



(12) CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2020 00429

(22) Data de depozit: 22/07/2020

(41) Data publicării cererii:
28/01/2022 BOPI nr. 1/2022

(71) Solicitant:
• INSTITUTUL NAȚIONAL PENTRU FIZICA
LASERILOR, PLASMEI ȘI RADIAȚIEI -
INFLPR, STR. ATOMIȘTILOR NR. 409,
MĂGURELE, IF, RO

(72) Inventatori:
• MARCU AURELIAN,
STR. SOLDAT NICULAE SEBE, NR.16,
BL.L40, SC.1, AP.27, SECTOR 3,
BUCUREȘTI, B, RO;
• UNGUREANU RĂZVAN, NR.356,
SAT PERSUNARI, COMUNA GURA
VADULUI, PH, RO;
• SERBANESCU MIHAI, STR.POLONĂ,
NR. 38, SECTOR 1, BUCUREȘTI, B, RO;
• GIUBEGA GEORGIANA,
STR.MĂRĂȘEȘTI, NR.11, BL.NEW
CONCEPT, AP.13, MĂGURELE, IF, RO;
• DIPLASU CONSTANTIN, STR. NERVA
TRAIAN NR. 1, BL. K6, SC. 1, ET. 6, AP. 22,
SECTOR 3, BUCUREȘTI, B, RO;

• STANCU ELENA, SAT SLĂVEȘTI,
LOCALITATEA TĂTĂRĂȘTII DE JOS, TR,
RO;
• COJOCARU GABRIEL, STR. GRIVIȚEI,
NR.4, AP.15, BĂILE GOVORA, VL, RO;
• ZAMFIRESCU MARIAN, STR.ODGONULUI
NR.1, BL.132, SC.1, AP.44, SECTOR 6,
BUCUREȘTI, B, RO;
• ACHIM ALEXANDRU, STR.FIZICIENILOR,
NR.10, BL.M6, AP.7, MĂGURELE, IF, RO;
• LUPU MARIA CARLA, STR. MIORIȚEI,
NR.10, SC.C, AP.13, BACĂU, BC, RO;
• TRUPINA MIRELA, ȘOS.ALEXANDRIA,
NR.20, BL.L6, SC.B, AP.76, SECTOR 5,
BUCUREȘTI, B, RO;
• TUDOR NICULAE, STR.ALUNIȘ, NR.303,
MĂGURELE, IF, RO;
• STOICU MARIN, STR.ATOMIȘTILOR,
NR.232, BL.12, SC.C, AP.2, MĂGURELE, IF,
RO;
• GHEORGHE MARIN, STR.LUICA, NR.35A,
BL.IV-1A, SC.1, AP.40, SECTOR 4,
BUCUREȘTI, B, RO

(54) METODA DE ALINIERE ȘI OPTIMIZARE A
ACCELERATORULUI DE PARTICULE CU FASCICUL LASER
(ÎN GAZ), UTILIZÂND PULSURILE ELECTROMAGNETICE
"PARAZITE" GENERATE DE PLASMA INDUSĂ CU LASER

(57) Rezumat:

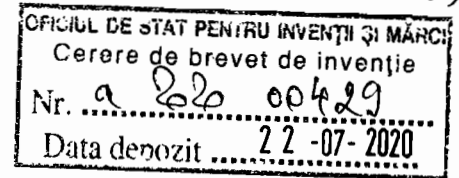
Invenția se referă la o metodă de aliniere a unui sistem laser-țintă și de optimizare a parametrilor laser și a transferului energetic către țintă în sistemele laser de mare putere și în acceleratoarele de particule realizate cu acestea. Metoda conform invenției constă în folosirea pulsurilor electromagnetice "parazite" asociate plasmei generate de interacția pulsurilor laser ultra-intense cu materia. Radiația electromagnetică este produsă în principal de oscilații ale sarcinilor din plasma creată la

interacția laser-materie și energia acesteia depinde de sarcina extrasă și, implicit, de energia laser transferată plasmei. Astfel, transferul de energie laser poate fi corelat cu intensitatea pulsului electromagnetic generat și, respectiv, cu amplitudinea semnalului recepționat de o antenă dedicată.

