

TEZA DE ABILITARE

*Interacțiunile laser-materie
în „nano - știință” și aplicații
la scară „nano”*

- Rezumat -

Dr. ing. Aurelian Marcu

Mulțumiri

Autorul mulțumește Prof. Ion M. Popescu pentru contribuțiile sale majore de inițiere și îndrumarea a activității profesionale, Prof. Tomoji Kawai pentru susținere în activitatea de cercetare, precum și foștilor și actualilor colaboratorilor și coautori ai lucrărilor prezentate, de la Institutul National de Fizica Laserilor Plasmei și Radiației, Universitatea „Politehnica” din București dar și din alte laboratoare din țara și strainatate.

Recunoașterea activității

De la absolvirea doctoratului (februarie 2002) au fost efectuate studii de cercetare experimentală în domeniul interacțiunii laser-mater, cu un accent deosebit pe interacțiunea impulsurilor laser scurte și procese asociate, iar pe baza rezultatelor obținute au fost dezvoltate o serie de aplicații. Astfel, rezultatele prezentate în această teză prezintă o sinteză a rezultatelor dintr-**O carte** (editura **Springer**), **2 capitole de carte** (editurile INTECH și One Press), peste **38 publicații ISI (Q1 – 17 publicații și Q2-11 publicații)** cu **28 ca prim autor** (și **4 ca autor corespondent**) și **9 brevete depuse (2 brevete naționale acordate)**. Rezultatele au fost prezentate în peste **100 de prezentări (8 invitate)** la conferințe (**3 în calitate de organizator**) internaționale, cumulând peste **600 de citări**.

O parte din realizările științifice menționate prezentate aici a fost obținută în diferite proiecte, acordate prin diferite competiții, de Agenția Spațială Română (**ROSA**), ‘Extreme Light Infrastructures’ (**ELI**), Agenția Executivă pentru Învățământ Superior, Cercetare, Dezvoltare și Fondare Inovatoare (**UEFISCDI**). Această lucrare a implicat echipe multidisciplinare și internaționale (Universitatea de Tehnologie Nagaoka, Nagaoka - Japonia și Universitatea Osaka, Institutul de Cercetare Științifică și Industrială, Osaka – Japonia), precum și activități comune de cercetare cu diferite laboratoare din Europa (Universitatea Louis Pasteur, Ecole National Supérieur de Physique de Strasbourg – Franța, Hard X-ray Beamline and Structural Biology, Elettra-Sincrotrone Trieste – Italia, IV. Physikalisches Institut, Georg-August-Universität, Goteburg - Germania, Institutul Catalonia de Cercetare Energetică (IREC) – Spania, Institutul de Chimie Fizică, Universitatea din Letonia, Departament d'Electronica,

Universitat de Barcelona – Spania). Rezultatele acestor colaborări au asigurat publicarea în reviste cu factor de impact ridicat (ex. Senzori și actuatori B: Senzori chimici – **9.2 ISI**, High Power Laser Science and Engineering – **5.9 ISI**, Scientific Reports – **4.9 ISI**, Applied Surface Science, Applied Physics Letters și așa mai departe), precum și cărți (Springer) disponibile în bibliotecile din toată lumea (de exemplu, Pulsed Laser Ablation of Solids – Springer 2014, disponibil în **M.I.T** University, **Berkley** University, **Standford** University, **Sorbona** University, **Oxford** University, **Tokyo** University, **Caltech** University, Universitatea **Princeton**, Universitatea **Yale**, Universitatea **Jiao Tong** din Shanghai și așa mai departe).

Contributia stiintifica

Principalele contribuții științifice pe subiectele interacțiunii laser-materie sunt în domeniul nanoștiință și aplicații la scară nanometrică, și sunt structurate în cadrul acestei teze în 4 capitole: **Capitolul 2:** „Interacțiuni laser-materie cu puls lung”, **Capitolul 3:** „Interacțiunile laser-materiei cu puls scurt”, **Capitolul 4:** „Plasma de ablație” și **Capitolul 5:** „Accelerarea de particule”, în timp ce în ultimul capitol, **Capitolul 6:** „Perspective”, sunt prezentate câteva propuneri de cercetare viitoare, bazate pe studiile și activitățile de cercetare trecute și prezente. O scurtă descriere a fiecăruia dintre aceste capitole este prezentată mai jos:

