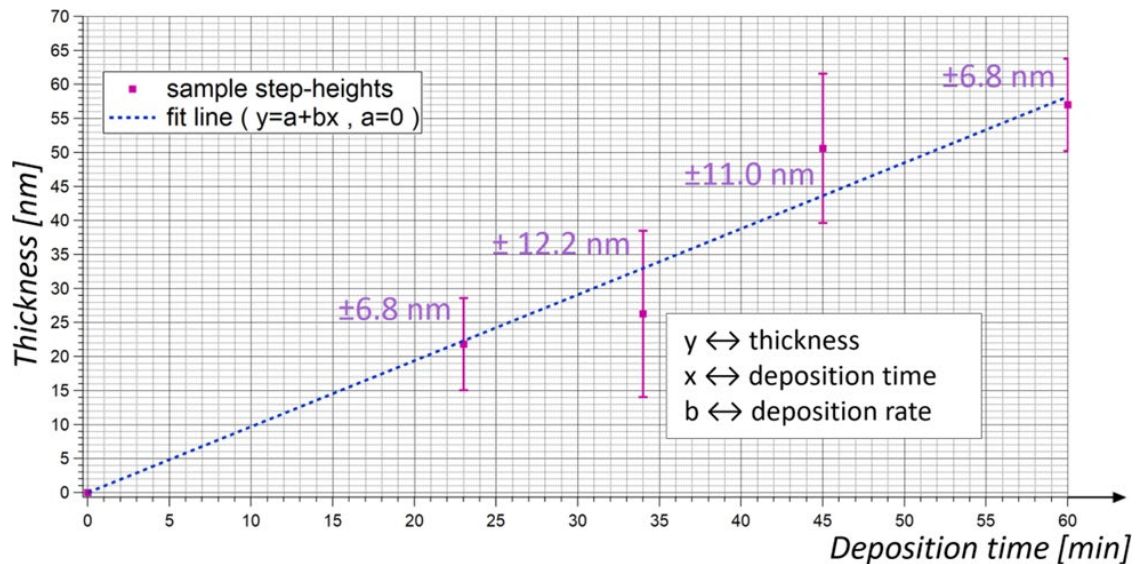


Figura 3.2: Curba de calibrare a procesului $f(x)=b \cdot x$ pentru setul II

Profilogramele AFM 3D au fost achiziționate la ELI-NP cu microscopul NT-MDT Ntegra, scanând pe o arie de $5 \times 5 \mu\text{m}^2 = 25 \mu\text{m}^2$ pe suprafața filmului fiecărei probe din fiecare set, măsurând pentru setul I rugozitatea RMS (S_q) de 1,2 nm și 2,3 nm for $\Delta t=200$ min, și respectiv, $\Delta t=300$ min, și pentru setul II rugozitatea de 3 nm, 0,2 nm, 0,5 nm și 0,2 nm pentru $\Delta t=23$ min, $\Delta t=34$ min, $\Delta t=45$ min, și respectiv, $\Delta t=60$ min [22] [29].

Profilogramele optice 3D au fost achiziționate la ELI-NP cu profilometrul Sensofar S Neox, scanând pe o arie de $\approx 351 \times 264 \mu\text{m}^2 = 92664 \mu\text{m}^2$ pe suprafața filmului fiecărei probe din fiecare set, măsurând pentru setul I rugozitatea RMS (S_q) de 18,6 nm și 14,8 nm pentru $\Delta t=200$ min, și respectiv, $\Delta t=300$ min, și pentru setul II rugozitatea de 2,9 nm, 2,7 nm, 1,6 nm și 1,9 nm pentru $\Delta t=23$ min, $\Delta t=34$ min, $\Delta t=45$ min, și respectiv, $\Delta t=60$ min [22] [29].

Analiza chimică a filmelor de DLC, în ceea ce privește compoziția de carbon sp^3 și sp^2 , a fost efectuată prin XPS la INFLPR utilizând echipamentul ThermoFisher Scientific ESCALAB™ XI+. Spectrele reprezentative pentru fiecare set de probe au fost fitate cu funcții Voigt în concordanță cu *peak*-urile structurilor alotropice de carbon sp^3 și sp^2 , raportul dintre aria fiecărui *peak* și suma ariilor *peak*-urilor fiind concentrația procentuală a fiecărei structuri alotropice din filmul de DLC, care pentru C sp^3 și C sp^2 a fost de 21,1% și 78,9% (setul I) și 45,5% și 54,5% (setul II) [22] [28] [29].

Conținutul de C hibridizat sp^3 vs. sp^2 a fost îmbunătățit, ceea ce implică o rezistență mecanică mai bună a filmelor DLC în formă autosuspendată. Pe de altă parte, conform datelor prezentate mai sus în acest capitol, raportul dintre rugozitatea filmelor de DLC și lungimea de undă HPL ($\lambda \approx 810$ nm for ELI-NP) a fost foarte satisfăcător ($\sim 10^{-4} \div 10^{-3}$), iar încadrarea rugozității în limita superioară de $\lambda/10 \approx 81$ nm a fost de asemenea foarte bună. Această caracteristică topografică se evidențiază pe zone de scanare cel puțin de același ordin de mărime (AFM) sau mult mai mari (profilometrie optică) decât limita de difracție a dimensiunii spotului de focalizare HPL (≈ 1 μ m for this λ). Rezultatele de mai sus arată că procesul PECVD a fost bine optimizat pentru a obține filme subțiri de DLC care îndeplinesc cerințele pentru experimentele de accelerare cu laser de la ELI-NP.

Prin urmare, metoda de depunere de DLC corespunzătoare setului II a fost selectată pentru creșterea de filme pe substraturi de cupru în vederea atingerii obiectivului de fabricare a țintelor pentru experimente cu HPL. Motivul pentru utilizarea substraturilor de cupru constă în disponibilitatea rutei chimice în mediu lichid pentru corodarea substratului, nefiind astfel necesar un echipament complex precum corodarea ionică reactivă în plasmă (cazul utilizării substraturilor de siliciu), mai ales că această din urmă tehnică necesită recipiente de înaltă presiune umplute cu gaze fluorurate periculoase pentru mediu [46] ceea ce conduce la necesitatea de filtrare pe traseul de exhaustare. Un alt motiv este acela că nu este necesar controlul momentului de oprire a corodării datorită lipsei de reactivitate chimică între agentul de corodare (de exemplu, clorura ferică) și filmul carbonic depus, în schimb, în cazul corodării ionice în plasmă acest lucru este necesar din cauza reactivității plasmei atât cu substratul de siliciu, cât și cu filmul carbonic [46]. Astfel, oprirea procesului de corodare cu ioni reactivi este obligatorie exact după străbaterea substratului, în timp ce procesul de corodare chimică umedă nu obligă la acest lucru.

Capitolul 4

Filme autosuspendate din DLC pe substraturi de Cu nepolisate corodate prin litografie UV. Asamblare de ținte

Acest capitol se referă la realizarea de filme de carbon (DLC) autosuspendate pe substraturi care pot fi montate pe suporturi metalice pentru a fi utilizate în experimente cu laseri de mare putere în scopul elucidării unor aspecte ale interacțiunii dintre pulsurile laser cu contrast scăzut și țintele solide fără a utiliza oglinzi de plasmă [18]. Filmele de DLC autosuspendate pe substraturi de Cu corodate au fost montate pe suporturi metalice având folii de Al fixate în prealabil pe acestea, pentru a forma ansambluri de ținte duble DLC-Al. Substraturile de Cu sunt mult mai ușor de prelucrat decât substraturile de Si, beneficiind de căi chimice simple pentru corodare și, suplimentar, manifestând o ductilitate care favorizează integritatea mecanică a substraturilor în timpul prelucrării.

Ansamblul de țintă dublă (Figura 4.1) [18] a constat dintr-o folie lipită pe un suport perforat din Al, distanțiere lipite de folie și o probă de DLC/Cu după corodare lipită pe distanțiere, în contact cu partea de DLC astfel încât orificiul substratului de Cu să fie aliniat cu folia și cu orificiul suportului. În acest caz, folia de Al este ținta propriu-zisă, suprafața mată a foliei fiind suprafața frontală, iar suprafața lucioasă fiind cea posterioară (poziționarea suprafețelor foliei nu contează dacă acestea nu prezintă vizual caracteristici mate sau lucioase). Într-un astfel de experiment, ionii de C și H accelerați provin din contaminanții de pe suprafața posterioară a foliei [41]. Pentru a crește eficiența procesului de accelerare, pulsul HPL care e incident pe folie necesită un contrast ridicat. Acest lucru

se poate obține dacă un film solid subțire se transformă în plasmă și absoarbe o mare parte din energia prepulsului, apoi plasma se disipează înainte de sosirea pulsului principal, pulsul cu contrast îmbunătățit lovind folia după ce a parcurs zeci de micrometri [18]. Un astfel de fenomen ar putea avea loc într-o structură cu două straturi distanțate, formată dintr-un film solid subțire în partea frontală a structurii, un spațiu gol cu grosimea de zeci de micrometri și o folie în partea posterioară, pe care este incident un puls HPL focalizat pe suprafața frontală a foliei [18]. Această structură este regăsită în ansamblul de țintă menționat mai sus.