Revendicări: 1
Figuri: 4

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





DESCRIERE A INVENȚIEI

Odată cu avansul tehnicilor de accelerare de particule cu fascicule laser ultra-intense ce conduce la dezvoltarea de noi aplicații industriale (ex: tomografi cu raze X și γ) și biomedicale (ex: radioterapie, hadronoterapie (terapie cu protoni)) ale particulelor accelerate, alinierea și optimizarea acestor sisteme trebuie să se facă de către potențiali utilizatori într-un mod cât mai facil și automatizat, pe baza unei aparaturi cât mai accesibile și a unei monitorizări cât mai simple și facile a procesului de accelerare. Invenția se referă la o metodă inovativă și facilă de aliniere pe o țintă (în cazul nostru țintă gazoasă sub forma unor jeturi supersonice) și de optimizare a parametrilor sistemului laser în regimul putere înaltă, ce poate fi utilizată și implementată în sisteme automatizate de control al acestui tip de acceleratoare.

În general, alinierea sistemului laser-țintă, se poate face prin metode optice (camere de vizualizare de tip 'charged-coupled device' (CCD) [1-5], optică adaptivă [4], utilizarea unui fascicul de probă [5], mecanice, etc.. Totuși, aceste metode sunt folosite cu succes doar în regimul de putere joasă. Pe măsură ce puterea laser crește, majoritatea tehnicilor existente de aliniere devin ineficiente atât din cauza comportamentului neliniar ce apare în anumite fenomene fizice dar și din cauza pulsurilor electromagnetice 'parazite' produse la interacția laser-materie în benzile MHz – GHz [6-9], ce pot genera probleme în funcționarea echipamentelor [10,11] din sistemul experimental.

Pentru a răspunde acestor provocări, prezenta invenție furnizează o metodă de aliniere ce are la bază pulsurile electromagnetice 'parazite', produse de interacția pulsurilor laser cu ținta – în cazul de față gazoasă. Aceste pulsuri denumite 'zgomote' sunt prezente la orice interacție a pulsurilor laser de mare putere cu materia [6-9] și este cunoscut faptul că intensitatea semnalului este dependentă de numărul de electroni extrași din plasmă [12] (implicit de sarcina de electroni extrasă). Se cunoaște faptul că parametri laser-plasmă, precum 'calitatea' focusului, densitatea plasmei, intensitatea radiației laser pe țintă, dictează mecanismele de accelerare ale electronilor și implicit proprietățile pulsurilor de electroni. Cu cât fasciculul laser este focalizat într-o pată focală mai mică cu atât transferul de energie de la fasciculul laser la electronii din plasmă este mai eficient și prin urmare numărul de electroni per puls și energia maximă a acestora crește. Cu cât numărul de electroni și energia acestora sunt mai mari, cu atât pulsul electromagnetic este mai mare. Având în vedere această dependență, semnalele (induse în antenă de către pulsurile electromagnetice) înregistrate cu o antenă de bandă largă pot fi folosite la monitorizarea procesului de aliniere a sistemului laser-țintă chiar și în timpul alinierii finale, parte a procesului de aliniere ce are loc și la puteri mari ale fasciculului laser.

Odată cu atingerea optimului de aliniere, în cazul nostru pe ținta gazoasă în modul de putere joasă al laserului, apare emisia de unde electromagnetice de intensitate în general scăzută. Odată cu creșterea puterii laser, eventualele abateri de la aliniere nu vor mai putea fi monitorizate cu dispozitivele clasice, pe de o parte datorită creșterii densității de putere ce va putea afecta optica de diagnoză, iar pe de altă parte datorită creșterii intensității câmpurilor electromagnetice așa numit 'parazit'. Metoda propusă de aliniere constă în utilizarea exact a acestor câmpuri 'parazite' înregistrate în vecinătatea țintei încă dinaintea atingerii condițiilor care permit obținerea de particule accelerate detectabile și (re)alinieră finală a sistemului laser-țintă în regim de înaltă putere.

Aceeași metodă este aplicabilă optimizării (în regim de putere înaltă) duratei de puls, optimizare ce poate avea de asemenea loc înainte de a detecta particulele accelerate.