Capitolul 2: „Interacțiuni cu laser cu puls lung” prezintă studii de investigație la scară microscopică asupra materialelor iradiate cu impulsuri laser de ns. Studiile analizează comportamentul țintei după iradierea laser cu

lungimi de undă și densități de putere diferite. Ca ținte, au fost alese materiale de interes pentru fuziune (Be, C și W), cu scopul de a înțelege procesele de degradare a materialelor în condiții de extreme de mediu. Probele au fost preparate folosind tehnica „Thermoionic Vacuum Arc” (TVA), o tehnică dezvoltată în cadrul INFLPR, care asigură o legătură puternică între un strat de acoperire și substrat, tehnică utilizată pe scară largă și pentru pregătirea suprafeței elementelor reactoarelor de fuziune. Astfel, suprafețele de carbon, wolfram și beriliu au fost iradiate cu lungimi de undă UV (300 nm) vizibile (500 nm) și IR (1350 nm) și au fost analizate modificările morfologice și structurale (locale) ale suprafeței. Au fost investigate corelațiile pragului de ablație cu lungimea de undă de iradiere, precum și mecanismele de ablație pentru cele trei materiale și pentru diferite lungimi de undă. În timp ce îndepărtarea materialului a fost monitorizată prin investigații morfologice (de exemplu, **Electron Scanning Microscopy – SEM**) finalizate prin măsurători **EDX (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)**, o mai bună înțelegere a degradării suprafeței prin reacții chimice induse de laser a fost obținută prin spectroscopie Raman și **Furier-Transform InfraRed Spectroscopy (FTIR)**, tehnici de spectroscopie în infraroșu, care permit identificarea diferitelor legături chimice pe suprafața țintă și pe straturile de material superficiale. S-a obținut corelația dintre densitățile incidente de fotoni și pragul de ablație pentru diferite lungimi de undă laser și respectiv dependența liniară a pragului de ablație de lungimile de undă de iradiere. Au fost documentate contribuțiile reacției oxidative a straturilor superficiale după procesul de iradiere în cazul straturilor metalice. În cazul suprafețelor care conțin carbon, modificările hibridizării atomilor, precum și formarea de fulerene (C60), combinate cu posibile reacții oxidative (care duc la evaporarea materialului)

au fost printre mecanismele de degradare a materialului identificate.

Capitolul 3: „Interacțiuni laser-materie cu pulsuri scurte” se concentrează asupra modificărilor induse direct și indirect în material de pulsuri laser „scurte”. Modificarea directă se referă la expunerea directă a materialelor la iradierea laser, în timp ce modificările indirecte se referă la expunerea materialului la o plasmă produsă prin filamentare laser în gaz, în vecinătatea materialului expus. Impulsurile laser au fost în domeniul zecilor de fs și au fost furnizate de un laser Ti:Sapphire la 800 nm. Cele mai multe dintre materialele investigate au fost, de asemenea, materiale de interes pentru fuziune (W, Be și C) și o parte din straturile de probă investigate au fost, de asemenea, pregătite folosind tehnica de depunere TVA. Alte matyeriale unde s-au efectuat investigații în adancime, au fost materiale ‘bulk’ (de exemplu, grafit pur). Pe lângă investigațiile morfologice efectuate cu SEM, **Atomic Force Microscopy (AFM)** și completate în unele cazuri cu **EDX**, au fost efectuate investigații structurale prin **Difracție cu Raze X (XRD)**, FTIR, spectroscopie Raman și **X-Ray Photoluminescence Spectroscopy (XPS)** pentru identificarea atât a lăței cristaline (acolo unde este posibil), cât și a legăturilor chimice. În timp ce XRD oferă informații structurale din materialul în ‘bulk’, în cazul investigațiilor XPS, informațiile în adancime au fost obținute prin ablatia cu plasmă a straturilor superficiale. Schimbarea lungimii de undă a laserului de investigație de la UV la vizibil și IR a fost o altă modalitate de reglare fina a adâncimii investigației, în cazul spectroscopiei Raman, raportând diferențele de adâncime de penetrare ale diferitelor lungimi de undă de radiație.