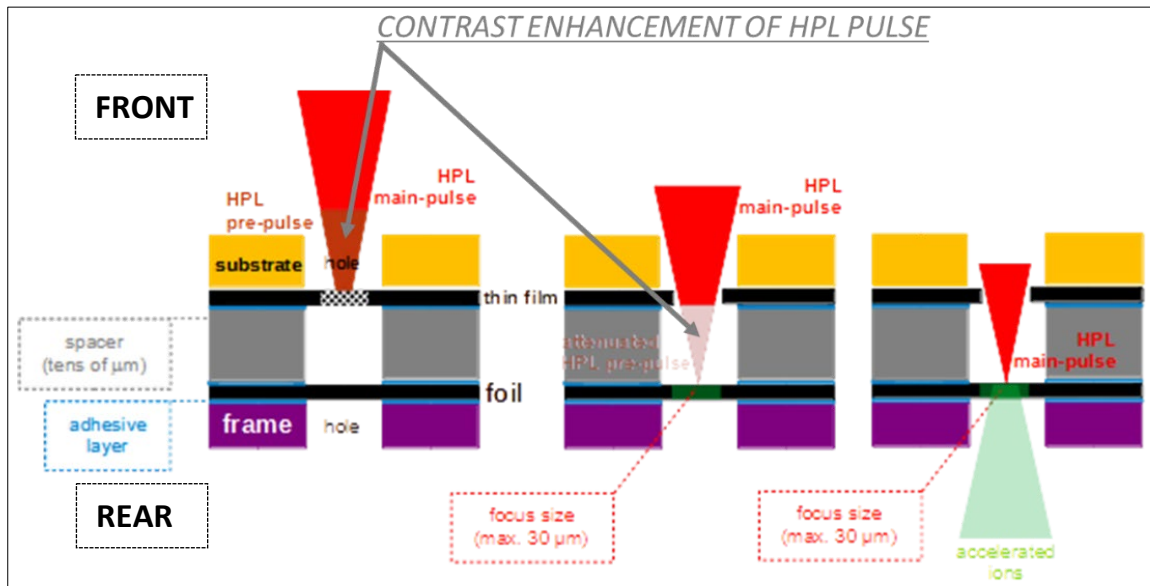


Figura 4.1: Schiță pentru ansamblul de țintă dublă în experimentul de accelerare (vedere transversală)

Conținutul acestui capitol este legat de realizarea de filme de DLC autosuspendate depuse pe substraturi de Cu, după cum urmează:

- pregătirea substraturilor de Cu (debitare, montare mască de depunere, curățare);
- creșterea filmelor de DLC pe substraturi de Cu (obținerea probelor de DLC/Cu);
- corodarea pe bază de model a substraturilor de Cu în baie de soluție apoasă de FeCl_3 ;
- caracterizare (determinarea grosimii, microscopie optică, profilometrie optică).

Corodarea substraturilor de Cu a fost efectuată după diferite teste cu sau fără film de DLC (experimente preliminare), apoi fiind selectată cea mai bună variantă, descrisă mai jos:

- a) pulverizarea și uscarea stratului de fotorezist pozitiv pe fiecare parte a probei de DLC/Cu;
- b) modelarea stratului de fotorezist prin fotolitografie UV utilizând mască UV și proces de developare;
- c) corodare chimică umedă a substratului de Cu în conformitate cu modelul măștii UV; curățarea fotorezistului nedevelopat.

În continuare, acest capitol se referă la realizarea de filme de DLC autosuspendate pe substraturi care pot fi montate pe suporturi metalice, utilizabile în experimente cu laseri de mare putere. Filmele de DLC au fost autosuspendate pe substraturi de Cu corodate, care au fost montate prin lipire cu PMMA pe suporturi de Al, formând ansambluri de ținte duble (Figura 4.1). Sunt prezentate și discutate pregătirea substraturilor de Cu, creșterea filmelor de DLC pe substraturile de Cu (obținerea probelor de DLC/Cu), corodarea cu model prin fotolitografie UV a substraturilor de Cu cu filme de DLC depuse și montarea pe suporturi de Al a probelor de DLC/Cu astfel prelucrate.

Înainte de depunerea filmului de DLC pe substraturi de Cu, acestea au fost pregătite astfel încât să se asigure dimensiuni ale probelor DLC/Cu care să permită o manipulare ușoară pe parcursul întregului lanț de fabricare, să se asigure o bună calitate a suprafeței de depunere și să se asigure o regiune laterală nedepusă pentru a evita desprinderea filmului ce s-ar putea iniția dinspre marginea substratului în timpul proceselor în mediu lichid implicate în lanțul de fabricație. Substraturile au fost decupate din folie de Cu format A4 (grosime 100 μm) în plachete de ~ 30 mm × 20 mm, apoi au fost montate, fără a fi polisate, în rama de depunere și curățate cu ultrasunete în IPA înainte de depunerea de DLC, rama fiind îndepărtată după depunere, astfel rezultând proba de DLC/Cu. Filmele de DLC au fost depuse la INFLPR pe astfel de substraturi montate, prin PECVD folosind ca precursor un amestec gazos C/H cu conținut ridicat de H la o presiune totală de ~10⁻³ mbar, în câmp electric de radiofrecvență de 13,56 MHz și putere de 100 W [18]. Au fost produse loturi de câte șase probe de DLC/Cu având aceeași grosime a filmului de DLC, pentru fiecare lot utilizându-se un proces de creștere separat. Denumirea probei este alcătuită din denumirea lotului urmată de un număr de la 1 la 6.

Grosimea a fost determinată la INFLPR prin profilometrie mecanică (de contact), metoda înălțimii treptei. Pentru această determinare, substratul a fost parțial acoperit în timpul procesului de depunere, treapta dintre substrat și film fiind marginea filmului.

Rezultatele determinării grosimii filmelor de DLC au fost după cum urmează: 129 nm, 67 nm, 163 nm, 64 nm, 208 nm, 42 nm și 78 nm pentru lotul A, B, C, D, E, F, și respectiv, G.

Corodarea de substrat pe bază de model [17] [18] a fost efectuată după demontarea ramei de depunere.

Modelul măștii de UV a constat în 10 orificii cilindrice [17]. Orificiile măștii au fost etichetate de la H1 la H10, păstrând aceeași etichetare pe partea de Cu a probei de DLC/Cu (pentru orificiile substratului). Etichetarea zonelor autosuspendate de pe partea de DLC a probei de DLC/Cu este aceeași ca a orificiilor substratului.

Caracterizarea prin microscopie optică pe partea de Cu a probelor a fost efectuată după etapa de curățare în acetonă (îndepărtarea fotorezistului nedevolpat) [17]. După corodarea substratului, filmul de DLC a devenit vizibil pe orificiile apărute în urma corodării, devenind autosuspendat în zonele acestora. De asemenea, a fost măsurată dimensiunea medie a fiecărui orificiu complet corodat (media valorilor dimensiunilor măsurate pentru orificiul respectiv). În ceea ce privește morfologia, pe suprafața dinspre substrat a zonei autosuspendate, au fost observate striații la fel ca cele de pe substrat. Acest lucru se explică prin transferul morfologiei substratului de Cu către filmul de DLC, la interfața acestora.

Dimensiunea zonei autosuspendate a filmului de DLC este egală cu cea a orificiului corespunzător de pe substratul de Cu corodat.

Statistica privind dimensiunile medii au fost obținute cu Excel (minimul de 472 μm , maximul de 1989 μm , media de 1035 μm , STD de 294 μm și raportul STD per medie de 28%) [18].

Dimensiunea medie a tuturor zonelor autosuspendate obținute a fost apropiată de valoarea diametrului orificiilor măștii UV (1 mm).

Microscopia optică la o magnificare de 50X pe partea dinspre substrat a zonelor autosuspendate relevă faptul că morfologia substratului (striațiile) a fost transferată pe filmul de DLC. Sunt prezente impurități/urme, având ca surse posibile stratul de fotorezist, resturile de substrat de Cu incomplet corodat și baia de soluție de FeCl_3 [18]. În general, zonele plate se întind pe arii de $5 \times 10^2 \div 5 \times 10^4 \mu\text{m}^2$, însemnând porțiunile bine focalizate din imaginile microscopice ale suprafețelor.