Posibilitatea de optimizare a alinierii sistemului laser-țintă sau a duratei de puls înainte de a atinge pragul de detecție a particulelor accelerate în procesul de interacție a pulsului laser cu ținta gazoasă, este unul dintre avantajele majore ale metodei propuse.

- [1] F. Wagner, C. Brabetz, O. Deppert, M. Roth, T. Stöhlker, An. Tauschwitz, A. Tebartz, B. Zielbauer and V. Bagnoud, *High Power Laser Science and Engineering* **4**, pp. 45 (2016)
- [2] Deepak Kumar, Michal Šmíd, Sushil Singh, Alexander Soloviev, Hannes Bohlin, Konstantin Burdonov, Gashaw Fente, Alexander Kotov, Livia Lancia, Vit Lédl, Sergey Makarov, Michael Morrissey, Sergey Perevalov, Denis Romanovsky, Sergey Pikuz, Ryousuke Kodama, David Neely, Paul McKenna, Tomáš Laštovička, Mikhail Starodubtsev, Stefan Weber, Motoaki Nakatsutsumi, and Julien Fuchs, *Matter and Radiation at Extremes* **4**, 024402 (2019)
- [3] Shisen Yan a,b , Daizhong Liu a , , Xue Kong a,b , Xiaoping Ouyang a , Baoqiang Zhu a, Jianqiang Zhu, „Laser beam alignment for a petawatt picosecond diagnostic system in SG-II laser facility”, *Fusion Engineering and Design* **132**, 18–23 (2018)
- [4] D.Urscu, G.Chériaux, P.Audebert, M.Kalashnikov, T.Toncian, M.Cerchez, M.Kaluza, G.Paulus, G.Priebe, R.Dabu, M.O. Cernaianu, M.Dinescu, T.Asavei, I.Dancus, L.Neagu, A.Boianu, C.Hooker, C.Barty, C.Haefner, „LASER Beam Delivery At Eli-Np”, *Romanian Reports in Physics* **68**, Supplement, P. S11–S36, (2016)
- [5] Roberto Ziano, Jean-Baptiste Accary, Birgit Ploetzeneder, Roberto Versaci, and Bruno LeGarrec "Alignment system for high-power large aperture laser systems", Proc. SPIE **9513**, *High-Power, High-Energy, and High-Intensity Laser Technology II*, 95130J (2015)
- [6] S. Barbarino and F. Consoli, *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58**, 4074 (2010)
- [7] F. Consoli, R. De Angelis, P. Andreoli, G. Cristofari, and G. Di Giorgio, *Phys. Proc.* **62** 11 (2015)
- [8] J. Krása, J. Cikhart, M. De Marco, D. Klír, A. Velyhan, K. Rezac, M. Pfeifer, E. Krousky, J. Skala, R. Dudzak, J. Dostal, J. Kaufman, J. Ullschmied, and J. Limpouch, *EPS Conf. Plasma Phys.* **P1.083** (2016)
- [9] A. Poyé, S. Hulin, M. Bailly-Grandvaux, J. L. Dubois, J. Ribolzi, D. Raffestin, M. Bardon, F. Lubrano-Lavaderci, E. d’Humières, J. J. Santos, P. Nicolai, and V. Tikhonchuk, *Phys. Rev. E* **91**, 043106 (2015)
- [10] C. G. Brown, Jr., E. Bond, T. Clancy, S. Dangi, D. C. Eder, W. Ferguson, J. Kimbrough, and A. Throop, *J. Phys.: Conf. Ser.* **244**, 032001 (2010)
- [11] C. G. Brown, J. Ayers, B. Felker, W. Ferguson, J. P. Holder, S. R. Nagel, K. W. Piston, N. Simanovskaia, A. L. Throop, M. Chung, and T. Hilsabeck, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 10D729 (2012)
- [12] F. S. Felber, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 231501 (2005)

SUMARUL INVENȚIEI

Invenția propune o metodă inovativă de aliniere a sistemului laser-țintă și de optimizare a parametrilor laser în acceleratoarele de particule cu lasere de mare putere, folosind pulsurile electromagnetice 'parazite' produse de plasma rezultată din interacția pulsurilor laser ultra-intense cu materia. Această metodă se bazează pe corelarea energiei laser transferată către plasmă și intensitatea radiației electromagnetice 'parazite' produse și pe maximizarea acestei energii prin optimizarea parametrilor laser și a alinierii sistemului laser-țintă.