Influențele indirecte ale interacțiunilor laser-materie au fost investigate folosind un filament de plasmă laser produs în diferite gaze (aer, hidrogen și deuteriu) în imediata apropiere a diferitelor ținte. Plasma de filamentare s-a dovedit a avea influențe asupra materialelor, similare cu iradierea laser, cum ar fi ablația superficială a materialului și modificări structurale induse. Pe lângă dependența dimensiunii zonei afectate de puterea laserului, precum și de morfologia suprafeței și dependența de rugozitate a materialului țintă, în ceea ce privește morfologia suprafeței, unul dintre rezultatele foarte interesante a fost formarea de „ripples”. „Ripples”-urile sunt structuri regulate presupuse a se forma pe o suprafață (metalică) la interacțiunea câmpurilor electromagnetice (EM) (de obicei, EM asociat fotonilor fasciculului laser) cu suprafețele de material cu solidificare rapidă. În experimentele raportate, astfel de structuri au fost vizibile în vecinătatea interacțiunii plasmă filamentului laser cu ținte metalice, sugerând prezența ambelor condiții, un câmp EM puternic, precum și o suprafață metalică topită. Formarea unor astfel de structuri s-a dovedit a fi dependentă de compoziția gazului ambiant, cel mai probabil prin parametrii rezultați din plasmă de filamentare, dar și de numărul de pulsuri de iradiere, dovedindu-se a fi un proces cumulativ. Procesul de ablație este, de asemenea, prezent în astfel de interacțiuni, fără a se suprapune cu suprafața de producere de „ripples”. Ablația preferențială a unor materiale în această interacțiune se realizează în mare parte de către particulele ionizate și accelerate din gaz cu materialul țintă printr-un proces fizico-chimic. Astfel, pe de o parte avem ablația preferențială a materialului mai puțin conductiv prin acumulare de căldură, iar pe de altă parte avem o posibilă reacție dintre particule energetice din plasmă și a materialului din țintă, cum este cazul filamentării cu laser în deuteriu în

carbon în vecinătatea suprafeței. Reacțiile oxidative (în special în cazul metalelor) reprezintă un alt mecanism de degradare al materialelor, iar pătrunderea în profunzime a oxigenului pare să fie favorizată de modificările suprafeței în timpul procesului de iradiere, combinându-se cu o schimbare de hibridizare corespunzătoare unui proces de amorfizare în cazul materialelor pe bază de carbon (grafit).

Influențele directe ale iradierii laser-materie cu pulsuri scurte au fost investigate utilizând sistemul laser TERAWAT din CETAL-INFLPR, care este un sistem laser Ti:Saphire la 800 nm cu o durată a pulsului de câteva zeci de fs (reglabil). Evaluarea pragului de ablație a puterii laser și a dependenței acestuia de numărul de pulsuri au fost efectuate pentru diferite materiale de interes pentru fuziune (W, C). Hărțile de ablație 3D și evoluția acestora cu numărul de pulsuri de iradiere au fost folosite pentru a înțelege mai bine procesul de degradare a materialului, precum și influențele diferiților parametri ai fasciculului și al condițiilor ambientale. O comparație între procesele induse cu laser cu puls lung (25 ns) și cu puls scurt (120 fs) a fost utilizată pentru a clarifica influența proceselor termice locale. Cele mai importante rezultate au fost obținute pentru materialele pe bază de carbon (grafit). Picurile Raman specifice grafitului (D și G) care caracterizează calitatea structurii materialului au fost monitorizate la diferite densități de putere de iradiere, număr de impulsuri laser și adâncimi de la suprafața țintei. O degradare liniară a structurii de grafit la creșterea densității de putere laser a fost înregistrată până la valori peste pragul de ablație. Doar câteva ordine de mărime peste pragul de ablație (~ 3 ordine) s-a dovedit a determina o schimbare dramatică a picurilor și o degradare accelerată a structurii țintei (neablatate). Aceste observații conduc la ipotezele unui mecanism de degradare a grafitului, non-fotonic.