Au fost determinate ratele de corodare completă a orificiilor din substratul de Cu, ratele de supraviețuire a zonelor autosuspendate de DLC și ratele combinate (combinația acestor două rate prin înmulțire), până la investigația prin microscopie optică care a fost efectuată în maximum o zi de la corodare. Rata combinată pentru grupe de probe (loturi) și pentru toate probele (global) a fost de 53% pentru B, 88% pentru E, 68% pentru F și 61% global.

Profilometria optică a fost utilizată pentru a achiziționa și nivela profilogramele 3D, precum și pentru a determina rugozitatea S_q a filmului autosuspendat pe suprafața inferioară (partea dinspre substrat), după îndepărtarea fotorezistului nedezvoltat, în modul confocal pe o arie de scanare de $175,44 \times 132,10 \mu\text{m}^2$.

A fost efectuată statistica rugozității 3D (S_q) din profilogramele obținute pe suprafața inferioară a filmului DLC autosuspendat. Media, STD și raportul STD per medie au fost calculate pe zonele autosuspendate de DLC. Pentru grupe de probe (loturi) și pentru toate probele (global) s-au determinat următoarele valori: $S_{q(\text{average})}=1,5 \mu\text{m}$, $STD=0,7 \mu\text{m}$ și $STD/S_{q(\text{average})}=49,2\%$ pentru B, $S_{q(\text{average})}=1,6 \mu\text{m}$, $STD=0,5 \mu\text{m}$ și $STD/S_{q(\text{average})}=32,3\%$ pentru E, $S_{q(\text{average})}=1,2 \mu\text{m}$, $STD=0,8 \mu\text{m}$ și $STD/S_{q(\text{average})}=64,2\%$ pentru F, și $S_{q(\text{average})}=1,4 \mu\text{m}$, $STD=0,7 \mu\text{m}$ și $STD/S_{q(\text{average})}=48,9\%$ global.

Prelucrarea de date în Gwyddion a profilogramelor 3D obținute pe suprafața inferioară a filmului de DLC autosuspendat a fost utilizată pentru a verifica dacă rugozitatea se situează sub limita de $\lambda/10 \approx 81 \text{ nm}$. Pentru această prelucrare a fost selectată câte o zonă autosuspendată pentru fiecare lot. Pentru fiecare zonă selectată, din profilograma 3D brută (înclinată) au fost extrase 3 profile-linie cu o lungime de $\sim 100 \mu\text{m}$ [18]. Aceste profile-linie brute au fost prelucrate cu *software*-ul pentru a se nivela prin scădere cu dreapta de fitare, urmând apoi calculul rugozității 2D (R_q) [18].

Media rugozității R_q pentru fiecare lot [18] și globală a fost calculată ca fiind de 790 nm pentru B, 706 nm pentru C, 419 nm pentru E, 763 nm pentru F, și 669 nm global.

Media globală a R_q este mai mare decât limita de $\lambda/10 \approx 81 \text{ nm}$ (limita superioară a rugozității pe zone cu dimensiuni care acoperă domeniul diametrelor tuturor spoturilor de focalizare HPL utilizate; diametrul minim teoretic al spotului de focalizare este $1,2 \cdot \lambda \approx 1 \mu\text{m}$).

Striațiile substratului explică aceste valori ridicate ale rugozității R_q . Deoarece morfologia substratului este transferată pe suprafața inferioară a DLC autosuspendat, va fi necesară polisarea substratului pentru ca striatiile de pe DLC să dispară și pentru a reduce rugozitatea R_q .

Pentru fabricarea ansamblului de țintă dublă (Figura 4.1), au fost utilizate câteva etape constând în fixarea foliei de Al, fixarea stivei de distanțiere, tăierea și fixarea probelor de DLC/Cu, obținându-se structura schițată în Figura 4.2 [18].

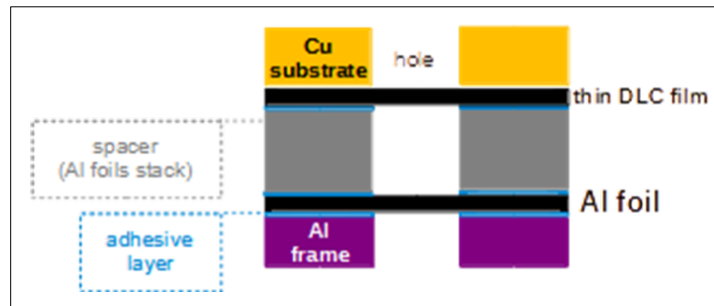


Figura 4.2: Schiță pentru ansamblul de țintă dublă

Fiecare fragment tăiat din proba de DLC/Cu are o singură zonă autosuspendată de DLC utilizabilă în ansamblul țintă pentru HPL. Doar patru din zonele autosuspendate de DLC supraviețuitoare ale unei probe de DLC/Cu corodate sunt utilizabile, indiferent de câte astfel de zone are proba în plus față de cele patru. Au fost fabricate ansambluri de ținte duble pentru a fi utilizate în experimentele cu HPL. Aceste ansambluri au fost construite folosind folie de Al cu grosimea de 15 μm ca țintă propriu-zisă, distanțiere cu grosimea de 15 μm , 30 μm și 45 μm , și film de DLC de 42 nm și 67 nm [18].

Capitolul 5

Filme autosuspendate din DLC pe substraturi de Cu polisate corodate prin litografie UV. Asamblare de ținte

Acest capitol descrie experimentele referitoare la filmele de DLC autosuspendate pe substraturi de Cu polisate, corodate prin litografie UV și utilizate în fabricarea țintelor. Activitatea de cercetare a vizat obținerea de filme de DLC autosuspendate pe substraturi care pot fi montate pe suporturi metalice, spre a fi utilizate în experimente de accelerare cu laser a ionilor de C și/sau protoni.

Filmele de DLC au fost autosuspendate pe substraturi de Cu corodate care ulterior au fost montate utilizând un strat de adeziv de PMMA pe suporturi metalice, obținându-se astfel ansambluri de ținte simple de DLC.

Ansamblul de țintă simplă (Figura 5.1) [17] a constat dintr-o probă de DLC/Cu corodată (film de DLC depus anterior pe un substrat de Cu și, pe care, ulterior s-a transferat un model de zone autosuspendate) și montată pe un suport de Al, prevăzut cu perforații, prin lipire pe partea de DLC, astfel încât orificiul substratului de Cu să fie aliniat cu o perforație a suportului.

În acest caz, filmul de DLC este ținta propriu-zisă, suprafața filmului care a fost în contact cu substratul corodat devenind suprafața frontală în raport cu incidența pulsului HPL, iar cea opusă devenind suprafața posterioară. Într-un astfel de experiment, sunt accelerați ionii de C și H. Ionii de C provin în principal din filmul de DLC și, de asemenea, din impuritățile de pe suprafața posterioară. Ionii de H provin, de asemenea, din

impuritățile posterioare, dar și din compoziția reziduală a filmului de DLC. Impuritățile constau în H_2O și compuși C_xH_y (hidrocarburi) adsorbiți din aer sau rămași pe suprafața țintelor după etapele de fabricație [41], care se disociază în elemente chimice în timpul apariției preplasmă din ținta de film solid ca urmare a incidenței prepulsului laser. Astfel, speciile de ioni din preplasmă se vor regăsi în fluxul ionic de energie înaltă emis la incidența pulsului laser principal ca urmare a procesului de accelerare pe care îl generează.

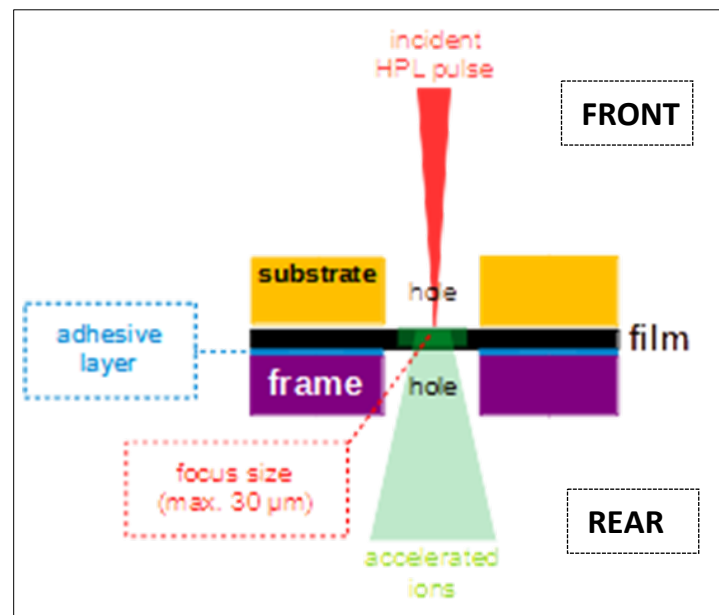


Figure 5.1: Schiță pentru ansamblul de țintă simplă în experimentul de accelerare (vedere transversală)

În acest capitol este prezentată și discutată fabricarea și caracterizarea țintelor HPL care implică altă serie de probe de DLC/Cu, care dispun de substraturi de Cu polisate, parcurgând subiectele de mai jos:

- pregătirea substraturilor de Cu (debitare, aplatizare, polisare, montare mască de depunere, curățare);
- creșterea filmelor de DLC pe substraturi de Cu (obținerea probelor de DLC/Cu);
- corodarea substraturilor de Cu în baie de soluție apoasă de $FeCl_3$;
- caracterizare (determinarea grosimii, microscopie optică, profilometrie optică, EDX);
- integrarea probelor de DLC/Cu pe suportul metalic;
- rezultatele accelerării cu HPL a ionilor de carbon și protoni folosind acest ansamblu de ținte.