DESCRIERE DETALIATĂ A INVENȚIEI

Invenția este prezentată pe larg în continuare, cu referire la Figurile 1, 2 și 3, care reprezintă:

Fig. 1 – Schița montajului experimental al sistemului de monitorizare a pulsului electromagnetic produs în procesul de accelerare de particule indus de interacția pulsurilor laser de putere mare cu ținte gazoase

Fig. 2 – Transformatele Fourier ale pulsurilor electromagnetice înregistrate de o antenă de radiofrecvență de bandă largă în timpul procesului de aliniere a sistemului laser-țintă și corespondența cu diferitele etape de aliniere ale sistemului laser țintă.

Fig. 3 – Transformatele Fourier ale pulsurilor electromagnetice înregistrate cu o antenă de bandă largă în timpul procesului de optimizare a poziției rețelelor de difracție din sistemul de stretcher al laserului PW, în vederea optimizării duratei de puls.

Fig. 4 (a) Pată de lumină emisă de ecranul scintilator la interacția electronilor cu acesta; **(b)** Pată de lumină emisă de ecranul scintilator la interacția electronilor cu acesta, după traversarea câmpului magnetic

Pentru a înregistra pulsurile electromagnetice produse la interacția laser-materie, o antenă de radiofrecvență (RF) de bandă largă (în cazul nostru 0.8-16 GHz) este plasată în camera de interacție (IC), în vecinătatea țintei (Fig. 1). Semnalul indus în antenă de către pulsul electromagnetic este extras în afara IC folosind o flanșă cu treceri de vid, cu mufe de RF pe ambele părți și conectori RF de frecvență înaltă (în cazul nostru de 18 GHz). Cablurile de conectare sunt cabluri de RF cu pierderi mici. Totuși, având în vedere posibilitatea generării de semnale foarte intense (kV), este absolut necesară o ecranare adițională a firelor și utilizarea de atenuatori de semnal (40 dB în cazul nostru).

Semnalul antenei este înregistrat în cazul nostru de un osciloscop de frecvență înaltă (6 GHz) instalat în afara camerei de interacție (Fig. 1). Nu este necesar un semnal extern de sincronizare, întrucât osciloscopul poate fi trigerat chiar de semnalul dat de antenă, pe panta de creștere a semnalului monitorizat.

Traectoria fasciculului laser, prezentată în Fig. 1, nu este relevantă pentru invenția noastră, în Fig. 1 prezentându-se doar o variantă de aranjament experimental utilizat în laboratorul CETAL-PW pentru accelerarea de particule din ținte gazoase. De asemenea, sistemul de detecție și caracterizare a particulelor accelerate, care în cazul nostru este format dintr-un spectrometru magnetic și un ecran scintilator, este de asemenea doar un exemplu dintr-o varietate largă de sisteme utilizabile în acest scop.

Procedura propusă pentru maximizarea energiei electronilor accelerați

Ca procedură de aliniere a unui sistem experimental similar cu cel prezentat în Fig. 1, pentru a optimiza energia maximă a electronilor accelerați, procesul de aliniere implică 2 etape: Etapa 1: alinierea preliminară la putere joasă: **Pas 1**- aliniere mecanică și **Pas 2** – aliniere optică; Etapa 2: alinierea la putere înaltă: **Pas 3** - aliniere pe baza semnalelor electromagnetice și **Pas 4** – aliniere cu spectrometru magnetic de electroni. Metoda de aliniere bazată pe pulsurile electromagnetice ‘parazite’, reprezentând Pasul 3 al acestei proceduri, constituie subiectul acestei invenții.

Este de menționat faptul că în absența acestei metode, acest Pas 3 este de regulă realizat prin ‘scanarea’ (modificarea pe o anumită plajă de valori) câtorva parametri de sistem. În cele mai multe cazuri, scanarea parametrilor se realizează fără posibilitatea unei monitorizări efective până la apariția primelor particule accelerate într-un flux suficient de mare pentru a fi detectabile de către dispozitivele de monitorizare utilizate. Prin urmare, în funcție de experiența operatorilor, această scanare ‘în orb’ poate dura de la câteva zeci de minute până la câteva zile.