Investigații suplimentare aprofundate ale variației laticiei structurii materialelor, combinate cu picurile Raman din grafit sugerează de fapt un mecanism bazat pe procesul de transformare de fază, generat de procesul de interacțiune locală foton-atom. Astfel, modificările în adâncime de deplasare a picurilor Raman, precum și schimbările de hibridizare, susțin un proces local de topire și re-solidificare în timpul iradierii cu multi-puls a țintei, procesul având loc la adâncime de penetrare mai mare decât a cea de penetrare specifice lungimii de undă a iradierii cu laser și, în consecință, mult sub stratul de material ablat. Este larg acceptată ideea că laserul cu puls scurt nu topește materialul țintei, datorită faptului că materialul va fi evaporat mai repede decât scala de timp de propagare a căldurii. Totuși, local, în vecinătatea zonei de ablație, de la atomii neablati, căldura va începe să se propage, putând topi local cantități mici de material (ruperea termică a unora dintre legăturile atomice), care după ce căldura se va propaga, se vor lega din nou, și respectiv, local, materialul se va re-solidifica. Astfel de procese sunt de fapt produse și favorizate de neuniformitățile densității puterii laser, precum și de neuniformitatea structurii materialului (structura policristalină a grafitului folosit). Astfel, aceste studii ne-au permis să clarificăm o hartă detaliată a efectelor induse pentru materialele pe bază de grafit.

Capitolul 4: „*Plasma de ablație*” a fost investigată în principal ca „sursă de particule” pentru aplicații la scară nanometrică. Particulele fine de plasma pot transporta unele particule mari care pot afecta procesele ulterioare în care dimensiunea particulelor incidente este un parametru important. Pornind de la faptul că în timpul interacțiunii laser-materie, unele particule mai mari ar putea fi generate sau unele

clusterare ar putea fi agregate în zbor, există tehnici cunoscute pentru a evita ca astfel de particule să ajungă în zona substratului. Unele dintre ele se bazează pe comportamentul de ‘tip fluid’ al particulelor fine și mișcarea balistică a particulelor mai mari (și mai grele). Pe acest principiu se bazează tehnici precum măștile sau reflexia de plasmă. Unele dintre rezultatele descrise aici se referă la modelarea teoretică a mișcării particulelor mari transportate de particulele fine, corespunzătoare unei anumite configurații geometrice, și în particular în geometria reflectorului cu plasmă, utilizată în continuare în diferite aplicații de fabricare de nanostructuri. Simulările oferă o estimare a mărimii particulelor care ar putea fi deviate de particulele fine de plasma în funcție de momentul generării și respective de întârziere a particulei ‘mari’ în raport cu cel al particulelor fine de plasma (se știe că, în majoritatea cazurilor, particulele mari sunt generate mai târziu decât particulele fine de plasmă și cu viteze mai mici). S-a dovedit că, în timp ce particule cu o masă de 10 ori mai mare decât particulele fine ale plasmă ar putea fi „purtate” relativ ușor de către plasma, particulele de 100 de ori mai mari decât particulele medii ar putea fi deviate doar sub unghiuri mai mici și ar putea fi relativ ușor „filtrate geometric”. Cu toate acestea, dimensiunea clusterului este, de asemenea, un parametru relevant care l-ar putea „ajuta” să fie transportat de particulele fine ale plasmă. Pe de altă parte, s-a dovedit, de asemenea, că o generare ulterioară a particulelor mari va reduce considerabil masa particulelor defletabile. În consecință, într-o configurație de reflexie cu plasmă, se presupune că majoritatea particulelor cu masa de peste 100 de ori mai mare decât particula fină a plasmă sunt deviate cu un unghi mai mic și le-ar putea împiedica să atingă la poziția substratului, astfel încât, în acest

fel, vom putea estima în continuare eficiența geometriei în ceea ce privește capacitățile de filtrare.