Anterior depunerii filmelor de DLC, substraturile de Cu au fost pregătite în același mod descris anterior în Capitolul 4, dar după decuparea din folia de Cu de format A4 s-a aplicat polisarea mecanică pe suprafața destinată depunerii de DLC și s-au efectuat etape suplimentare de pregătire înainte de montarea ramelor de depunere. Polisarea a constat în pregătirea și fixarea substraturilor de Cu pe discul metalic de polisare, uscarea și întărirea

adezivului folosit, polisarea mecanică propriu-zisă, curățarea și uscarea substraturilor polisate de pe disc, acoperirea suprafețelor (substraturilor) bine polisate de pe disc cu un strat protector, precum și detașarea și uscarea substraturilor polisate de pe disc [16] [17].

După operația de polisare, s-a procedat la îndepărtarea stratului protector și la curățarea substraturilor înainte de montarea ramelor de depunere [16] [17].

După montarea ramelor de depunere, pe suprafața polisată a substraturilor de Cu s-au depus filme de DLC [16] și s-a aplicat metoda înălțimii treptelor, la INFLPR, după cum este descris în Capitolul 4, cu excepția faptului că alte valori pentru grosime au fost obținute și determinate. Au fost produse loturi de câte șase probe de DLC/Cu având aceeași grosime a filmului de DLC, pentru fiecare lot utilizându-se un proces de creștere separat. Pentru această serie, denumirea probei este alcătuită din denumirea lotului urmată de *underscore* și de o literă de la „a” la „f”.

Grosimile determinate ale filmelor de DLC au fost după cum urmează: 10 nm pentru lotul 10_nm, 21 nm pentru lotul 21_nm, 54 nm pentru lotul 54_nm, 100 nm pentru loturile 100_nm_I și 100_nm_II, 120 nm pentru lotul 120_nm, 178 nm pentru lotul 178_nm, 380 nm pentru lotul 380_nm, și 570 nm pentru lotul 570_nm.

Pe probele de DLC/Cu din seria menționată anterior s-a efectuat corodarea pe bază de model, după demontarea ramelor de depunere. În principiu, această etapă de fabricație a fost aceeași ca în cazul seriei de probe din Capitolul 4 (substraturi nepolysate), diferența constând în duratele implicate ale unora dintre pași și în repetarea pulverizării, uscării și întăririi termice a stratului de fotorezist în cazul în care acest lucru a fost necesar [16] [17].

Etichetarea orificiilor măștii și ale substratului corodat, precum și a zonelor autosuspendate a fost, de asemenea, menținută ca pentru seria de probe nepolysate prezentată în Capitolul 4.

Caracterizarea prin microscopie optică a probelor pe partea de Cu a fost realizată după clătirea cu acetonă (îndepărtarea fotorezistului) [17]. După procesul de corodare a substratului, filmul de DLC a devenit vizibil pe orificiile complet corodate, devenind autosuspendat. De asemenea, a fost măsurată dimensiunea medie a fiecărui orificiu complet corodat (media valorilor dimensiunilor măsurate pe orificiul respectiv) [16]. În ceea ce privește morfologia, pe suprafața autosuspendată a filmului de DLC, pe partea substratului, lipsesc striațiile care au fost observate pe aceeași parte la probele de DLC/Cu nepolysate, morfologia fără striații a substraturilor de Cu polysate fiind transferată filmelor de DLC la interfața cu acestea.

Dimensiunea zonei autosuspendate a filmului de DLC este egală cu cea a orificiului corespunzător de pe substratul de Cu corodat.

Statistica privind dimensiunile medii au fost obținute cu Excel (minimul de 667 μm , maximul de 2318 μm , media de 1138 μm , STD de 402 μm și raportul STD per medie de 35%).

Dimensiunea medie a tuturor zonelor autosuspendate obținute a fost apropiată de valoarea diametrului orificiilor măștii UV (1 mm).

Microscopia optică la magnificarea de 50X pe partea dinspre substrat a zonelor autosuspendate relevă faptul că morfologia substratului a fost transferată pe filmul de DLC. Striațiile observate precedent pe substraturile nepolysate nu mai sunt prezente. Se

evidențiază diverse impurități/urme, având ca surse potențiale acoperirea de fotorezist, corodarea incompletă a substratului care generează defecte micrometrice ce constau în formațiuni de Cu rămase pe suprafața inferioară a DLC autosuspendat, precum și agentul de corodare a substratului. În general, zonele plate se întind pe arii de $5 \times 10^2 \div 5 \times 10^4 \mu\text{m}^2$, însemnând porțiunile bine focalizate din imaginile microscopice ale suprafețelor.

Au fost determinate ratele de corodare completă a orificiilor din substratul de Cu, ratele de supraviețuire a zonelor autosuspendate de DLC și ratele combinate (combinația acestor două rate prin înmulțire), până la investigația prin microscopie optică care a fost efectuată în maximum o zi de la corodare. Rata combinată pentru grupe de probe (loturi) și pentru toate probele (global) a fost de 15% pentru 54_nm, 93% pentru 380_nm, 58% pentru 570_nm, și 63% global.

Profilometria optică a fost utilizată pentru a achiziționa și nivela profilogramele 3D, precum și pentru a determina rugozitatea S_q a filmului autosuspendat pe suprafața inferioară (partea dinspre substrat) și superioară (partea opusă), precum și a filmului non-autosuspendat, după îndepărtarea fotorezistului nedezvoltat, în modul confocal pe o arie de scanare de $116.96 \times 88.06 \mu\text{m}^2$. Incidența pulsului HPL are loc pe suprafața inferioară, fiind astfel partea frontală a țintei.

Statistica rugozității 3D (S_q) pe baza profilogramelor achiziționate pe suprafețele inferioară și superioară ale zonelor autosuspendate, precum și pe zonele non-autosuspendate ale filmelor de DLC, a generat media, STD și raportul STD per medie. Pentru lotul 54_nm, pe suprafața inferioară s-a găsit $S_{q(\text{average})}=0.9 \mu\text{m}$, $STD=0.6 \mu\text{m}$ și $STD/S_{q(\text{average})}=71.9\%$, pe suprafața superioară s-a găsit $S_{q(\text{average})}=0.8 \mu\text{m}$, $STD=0.5 \mu\text{m}$ și $STD/S_{q(\text{average})}=58.9\%$, iar pe zona non-autosuspendată $S_{q(\text{average})}=48 \text{ nm}$, $STD=28 \text{ nm}$ și $STD/S_{q(\text{average})}=58\%$. Pe regiuni întinse, rugozitatea 3D pentru zona autosuspendată depășește pragul de $\lambda/10$, în timp ce pentru zona non-autosuspendată se încadrează sub prag. Prin urmare, filmul de DLC propriu-zis îndeplinește această cerință de încadrare, pe substraturile de Cu polisate, chiar și pe regiuni întinse, iar depășirea pragului pe zona autosuspendată are loc doar pentru regiuni întinse, nu și pentru regiuni reduse (comparabile cu dimensiunile spoturilor de focalizare a HPL) după cum se va arăta mai jos.

Prelucrarea de date în Gwyddion a profilogramelor 3D obținute pe suprafața inferioară a filmului de DLC autosuspendat a fost utilizată pentru a verifica dacă rugozitatea se situează sub limita de $\lambda/10 \approx 81 \text{ nm}$. Pentru această prelucrare a fost selectată câte o zonă autosuspendată pentru fiecare lot. Pentru fiecare zonă selectată, din profilograma 3D brută (înclinată) au fost extrase 12 profile-linie cu o lungime de $\sim 30 \mu\text{m}$ și $\sim 90 \div 110 \mu\text{m}$ din profilogramele brute (înclinate) ale acestora [16] [17]. Aceste profile-linie brute au fost prelucrate cu *software*-ul pentru a se nivela prin scădere cu dreapta de fitare, urmând apoi calculul rugozității 2D (R_q).