Pas1. Pre-aliniere mecanică

În timp ce se construiește montajul experimental, echipamentele se fixează inițial în raport cu pozițiile predefinite/dorite ale focusului laser și ale altor echipamente utilizate. Pentru această poziționare inițială se folosesc valorile de catalog ale anumitor parametri și pozițiile măsurate anterior pentru focalizarea fascicului laser. La acest pas, erorile de poziționare a diferitelor componente pot fi de câțiva micrometri în cel mai bun scenariu, dar în anumite cazuri pot atinge și valori de milimetri. Acest pas de pre-aliniere nu implică practic și fasciculul laser ci doar ajută la poziționarea țintei, în cazul nostru jetul de gaz, cât mai aproape de locul în care fasciculul laser este focalizat cu cea mai mică pată focală.

Pasul 2. Pre-aliniere optică

Alinierea optică implică utilizarea unui fascicul laser de putere joasă. Dacă există posibilitatea folosirii unui fascicul laser extras chiar din fasciculul laser ce se va utiliza efectiv în procesul de accelerare, regimul de funcționare al laserului va fi tot unul de putere joasă. Într-un fel sau altul, alinierea țintei cu fasciculul laser este monitorizată fie doar cu ajutorul unei camere simple CCD fie cu o cameră CCD plasată în sisteme optice mai complexe (sisteme bazate pe fascicule de probă analizate interferometric sau cu senzor de front de undă). În cazul țintei de gaz, alinierea spațială și sincronizarea temporală dintre pulsul laser și jetul de gaz conduce de obicei la obținerea procesului de filamentare a fascicului în ținta gazoasă.

Pasul 3. Aliniere pe baza pulsurilor electromagnetice ‘parazite’

Alinierea bazată pe pulsurile electromagnetice ‘parazite’ reprezintă partea centrală a prezentei invenții. Pasul precedent, de aliniere optică, aduce sistemul laser-țintă la nivelul de filamentare a fascicului laser în gaz și odată cu creșterea puterii laser (în regim de putere înaltă) conduce la generarea de pulsuri electromagnetice. Un exemplu de puls electromagnetic ‘parazit’ este prezentat în Fig. 2, ca semnalul F1. Emisiile ‘parazite’ sunt corelate cu energia laser transferată plasmei. Astfel, o creștere în amplitudinea semnalului corespunde unei energii mai mari transferată de la laser la plasmă și implicit cu o îmbunătățire a alinierii sistemului laser-țintă.

Într-o primă fază, se procedează la alinierea țintei (valvei de gaz) prin mișcarea acesteia pe axele X, Y, Z relativ la poziția focusului laser, unde Z este axa de propagare, iar X și Y definesc planul focal. Aducerea țintei pe axa focală, se realizează prin mișcarea valvei de gaz pe axele X și Y (optim curba 2 din Fig. 2). Alinierea finală, pe axa Z (în adâncime) corespunde aducerii țintei în planul focal, adică se mișcă valva de gaz pe axa Z până când se observă minimizarea petei focale în planul valvei de gaz (optim curba 3 din Fig. 2). Acești pași de aliniere se execută în mod iterativ, ducând la optimizări succesive (curbele 4 și 5 din Fig. 2) și la posibila apariție a unui fascicul de particule accelerate (electroni în cazul nostru) cu o intensitate detectabilă pe ecranul scintilator.

A doua fază de aliniere cu pulsuri electromagnetice ‘parazite’ corespunde optimizării duratei de puls, mai precis (în cazul nostru) optimizării pozițiilor rețelelor de difracție din sistemul de stretcher al sistemului laser PW (curbele 1-5 din Fig. 3). Merită menționat aici faptul că valorile obținute pe durata optimizării în regim de putere înaltă pot fi corelate foarte bine cu optimizările realizate într-un stadiu preliminar anterior, în regim de aliniere la putere joasă.