În cazul particular al procesului de creștere a nanofirelor, limitarea dimensiunii este impusă în mare măsura de dimensiunea picăturilor de catalizator și ar trebui să limiteze dimensiunea particulelor/clusterilor incidenți la ordinul nanometrilor. Astfel de particule/clustere ar putea fi generate în procesul de ablație, dar ar putea fi formate și în cadrul procesului de propagare a plasmei. S-au efectuat studii asupra coalescenței particulelor pentru Si și respectiv formarea de nanoparticule de Si (și clusteri). Principalul efect monitorizat în corelație cu dimensiunea lor a fost luminescența. La excitarea nanostructurii cu radiație UV, luminescență de bandă largă a fost înregistrată între 350 nm și 650 nm, în funcție de distribuția dimensiunilor acestora. Ca un rezultat interesant al acestor studii, pe lângă controlul potențial al mărimii de generare a particulelor în timpul procesului de ablație și posibila aplicare a filtrării electrostatice a dimensiunii acestora, este posibilitatea ajustarea reversibilă a lungimii de unda a luminescenței lor în soluție prin simple cicluri de centrifugare și sonicare. O altă aplicație a unei astfel de nanoparticule este livrarea țintită a medicamentelor bazată pe absorbția celulară a nanoparticulelor, iar aici problemele cheie sunt dimensiunea nanoparticulelor, biocompatibilitatea materialului și capacitatea de încărcare cu farmacofori. Din motive de biocompatibilitate, dar și pentru proprietățile sale magnetice care permit un potențial control magnetic al fluxului de nanoparticule și livrarea într-un sistem biologic, Maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) a fost aleasă pentru fabricarea nanoparticulelor, iar dimensiunea a fost în intervalul de câțiva nm. Un antibiotic eficient (dar neurotoxic!) (violamicină) a fost ales pentru teste bazate pe un mecanism electrostatic de încărcare a nanoparticulelor.

Rezultatele au arătat o excelentă biocompatibilitate a nanoparticulelor, o absorbție celulară bună a nanoparticulelor ne încărcate și încărcate, o încărcare bună a antibioticului și au dovedit o eficiență în terapia celulară țintită, similară cu soluția de antibiotic pur, dar cu marele avantaj al unui efect întârziat al antibioticului și, în consecință, posibilitatea de control magnetic (sau cu alte tehnici) a mișcării nanoparticulelor purtătoare în sistemul biologic.

Nucleatia particulelor ablate ar putea avea loc nu numai în plasma de ablatie, ci și după atingerea unui obstacol. O astfel de nucleatie ar putea avea loc cu sau fără un catalizator sau o sămânță de nucleatie. În lucrarea de față au fost efectuate în principal studii pentru nucleația asistată de catalizator, în care vaporii materialelor ablate sunt colectați într-un catalizator lichid și depusi pe substrat, formând o structură solidă, proces cunoscut sub numele de proces Vapor-Lichid-Solid (VLS). Pe baza acestui proces și folosind ablația laser ca sursă de particule, în această lucrare, sunt prezentate studii ale proceselor elementare VLS, precum și controlul morfologiei și proprietăților structurale ale nanostructurilor, prin procese elementare VLS. Pe baza concentrației critice a particulelor într-o picătură de catalizator lichid, pentru ca procesul de nucleare să aibă loc, influențele numărului de pulsuri laser pe tren (pentru lasere cu viteză mare de repetiție) energia și durata impulsului sunt posibilități dovedite de control pentru lungimea nanofirului, densitatea nanofirului și morfologia structurii. Toate aceste posibilități sunt în principiu asociate cu parametrii particulele din plasma, distribuția spațială a nanostructurilor și plasarea lor pe substrat depinzând și de prezența catalizatorului și/sau a semințelor pe suprafața substratului. Astfel, pe baza concentrației critice a particulelor din picăturile de catalizator lichid, densitatea de creștere a nanofirelor este determinată de

ambii parametri, fluxul de particule și dimensiunea (medie) a picăturilor de catalizator. Cu toate acestea, s-a dovedit că prezența ‘semințelor’ favorizează procesul de creștere a nanofirelor, și, deasemenea, este capabilă să controleze punctele preferențiale de nucleare a nanoparticulelor (pe suprafețele vicinale în cazul nostru).