Media rugozității R_q pentru fiecare lot și globală a fost calculată ca fiind de 79 nm pentru 54_nm, 73 nm pentru 380_nm, și 76 nm global. Valorile măsurate sunt mai mici sau egale cu limita de $\lambda/10=81 \text{ nm}$ în proporție de 67%÷75%, unde $\lambda=810 \text{ nm}$ pentru sistemul HPL al ELI-NP, fiind limita maximă admisă a rugozității pe zone cu mărimi ce acoperă diametrele spoturilor HPL utilizate (diametrul minim teoretic al spoturilor laser este $1.2 \cdot \lambda \approx 1 \mu\text{m}$ pentru lungimea de undă dată) [16]. R_q mediu global (76 nm) este mai

mic decât limita de $\lambda/10$. Lipsa striatiilor de pe substrat explică aceste valori ale R_q îmbunătățite. Deoarece morfologia substratului este transferată pe suprafața inferioară a zonei DLC autosuspendate, rezultă că polisarea substratului a eliminat striatiile și a condus la reducerea R_q sub $\lambda/10$ pe majoritatea profilelor de pe suprafața inferioară a filmului autosuspendat.

Investigația EDX a fost utilizată pentru suprafețele inferioară [16] [17] și superioară a zonei autosuspendate a filmului DLC de 380 nm grosime (analiză chimică elementală). Este important de observat că agentul de corodare a substratului nu este în contact cu suprafața superioară a zonei autosuspendate datorită izolării de către fotorezist, ci cu suprafața inferioară deoarece substratul este îndepărtat până la filmul de DLC. Urmele de Fe și Cu de pe suprafața inferioară sunt în cantități mici, acceptabile pentru accelerarea prin mecanismul TNSA unde fluxurile de ioni/protoni sunt furnizate de stratul superior al filmului (incluzând urmele de C_xH_y și H_2O adsorbite din aer) [16] [18] care este extrem de curat în privința acestor elemente. Straturile inferior și de mijloc furnizează electroni energetici ce străbat filmul spre suprafața superioară după care îl părăsesc inițiind accelerarea în urma separării de sarcină [9] [20], fără să fie emis flux de ioni de Fe/Cu după cum relevă experimentul cu HPL în care filmul DLC a fost utilizat [16] (Figure 5.3). Așadar, este mai puțin important din ce specie atomică provin electronii energetici menționați. În schimb, acest nivel scăzut de importanță este din ce în ce mai puțin aplicabil odată cu scăderea grosimii, pentru regimul TNSA, soluția de creștere a purității constând în mai multe cicluri de clătire finală a probelor de DLC/Cu cu precauție extremă pentru a evita ruperea zonelor autosuspendate. Este indicat să se mențină un echilibru între rata de supraviețuire și curățarea finală prin clătire, luând în calcul condițiile de apariție a TNSA și grosimea filmului.

În vederea fabricării ansamblului de țintă simplă (Figure 5.1), s-au efectuat tăierea și fixarea probelor de DLC/Cu [16], obținându-se structura schițată în Figure 5.2 de mai jos [17].

Disponibilitatea de utilizare a maximum patru zone autosuspendate ale unei probe de DLC/Cu este, de asemenea, aplicabilă pentru acest ansamblu.

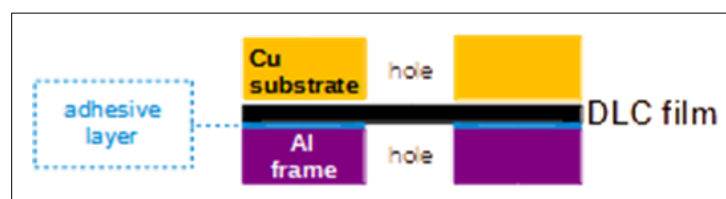


Figure 5.2: Schiță pentru ansamblul de țintă simplă

Ansambluri de ținte simple au fost fabricate în vederea utilizării în campania de comisionare a zonei experimentale E5 din cadrul ELI-NP din perioada iulie-octombrie 2021, la accelerarea de ioni de C și H utilizând filme de DLC. Aceste ansambluri au fost construite cu filme de DLC având grosimi de 380 nm și 570 nm, care și-au demonstrat utilizabilitatea (fără contaminare cu adeziv la montare și fără a se rupe) în proporție de peste jumătate după mai multe zile de la asamblare.

Cu toate acestea, astfel de ținte necesită în continuare o manipulare atentă până la montarea suportului metalic în camera de interacție HPL pentru a preveni deteriorarea filmelor autosuspendate de DLC, iar rata de supraviețuire ar trebui să crească dacă montarea finală este făcută după un număr de zile cât mai mic de la finalizarea fabricării țintei.

Două dintre aceste ținte fabricate au fost utilizate în campania de comisionare din cadrul ELI-NP pentru accelerarea ionilor de C/H prin mecanismul TNSA [16]. Experimentul de accelerare [47] a obținut rezultatele prezentate în [Figure 5.3](#) utilizând un ansamblu de țintă simplă cu grosimea filmului DLC de 380 nm. Energia pulsului laser a fost $E_{HPL}=19$ J înainte de reflexia pe oglinda de plasmă utilizată. Fluxurile de ioni de C și protoni accelerați sunt reprezentate în spectru în funcție de energia cinetică. Valorile de energie începând cu care fluxurile devin nedetectabile (energia de tăiere) au fost ~180 MeV pentru ionii de carbon și ~38 MeV pentru protoni.

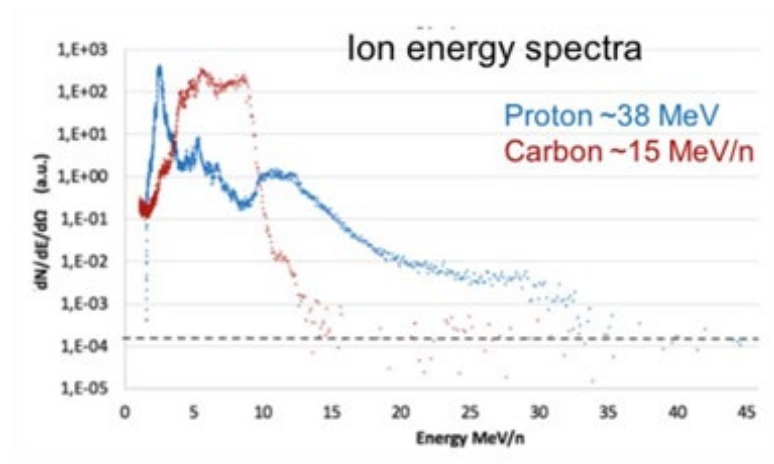


Figure 5.3: Rezultat al experimentului de accelerare din campania de comisionare, pentru un film DLC de 380 nm grosime; figură preluată din referința bibliografică [47]

Capitolul 6

Concluzii

Corodarea pe bază de model a substratului de cupru, care utilizează litografia UV, are o precizie acceptabilă în raport cu configurația proiectată a orificiilor, în ceea ce privește aplicabilitatea pentru ținte în experimente cu HPL. Filmele de DLC autosuspendate au avut o rată de realizare mai mare de jumătate, având în vedere întregul proces de corodare. Filmele de DLC autosuspendate supraviețuiesc după întregul proces de corodare de substrat cu model, în timpul microscopiei optice și, fără pierderi considerabile, până la profilometria optică.

În general, orificiile substratului corodat sunt ușor mai mari pe partea de Cu a probei decât pe partea de DLC, datorită izotropiei coroziunii chimice care îndepărtează materialul substratului cu aceeași viteză de corodare pe toate direcțiile. Dimensiunea orificiilor pe partea frontală (partea de Cu) nu este mai mică decât pe partea de DLC, altminteri s-ar fi putut ajunge la o incidență nedorită a pulsului HPL pe substrat în loc de filmul țintă în timpul interacțiunii, alinierea finală a țintei în planul de focalizare al HPL fiind realizată cu un instrument optic din partea posterioară a țintei (partea de DLC), nefiind astfel vizibilă partea frontală.

Proporția de filme de DLC autosuspendate obținute este mai mare de jumătate, luând în considerare întregul proces de corodare, și este menținută cel puțin în timpul microscopiei optice. Aceste rate de supraviețuire relevă importanța unui conținut mai mare de sp^3 C în filmul de DLC pentru a îmbunătăți comportamentul mecanic (rezistență mai mare la tracțiune și forfecare) care susține un astfel de nivel de realizare. Nu în ultimul rând, această legătură chimico-mecanică se reflectă și în utilizabilitatea a cel puțin jumătate din ansamblurile de ținte simple după un număr suficient de zile de la montarea lor.