La finalul acestor două faze (curba 6 din Fig. 2) - care pot fi realizate și în mod iterativ dacă este cazul - vor fi detectate fascicule de electroni accelerați pe ecranul scintilator.

Pasul 4. Aliniere cu spectrometru magnetic

Odată ce numărul și energia particulelor accelerate sunt suficient de mari încât să depășească pragul de detecție al ecranului scintilator (după etapa de aliniere pe baza pulsurilor electromagnetice ‘parazite’), optimizarea finală a fascicului de particule accelerate (optimizare energetică) se continuă cu ajutorul unui spectrometru magnetic. Se cunoaște faptul că orice particulă încărcată electric și accelerată, atunci când se deplasează într-un câmp magnetic este deviată de la traiectoria inițială, urmând o traiectorie circulară cu o rază de curbură dependentă de energia ei cinetică și de intensitatea câmpului magnetic. Astfel, monitorizând lumina emisă de ecranul scintilator la

interacția electronilor cu acesta (Fig. 4(a)), după ce aceștia au trecut prin câmpul magnetic (Fig. 4(b)), se pot decela două lucruri esențiale:

a. Dacă pata luminoasă, inițial aproximativ circulară și centrată pe ecran, se alungește și/sau deviază de la poziția centrală în sensul în care ar fi deviați electronii (sarcini negative), dovedește faptul că aceasta se datorează interacției unui fascicul de electroni cu mediul activ al detectorului și nu a unui alt tip de radiație (raze X și γ posibile în acest caz);

b. În funcție de deviația minimă și maximă a petei luminoase alungite, se determină domeniul de energii ale electronilor măsurați.

Din Fig. 2 se observă faptul că, după câteva tentative de optimizare, semnalele F6, F7 și F8, înregistrate în etapa de optimizare cu spectrometru magnetic, prezintă variații relativ mici atât ale amplitudinii semnalului înregistrat ($< 5\%$ pe tot spectrul de frecvențe monitorizat) cât și ale energiei electronilor accelerați (respectiv ale deviației petei luminoase emisă de detector). Acest lucru dovedește faptul că, în cazul nostru, metoda de aliniere și optimizare pe baza pulsurilor electromagnetice 'parazite' a fost suficient de exactă și de asemenea faptul că configurația experimentală rezultată în urma optimizărilor a fost foarte aproape de cazul "ideal" pentru sistemul nostru.

Totuși, pentru alte sisteme cu diferite particularități sau pentru alte obiective experimentale (ex: maximizarea numărului de electroni, obținerea fasciculelor de electroni cu distribuții monoenergetice, etc), odată ce sunt obținute particulele accelerate, anumite optimizări specifice făcute direct pe fasciculele de particule generate pot fi în continuare utile.

REVENDICĂRI

1. Metodă de aliniere a sistemului laser-țintă și de optimizare a parametrilor laser (durată de puls, dispersie, etc) folosind pulsuri electromagnetice 'parazite' generate de plasma produsă de pulsul laser și caracterizată prin aceea că poate fi folosită în sistemele laser de mare putere în etape de aliniere în care alinierea optică preliminară (la energie scăzută) a fost deja realizată, dar în care particulele accelerate nu sunt (încă) detectabile iar densitatea de energie a pulsului laser este prea ridicată pentru a permite folosirea dispozitivelor uzuale de monitorizare (energimetre, camere CCD, etc) în planul focal al fasciculului laser.

DESENE/FIGURI

Fig. 1 Schița montajului experimental al sistemului de monitorizare a pulsului electromagnetic produs în procesul de accelerare de particule indus de interacția pulsurilor laser de putere mare cu ținte gazoase