Controlul proprietăților structurale a nanofirelor a fost demonstrat pentru parametrii magnetici și, de asemenea, pentru proprietățile de luminiscentă a nanostructurilor. În ambele cazuri prezentate, un strat de acoperire cu sau fără tratament termic (in-situ și ex-situ) este modalitatea de control a acestor proprietăți. Stratul de acoperire ar putea fi din depunerea cu laser a aceluiași material sau a unui material diferit (obținând hetero-nanostructuri) și ar putea afecta proprietățile superficiale (prin reglarea luminiscentei nanostructurii), dar ar putea afecta și proprietățile în profunzime prin controlul comportamentului magnetic al structurii. Difuzia solid-solid este unul dintre procesele principale implicate în acest proces. Deoarece cele două materiale ar putea sau nu să aibă viteze de difuzie comparabile unul în celălalt și în materialul de interfață format, am putea avea, de asemenea, difuzie preferențială a unuia dintre materialele implicate. În acest caz particular, am putea obține și modificări în morfologia nanostructurii. Formarea de nano-conducte (‘nanopipes’) a fost obținută printr-o astfel de difuzie preferențială a materialului din interiorul structurii (efect Kirekendall) pentru câteva combinații de oxizi care formează unele structuri spinel.

Aplicațiile pe senzorul SAW au dovedit importanța proprietăților nanostructurii pentru răspunsul senzorului macroscopic la diferite gaze și condiții ambientale. Pornind de la principiile de bază ale senzorului SAW și de la configurația standard de măsurare, s-a dovedit că lungimea nanofirului

controlează răspunsul semnalului senzorului între limite specifice. Interesant de menționat că, peste o lungime optimă, creșterea în continuare a lungimii nanofirelor are ca rezultat absorbția completă a undei acustice de către nanofire, proces destul de diferit de răspunsul unui senzor SAW bazat pe film subțire clasic. În același timp, diametrul nanofirului s-a dovedit a crește răspunsul senzorului, dar într-un mod mult mai limitat, și cu o tendință puternică de saturație, proces atribuit procesului de sorbție (adsorbție) superficială a gazelor. Pe de altă parte, distribuția și geometria spațială a nanofirelor s-au dovedit a fi importante pentru zgomotul senzorului SAW și, în consecință, pentru sensibilitatea acestuia. Astfel, forma diferită a zonei acoperite de nanofire s-a dovedit a genera răspunsuri similare, dar niveluri de zgomot diferite, iar rezultatele au fost atribuite absorbției undelor de către nanostructură cu propagare preferențială pe direcții diferite ale suprafaței. Mai mult, pe baza diferiților senzori cu caracteristici diferite, nu numai detectarea analiților, ci și discriminarea analiților s-a dovedit că este posibilă pe gaze asemănătoare (ex. diferiți izotopi de hidrogen).

Capitolul 5: „Accelerarea de particulelor” prezintă rezultate privind interacțiunea pulsurilor ultra-scurte laser de mare putere cu materia, respectiv accelerarea particulelor și fenomene asociate. Facilitatea laser CETAL-PW având un laser de 1 PW, 800 nm 25 fs a fost utilizată în majoritatea experimentelor prezentate. S-a raportat utilizarea gazului He-N (99%-1%) cu densități de particule de până la 10^{19} atomi/cm⁻³ și densități de putere a fasciculului de 10^{18} W/cm², pentru electroni accelerați la energii de până la câteva sute de MeV (aproximativ 200 MeV). Interesant de subliniat sunt distribuțiile monoenergetice a electronilor pentru energiile pulsului laser în jurul valorii de 1 J, cu o stabilitate bună a

energiei de vârf (<12%). Valorile energetice și stabilitatea fac astfel de fascicule foarte eficiente pentru aplicații terapeutice, în timp ce utilizarea gazului ca țintă face ca procesul să fie eficient din punct de vedere al costurilor și să se facă un pas înainte către aplicațiile clinice ale procesului.

Un alt efect al interacțiunii impulsurilor laser ultrascurte cu ținte metalice subțiri este generarea de pulsuri electromagnetice puternice (**EMP**). Astfel de impulsuri ating valori de câmp electric de zeci de MV/m și au un domeniu de frecvență foarte larg. Rezultatele prezentate includ date din banda MHz – GHz corelate cu parametrii procesului de accelerare. S-a obținut o corelație experimentală pentru valorile câmpului EMP și diferiți parametri experimentali ai sistemului și laserului. Astfel, corelația dintre alinierea sistemului experimental și amplitudinea integrată EMP (peste intervalul de frecvență măsurat) permite utilizarea acestui „fenomen parazit” ca instrument de aliniere a sistemului pentru regimul de putere mare a sistemului, pentru care nu sunt eficiente instrumente standard. În plus, durata și puterea impulsului laser sunt, de asemenea, corelate direct cu câmpul EMP, permițând și optimizări ale sistemului (pentru aplicații de accelerare a particulelor) în regimul de mare putere al laserului.