Pentru majoritatea profilelor-linie de pe filmul de DLC autosuspendat, pe partea frontală, rugozitatea R_q este mai mică sau egală cu limita $\lambda/10=81$ nm. Rugozitatea S_q a

filmului autosuspendat (partea frontală) pe suprafețe mari este mai mare decât limita de $\lambda/10$, atât pentru DLC pe substraturi nepoliate, cât și pe substraturi poliate, din cauza încrețirii filmului pe regiuni mai mari decât dimensiunile spoturilor de focalizare a pulsurilor HPL. Astfel, încrețirea nu afectează utilizarea filmelor ca ținte în experimentele cu HPL datorită prezenței acestora pe zone mai mari decât spoturile laser. Încrețiturile pot fi cauzate de reducerea stresului mecanic după corodarea substratului. Acest stres mecanic intern este cauzat de dilatarea termică diferită a DLC față de Cu, în timpul procesului PECVD în care plasma formată încălzește ambele materiale la o temperatură mai mare decât cea din laborator. O altă explicație poate fi deformarea filmului autosuspendat în timpul curățării finale a probei de DLC/Cu corodate. Având în vedere cele de mai sus, filmele de DLC autosuspendate produse în timpul cercetării efectuate pentru această teză au demonstrat potențialul de a fi utilizate ca ținte pentru HPL.

Cercetările efectuate în cadrul acestei teze au îndeplinit obiectivul propus de a dezvolta ținte optimizate pentru accelerarea indusă laser a ionilor de carbon și a protonilor, utilizând metode de fabricație care necesită resurse reduse. Acest deziderat a presupus filme subțiri cu *aspect ratio* ridicat, cu limita superioară de rugozitate $\lambda/10$ în zona spotului laser și cu o rezistență mecanică bună, care să poată fi realizate printr-un lanț de fabricație accesibil, pentru a putea fi implementat *on-site* în cadrul amplasamentului sistemului HPL.

Rezultatele obținute constau în metode de fabricație, ținte pentru HPL și măsurători ale energiei ionilor accelerați din țintele fabricate. Metodele de fabricare constau într-o metodă de depunere de film DLC prin PECVD pentru creșterea de filme subțiri de zeci și sute de nanometri, inclusiv o metodă de polisare a substratului de Cu, o metodă de litografie UV pentru obținerea de filme DLC autosuspendate și o metodă de montare a filmului DLC pe suportul de ținte. Țintele constau în structuri mono/bi-straturi care implică filme DLC autosuspendate pe substraturi de Cu corodate. Măsurătorile privind accelerarea ionilor constau în spectrele de energie ale ionilor de carbon și ale protonilor.

Cercetarea efectuată contribuie la evoluția domeniului HPL prin furnizarea unei metode facile de fabricare a țintelor subțiri fără micro/nanostructură pentru accelerarea ionilor de carbon și a protonilor cu pulsuri laser de putere mai mică sau egală cu 1 PW.

Accesibilitatea metodei de fabricație se bazează pe două fapte. În primul rând, ruta chimică de obținere de filme autosuspendate (corodare de substrat în mediu lichid) conferă accesibilitate metodei prin utilizarea unor reactivi și instrumente de laborator destul de comune. În al doilea rând, îmbunătățirea rugozității substraturilor prin prelucrare mecanică pe o mașină de polisat, proces utilizat pe scară largă, permite folosirea de materii prime cu rugozitate ridicată, cum ar fi foi metalice disponibile în comerț.

Procesul PECVD a fost optimizat în ceea ce privește stoichiometria carbon-hidrogen a amestecului precursor, pentru a obține filme subțiri de DLC care să îndeplinească raporturile de hibridizare a carbonului implicate de cerințele experimentelor de accelerare cu laser desfășurate în cadrul ELI-NP.

A fost dezvoltată o metodă de montare a structurilor de DLC/Cu, având filme autosuspendate, pe suporturi metalice pentru a pregăti ansamblurile de ținte pentru

experimentele cu pulsuri laser de mare putere efectuate utilizând sistemul laser din dotarea ELI-NP.

Lista publicațiilor/lucrărilor originale și a proiectelor este prezentată mai jos:

1) Articole publicate în reviste (**prim autor**):

- **L. Dincă**, C. Jalbă, B. Diaconescu, B. Mitu, „Free-standing carbon targets for enhanced carbon ion acceleration with petawatt class lasers”, *U.P.B. Scientific Bulletin - Series A*, Vol. 85, Issue 4, 2023, ISSN 1223-7027, https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rez1a1_218560.pdf;
- **L. Dincă**, C. Jalbă, B. Diaconescu, M. Cernăianu, P. Ghenuche, B. Mitu, T. Asavei, F. Rotaru, „The challenges of using double targets as a novel contrast-enhancement method for laser-driven acceleration”, *U.P.B. Scientific Bulletin - Series A*, Vol. 86, Issue 1, 2024, ISSN 1223-7027, https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rez32b_567280.pdf.

2) Articole publicate în reviste (**coautor**):

- A. Magureanu, **L. Dinca**, C. Jalba, R. F. Andrei, I. Burducea, D. G. Ghita, V. Nastasa, M. Gugiu, T. Asavei, O. Budriga, D. Ticos, V. Craciun, B. Diaconescu, C. M. Ticos, „Target characteristics used in laser-plasma acceleration of protons based on the TNSA mechanism”, *Frontiers in Physics, Sec. Interdisciplinary Physics*, Vol. 10, 2022, <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.727718>;
- C. Jalbă, **L. Dincă**, N. Djourellov, C. Ticoș, A. Măgureanu, B. Diaconescu, „The importance of chemical shift screening of the precursors for increasing the exfoliation efficiency of the graphite layers”, *U.P.B. Scientific Bulletin - Series A*, Vol. 85, Issue 3, 2023, ISSN 1223-7027, https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rez72e_153904.pdf.

3) Prezentări orale (**prim autor**):

- **L. C. Dinca**, „Carbonic thin films as targets for high-power laser beams”, *ELI-NP Young Researchers' Competition 2018* (ELI-NP, Măgurele, România, Noiembrie 28-29, 2018);
- **L. Dinca**, B. Diaconescu, V. Sătulu, V. Mărăscu, B. Mitu, C. Gheorghiu, „Thin films for laser-driven acceleration of carbon ions”, *SDIALA Educational Session 2018-2019* (România, Măgurele, Aprilie 18, 2019).

4) Prezentări de postere (**prim autor**):

- **L. Dinca**, B. Diaconescu, C. Gheorghiu, „Characterization methods of ferrofluids usable in plasma mirror applications”, *Nuclear Photonics 2018* (Brașov, România, Iunie 24-29, 2018);

- **L. Dinca**, B. Diaconescu, V. Satulu, V. Marascu, C. Gheorghiu, B. Mitu, „Carbon-based thin films for high-power laser applications”, *XVIIIth International Conference on Plasma Physics and Applications* (Iași, România, Iunie 20-22, 2019);
- **L. Dinca**, B. Diaconescu, B. Mitu, V. Satulu, „Fabrication and characterization methods of carbon thin films for high-power laser applications”, *ELI-NP Summer School 2019* (Sinaia, România, Septembrie 9-13, 2019);
- **L. Dinca**, C. Jalba, B. Diaconescu, B. Mitu, „Free-standing carbon targets for commissioning experiments at ELI-NP”, *International Conference on Laser, Plasma and Radiation – Science and Technology 2022* (București, România, Iunie 7-10, 2022).

5) Rapoarte de activitate ELI-NP:

- C. Gheorghiu, A. Ionescu, **L. Dinca**, A. Serban, V. Ene, I. Zai, D. Popa, V. Leca, „The ELI-NP Target Laboratory, research program and preliminary targets”, *ELI-NP RA3 Scientific & Technical Reports 2018-2019* (ELI-NP internal use only);
- Cernaianu M. O., Ghenuche P. V., Rotaru F., Asavei T., Balascuta S., Chalus O., Dancus I., Diaconescu C. B., **Dinca L.**, Dreghici D. B., Ghita D. G., Gugiu M. M., Jalba C., Lupu A. M., Magureanu A., Matei D. G., Nastasa V. V., Negoita F., Popescu D., Soderstrom P. A., Tataru M., Tanaka K. A., Ticos C. M., Tomassini P., Tudor L., Ur C. A., Doria D., „Commissioning of the 1 PW experimental area with an experiment on TNSA ion acceleration”, *ELI-NP Annual Report 2020-2021*, https://www.eli-np.ro/documents/ELI-NP-Annual_Report-2020-2021.pdf.

6) Proiect în cadrul căruia studentul-doctorand a lucrat:

- ELI-NP faza II, cofinanțat de Guvernul României și de Uniunea Europeană prin Fondul European de Dezvoltare Regională – Programul Operațional Competitivitate (contract nr. 1/07.07.2016, COP, ID 1334).