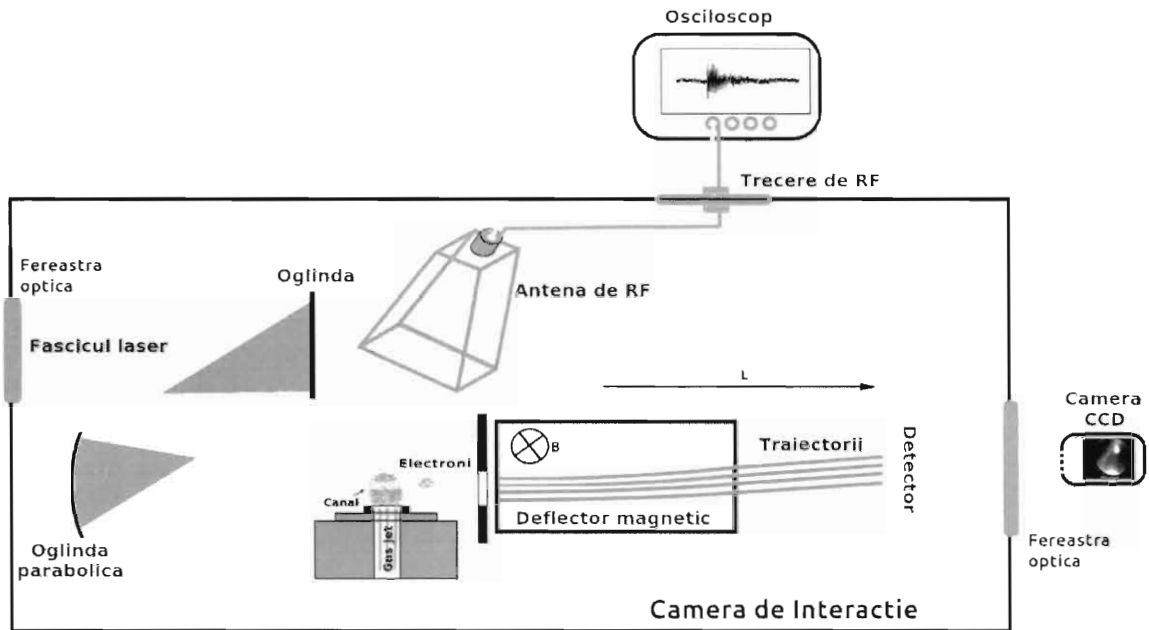


Fig. 2 Transformatele Fourier ale pulsurilor electromagnetice înregistrate de o antenă de radiofrecvență de bandă largă în timpul procesului de aliniere a sistemului laser-țintă și corespondența cu diferitele etape de aliniere ale sistemului laser țintă.

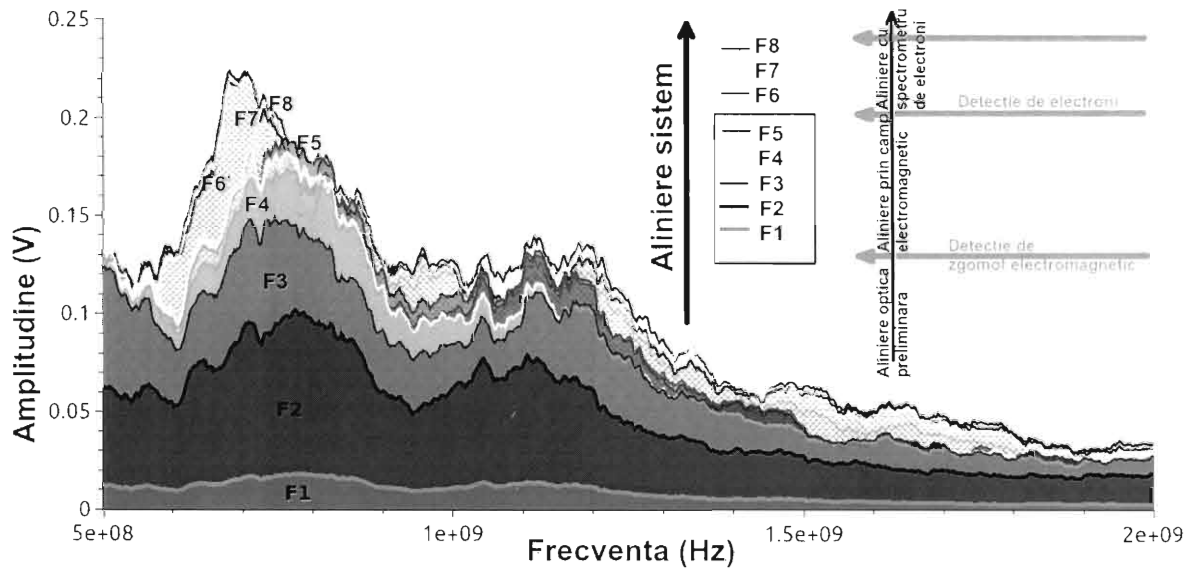


Fig. 3 Transformatele Fourier ale pulsurilor electromagnetice înregistrate cu o antenă de bandă largă în timpul procesului de optimizare a poziției rețelelor de difracție din sistemul de stretcher al laserului PW, în vederea optimizării duratei de puls.