În ciuda faptului că și-a demonstrat eficiența pentru optimizarea sistemului laser în accelerarea particulelor de la ținte de gaz, câmpul EMP rămâne o problemă pentru electronicele sensibile și posibil pentru organismele vii. Studiile prezentate în continuare au dovedit influențele EM asupra celulelor sistemului imunitar uman pentru valori de câmp mult mai scăzute fata de standardele internaționale de radiocomunicații. Investigațiile privind producția de anticorpi a celulelor Pre-B în condiții controlate (producție stimulată de anticorpi) efectuate în banda de frecvență de radiocomunicații

(720 MHz – 1,2 GHz) au arătat că expunerea prelungită (~ 48 ore) la valori de câmp de zeci de ori mai mici decât nivelul valorilor reglementate (~ 30 de ori mai mici) ar putea reduce eficiența acestuia cu procente semnificative (80 %). Studiile prezentate au arătat că frecvențele specifice (în jur de 1 GHz) ar putea fi mai nocive decât altele (de aproximativ 2 ori) și am putut corela experimental aceste valori cu performanțele de absorbție a undelor electromagnetice ale mediului de cultură celulară, prezentând un vârf semnificativ de absorbție în același interval de frecvență. De menționat faptul că mediul celular de cultură are proprietăți similare cu sângele real, astfel încât problema identificată/raportată este una reală. Mai mult, investigațiile au arătat că mecanismul nu se bazează pe dublarea a ADN-ului (ca în cazul radiațiilor ionizante). Pe de altă parte, intervalul de expunere mai scurt chiar și la câmpuri puțin mai puternice nu a produs efectele menționate, așa că sunt necesare investigații suplimentare pentru a clarifica influențele EMP asupra celulelor și organismelor vii.

În ultimul **Capitol 6: „*Perspective*”** sunt prezentate potențiale continuări ale rezultatelor de cercetare prezentate aici și experimentele asociate preconizate. Astfel, activitățile de cercetare ulterioare sunt preconizate a fi făcute cu echipe multidisciplinare, naționale și internaționale, și cu finanțare națională și europeană, pe teme legate de ***interacțiunea laser-materie***: Interacțiunea laser-mater. algoritmi de predicție, cu aplicații potențiale într-un domeniu științific și industrial larg. ***Nucleatia de nanostructurii și creșterea din plasmă de ablație*** folosind tehnica PLD-VLS sunt propuse a fi optimizate în continuare pentru îmbunătățirea controlului morfologic care vizează o arie largă de aplicații, de la industrie la medicină și spațiu. Ca „efecte secundare” ale interacțiilor laser-materie,

transferul de impuls al pulsului laser, în special pentru pulsuri laser scurte ($\sim 1\text{ps}$), ca proces direct (impuls fonic) și indirect (impuls de ablație) în propulsia laser, dar și în îmbunătățirea stabilității opticii sistemului laser, se propun a fi investigate mai ales din perspectiva ablației laser (consum țintă sau distrugerea elementelor optice). În cazul țintelor subțiri (metalice) (dar și țintelor de gaz), **accelerarea particulelor** prin tehnici laser este un domeniu relativ nou care necesită muncă intensă pentru optimizarea parametrilor și controlul parametrilor particulelor accelerate, vizând diverse aplicații medicale și industriale. Ca efect secundar („parazit”) al acestui proces de accelerare, se propune, de asemenea, să fie investigată în continuare generarea de EMP cu scopul de a proteja dispozitivele și organismele vi pe de o parte, dar cu aplicații ale câmpurilor electrice și/sau magnetice ultraintense în minte pe de cealaltă parte.

Activitățile propuse a fi desfășurate în continuare pot beneficia de contribuția tinerilor cercetători, dar pot contribui și la pregătirea lor profesională și lărgirea orizontului lor de cunoaștere.