Lanțul de fabricație dezvoltat în cadrul acestei lucrări de cercetare prezintă interes pentru testarea extinderii pe viitor la filme autosuspendate de DLC cu suprafețe mai mari, potrivite pentru utilizări ca oglinzi de plasmă. Astfel de structuri necesită deschideri laterale cu diametre de cel puțin 10 mm din cauza dimensiunii spotului laser la câțiva centimetri anterior planului de focalizare. O problemă importantă în acest caz constă în încrețirea filmului autosuspendat care duce la deformarea frontului de undă al pulsului HPL incident și, în consecință, a formei spotului de focalizare, cu efecte negative potențiale asupra procesului de accelerare [16], topografia de suprafață a oglinzii de plasmă în starea solidă inițială fiind preluată și în starea finală de plasmă între momentele de incidență a prepulsului și a pulsului principal [48]. O propunere viabilă de rezolvare a acestei probleme este răcirea suportului de substraturi din instalația de PECVD pentru a menține pe substrat, în timpul procesului exoterm de depunere de DLC, temperatura

ambientală prezentă în toate etapele ulterioare din lanțul de fabricare-utilizare de dinaintea incidenței pulsului HPL. Această procedură ar trebui să prevină deformările termice inegale ale substratului și ale filmului în timpul încălzirii cauzate de PECVD și în timpul răcirii la temperatura camerei după PECVD.

O altă dezvoltare viitoare constă în extinderea la alte tipuri de filme pe bază de carbon, având în vedere aceleași obiective din această teză și păstrând etapele care implică prelucrarea substratului de Cu. O provocare importantă a unei astfel de dezvoltări ulterioare este realizarea de filme ultra-subțiri autosuspendate, adecvate pentru a iniția mecanismul RPA în vederea generării de fascicule de ioni de carbon de înaltă energie cvasi-monoenergetice, intense și colimate, utilizând o putere laser de 10 PW disponibilă la ELI-NP. Ca fapt semnificativ, aceste surse de ioni prezintă potențialul de a pune la dispoziția hadron-terapiei energiile per nucleon necesare unei eficiențe ridicate a distrugerii țesutului tumoral în aplicațiile oncologice.

Bibliografie

- [1] M. Pessot, P. Maine and G. Mourou, "1000 times expansion/compression of optical pulses for chirped pulse amplification," *Optics Communications*, vol. 62, pp. 419-421, 1987.
- [2] J. W. Yoon, C. Jeon, J. Shin, S. K. Lee, H. W. Lee, I. W. Choi, H. T. Kim, J. H. Sung and C. H. Nam, "Achieving the laser intensity of 5.5×10^{22} W/cm² with a wavefront-corrected multi-PW laser," *Opt. Express*, vol. 27, p. 20412–20420, Iulie 2019.
- [3] C. Scullion, D. Doria, L. Romagnani, A. Sgattoni, K. Naughton, D. R. Symes, P. McKenna, A. Macchi, M. Zepf, S. Kar and M. Borghesi, "Polarization dependence of bulk ion acceleration from ultrathin foils irradiated by high-intensity ultrashort laser pulses," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 119, no. 5, p. 054801, August 2017.
- [4] J. Badziak, "Laser-driven ion acceleration: Methods, challenges and prospects," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 959, p. 012001, Ianuarie 2018.
- [5] B. M. Hegelich, B. J. Albright, J. Cobble, K. Flippo, S. Letzring, M. Paffett, H. Ruhl, J. Schreiber, R. K. Schulze and J. C. Fernández, "Laser acceleration of quasi-monoenergetic MeV ion beams," *Nature*, vol. 439, p. 441–444, Ianuarie 2006.
- [6] S. S. Bulanov, C. B. Schroeder, E. Esarey and W. P. Leemans, "Optimized laser pulse profile for efficient radiation pressure acceleration of ions," *Physics of Plasmas*, vol. 19, p. 093112, 2012.
- [7] A. Higginson, R. J. Gray, M. King, R. J. Dance, S. D. R. Williamson, N. M. H. Butler, R. Wilson, R. Capdessus, C. Armstrong, J. S. Green, S. J. Hawkes, P. Martin, W. Q. Wei, S. R. Mirfayzi, X. H. Yuan, S. Kar, M. Borghesi, R. J. Clarke, D. Neely and P. McKenna, "Near-100 MeV protons via a laser-driven transparency-enhanced hybrid acceleration scheme," *Nature Communications*, vol. 9, p. 724, Februarie 2018.
- [8] T. M. Ostermayr, C. Kreuzer, F. S. Englbrecht, J. Gebhard, J. Hartmann, A. Huebl, D. Haffa, P. Hilz, K. Parodi, J. Wenz, M. E. Donovan, G. Dyer, E. Gaul, J. Gordon, M. Martinez, E. Mccary, M. Spinks, G. Tiwari, B. M. Hegelich and J. Schreiber,

- "Laser-driven X-ray and proton micro-source and application to simultaneous single-shot bi-modal radiographic imaging," *Nature Communications*, vol. 11, p. 6174, Decembrie 2020.
- [9] A. Măgureanu, L. Dincă, C. Jalbă, R. F. Andrei, I. Burducea, D. G. Ghiță, V. Nastasa, M. Gugiu, T. Asavei, O. Budrigă, D. Ticoș, V. Crăciun, B. Diaconescu and C. M. Ticoș, "Target characteristics used in laser-plasma acceleration of protons based on the TNSA mechanism," *Frontiers in Physics, Sec. Interdisciplinary Physics*, vol. 10, 2022.
- [10] G. Milluzzo, H. Ahmed, L. Romagnani, D. Doria, P. Chaudhary, C. Maiorino, A. McIlvenny, A. McMurray, K. Polin, Y. Katzir, R. Pattathil, P. McKenna, K. Prise and M. Borghesi, "Dosimetry of laser-accelerated carbon ions for cell irradiation at ultra-high dose rate," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1596, p. 012038, Iulie 2020.
- [11] D. Schardt, "Tumor therapy with high-energy carbon ion beams," *Nuclear Physics A*, vol. 787, pp. 633-641, 2007.
- [12] A. Maksimchuk, S. S. Bulanov, A. Brantov, V. Y. Bychenkov, V. Chvykov, F. Dollar, D. Litzenberg, G. Kalintchenko, T. Matsuoka, S. Reed, V. Yanovsky and K. Krushelnick, "Control of proton energy in ultra-high intensity laser-matter interaction," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 244, p. 042025, August 2010.
- [13] F. T. Thema, P. Beukes, B. D. Ngom, E. Manikandan and M. Maaza, "Free standing diamond-like carbon thin films by PLD for laser based electrons/protons acceleration," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 648, pp. 326-331, 2015.
- [14] B. M. Hegelich, I. Pomerantz, L. Yin, H. C. Wu, D. Jung, B. J. Albright, D. C. Gautier, S. Letzring, S. Palaniyappan, R. Shah, K. Allinger, R. Hörlein, J. Schreiber, D. Habs, J. Blakeney, G. Dyer, L. Fuller, E. Gaul, E. Mccary, A. R. Meadows, C. Wang, T. Ditmire and J. C. Fernandez, "Laser-driven ion acceleration from relativistically transparent nanotargets," *New Journal of Physics*, vol. 15, p. 085015, August 2013.
- [15] M. O. Cernăianu, P. V. Ghenuche, F. Rotaru, T. Asavei, S. Bălășcuță, O. Chalus, I. Dancus, C. B. Diaconescu, L. Dinca, D. B. Dreghici, D. G. Ghiță, M. M. Gugiu, C. Jalba, A. M. Lupu, A. Măgureanu, D. G. Matei, V. V. Nastasa, F. Negoita, D. Popescu, P. A. Söderström, M. Tataru, K. A. Tanaka, C. M. Ticoș, P. Tomassini, L. Tudor, C. A. Ur and D. Doria, "Commissioning of the 1 PW experimental area with an experiment on TNSA ion acceleration," *ELI-NP Annual Report 2020-2021*, p. 91, Iunie 2022, ELI-NP.
- [16] L. Dinca, C. Jalba, B. Diaconescu and B. Mitu, "Free-standing carbon targets for enhanced carbon ion acceleration with Petawatt class lasers," *U.P.B. Scientific Bulletin - Series A*, vol. 85, pp. 171-178, 2023.