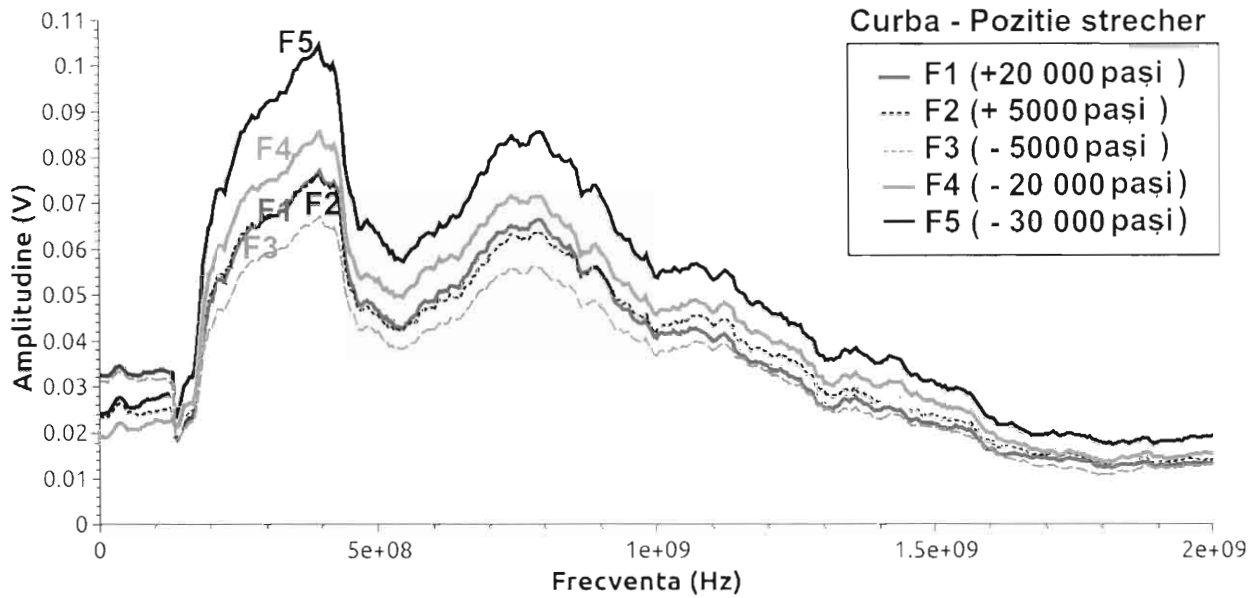
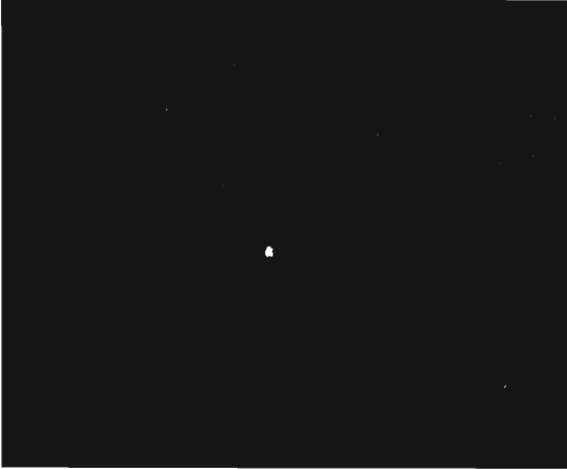


Fig. 4 (a) Pată de lumină emisă de ecranul scintilator la interacția electronilor cu acesta; (b) Pată de lumină emisă de ecranul scintilator la interacția electronilor cu acesta, după traversarea câmpului magnetic

(a)



(b)