- [17] L. Dinca, C. Jalba, B. Diaconescu and B. Mitu, "Free-standing carbon targets for commissioning experiments at ELI-NP," *International Conference on Laser, Plasma and Radiation – Science and Technology 2022*, București, România, Iunie 7-10, 2022.
- [18] L. Dincă, C. Jalbă, B. Diaconescu, M. Cernăianu, P. Ghenuche, B. Mitu, T. Asavei and F. Rotaru, "The challenges of using double targets as a novel contrast-enhancement method for laser-driven acceleration," *U.P.B. Scientific Bulletin - Series A*, vol. 86, 2024.
- [19] J. Park, S. S. Bulanov, J. Bin, Q. Ji, S. Steinke, J.-L. Vay, C. G. R. Geddes, C. B. Schroeder, W. P. Leemans, T. Schenkel and E. Esarey, "Ion acceleration in laser generated Megatesla magnetic vortex," *Physics of Plasmas*, vol. 26, p. 103108, 2019.
- [20] D. Sangwan, O. Culfa, C. P. Ridgers, S. Aogaki, D. Stutman and B. Diaconescu, "Simulations of carbon ion acceleration by 10 PW laser pulses on ELI-NP," *Laser and Particle Beams*, vol. 37, p. 346–353, 2019.
- [21] K. P. Furlan, A. N. Klein and D. Hotza, "Diamond-like carbon films deposited by hydrocarbon plasma sources," *Reviews on Advanced Materials Science*, vol. 34, pp. 165-172, 2013.
- [22] L. Dinca, B. Diaconescu, V. Sătulu, V. Mărăscu, B. Mitu and C. Gheorghiu, "Thin films for laser-driven acceleration of carbon ions," *SDIALA Educational Session 2018-2019*, România, Măgurele, Aprilie 18, 2019.
- [23] L. C. Dinca, "Carbonic thin films as targets for high-power laser beams," *ELI-NP Young Researchers' Competition 2018*, ELI-NP, Măgurele, România, Noiembrie 28-29, 2018.
- [24] H. O. Pierson, "Handbook of carbon, graphite, diamonds and fullerenes - Processing, properties and applications," Ed. William Andrew Publishing, Oxford, 1994, ISBN 978-0-8155-1339-1.
- [25] M. C. Salvadori, D. R. Martins and M. Cattani, "DLC coating roughness as a function of film thickness," *Surface and Coatings Technology*, vol. 200, pp. 5119-5122, 2006.
- [26] F. Garrelie, A. S. Loir, F. Goutaland, C. Donnet, R. L. Harzic, B. Angleraud, Y. Ouerdane and P. Laporte, "Diamond-like carbon deposited by femtosecond pulsed-laser ablation: Evidence of nanocrystalline diamond," in *High-Power Laser Ablation IV*, 2002.
- [27] Y. Jeon, Y. S. Park, H. J. Kim, B. Hong and W. S. Choi, "Tribological properties of ultrathin DLC films with and without metal interlayers," *Journal of Korean Physical Society*, vol. 51, p. 1124–1128, Septembrie 2007.

- [28] L. Dinca, B. Diaconescu, B. Mitu and V. Satulu, "Fabrication and characterization methods of carbon thin films for high-power laser applications," *ELI-NP Summer School 2019*, Sinaia, România, Septembrie 9-13, 2019.
- [29] L. Dinca, B. Diaconescu, V. Satulu, V. Marascu, C. Gheorghiu and B. Mitu, "Carbon-based thin films for high-power laser applications," *XVIIIth International Conference on Plasma Physics and Applications*, Iași, România, Iunie 20-22, 2019.
- [30] N. Pinel, C. Bourlier and J. Saillard, "Degree of roughness of rough layers: Extensions of the Rayleigh roughness criterion and some applications," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 19, pp. 41-63, 2010.
- [31] F. Ulaby, D. Long, W. Blackwell, C. Elachi, A. Fung, C. Ruf, K. Sarabandi, J. Zyl and H. Zebker, "Microwave radar and radiometric remote sensing," Chapter 10: "Surface scattering models and land observations," 2014, ISBN: 978-0-472-11935-6.
- [32] M. Hiratsuka, H. Nakamori, K. O. G. O. Yasuo, M. Sakurai, N. Ohtake and H. Saitoh, "Correlation between optical properties and hardness of diamond-like carbon films," *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, vol. 7, pp. 187-198, 2013.
- [33] M. Cernaianu, "Laser produced plasma optics," *ELI-NP Summer School 2019 - Nuclear Physics with High Power Lasers (Septembrie 9-13, 2019, Sinaia, România)*.
- [34] G. Doumy, F. Quéré, O. Gobert, M. Perdrix, P. Martin, P. Audebert, J. C. Gauthier, J.-P. Geindre and T. Wittmann, "Complete characterization of a plasma mirror for the production of high-contrast ultraintense laser pulses," *Phys. Rev. E*, vol. 69, no. 2, p. 026402, Februarie 2004.
- [35] D. Ursescu, D. Matei, M. Talposi, V. Iancu, V. Aleksandrov, G. Bleotu, A. Naziru, O. Tesileanu, M. Rosu, Y. Nakamiya, M. O. Cernaianu, B. de Boisdeffre, C. Ene, M. Caragea, A. Lazar, M. Kiss, M. Masruri, L. Caratas, A. Toader, D. Nistor, V. Luta, B. Tatulea, D. Popa, N. Stan, T. Jitsuno, R. Banici, A. Baleanu, A. Gradinariu, J. Wheeler, G. Mourou and I. Dancus, "First HPLS experiments at ELI-NP: Spectral broadening in thin films," *ELI-NP Annual Report 2020-2021*, p. 33, Iunie 2022, ELI-NP.
- [36] D. Doria, P. V. Ghenuche, M. O. Cernăianu, P. Tomassini, A. Berceanu, J. F. Ong, N. Safca, A. Măgureanu, M. Talposi, M. Matei, L. Tudor, S. Bălășcuță, M. M. Gugiu, M. Cuciuc, I. Dancus, C. B. Diaconescu, I. O. Mitu, V. V. Nastasa, F. Negoita, V. R. M. Rodrigues, M. M. Rosu, D. Stutman, K. A. Tanaka, C. A. Ur, D. Ursescu, N. V. Zamfir and C. M. Ticoș, "First experiment with a laser-focused beam at ELI-NP: Laser-driven electron acceleration with the 100 TW laser system," *ELI-NP Annual Report 2020-2021*, p. 87, Iunie 2022, ELI-NP.
- [37] C. Gheorghiu, A. Ionescu, L. Dinca, A. Serban, V. Ene, I. Zai, D. Popa and V. Leca, "The ELI-NP Target Laboratory, research program and preliminary targets,"

Scientific & Technical Reports 2018/2019, Vols. Research Activities 3 - Nuclear Physics with High Power Lasers, Part II: Biomedical & Target Laboratory, p. 23–28, 5 Iulie 2019, ELI-NP (ELI-NP internal use only).

- [38] K. E. Spear, "Chemical and energetic aspects of CVD diamond growth," *Preprints of Papers, American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry; USA*, vol. 34:2, Ianuarie 1989.
- [39] J. J. Gracio, Q. H. Fan and J. C. Madaleno, "Diamond growth by chemical vapour deposition," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 43, p. 374017, Septembrie 2010.
- [40] P. S. Banks, L. Dinh, B. C. Stuart, M. D. Feit, A. M. Komashko, A. M. Rubenchik, M. D. Perry and W. McLean, "Short-pulse laser deposition of diamond-like carbon thin films," *Applied Physics A*, vol. 69, p. S347–S353, Decembrie 1999.
- [41] A. Henig, D. Kiefer, K. Markey, D. C. Gautier, K. A. Flippo, S. Letzring, R. P. Johnson, T. Shimada, L. Yin, B. J. Albright, K. J. Bowers, J. C. Fernández, S. G. Rykovanov, H.-C. Wu, M. Zepf, D. Jung, V. K. Liechtenstein, J. Schreiber, D. Habs and B. M. Hegelich, "Enhanced laser-driven ion acceleration in the relativistic transparency regime," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 103, no. 4, p. 045002, Iulie 2009.
- [42] P. K. Bachmann, D. Leers and H. Lydtin, "Towards a general concept of diamond chemical vapour deposition," *Diamond and Related Materials*, vol. 1, pp. 1-12, August 1991.
- [43] P. K. Bachmann and W. van Enckevort, "Diamond deposition technologies," *Diamond and Related Materials*, vol. 1, pp. 1021-1034, 1992.
- [44] J. Díaz, G. Paolicelli, S. Ferrer and F. Comin, "Separation of the sp^3 and sp^2 components in the C1s photoemission spectra of amorphous carbon films," *Phys. Rev. B*, vol. 54, no. 11, p. 8064–8069, Septembrie 1996.
- [45] C. Jalbă, L. Dincă, N. Djourellov, C. Ticoș, A. Măgureanu and B. Diaconescu, "The importance of chemical shift screening of the precursors for increasing the exfoliation efficiency of the graphite layers," *U.P.B. Scientific Bulletin - Series A*, vol. 85, 2023.
- [46] H. Jansen, H. Gardeniers, M. de Boer, M. Elwenspoek and J. Fluitman, "A survey on the reactive ion etching of silicon in microtechnology," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 6, p. 14–28, 1996.
- [47] webpage "E5 experimental room," ELI-NP, <https://users.eli-np.ro/e5.php>.
- [48] L. Dinca, B. Diaconescu and C. Gheorghiu, "Characterization methods of ferrofluids usable in plasma mirror applications," *Nuclear Photonics 2018*, Brașov, România, Iunie 24-29, 2018.