



(12)

BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: **a 2009 00617**

(22) Data de depozit: **05.08.2009**

(45) Data publicării mențiunii acordării brevetului: **30.04.2013** BOPI nr. 4/2013

(41) Data publicării cererii:
30.05.2011 BOPI nr. 5/2011

(73) Titular:
• **INSTITUTUL NAȚIONAL DE
CERCETARE-DEZVOLTARE PENTRU
FIZICA LASERILOR, PLASMEI ȘI
RADIĂȚIEI, STR.ATOMIȘTILOR NR.409,
MĂGURELE, IF, RO**

(72) Inventatori:
• **URSESCU DANIEL,
STR.SOLD.ENE MODORAN NR.13,
BL.M169, SC.1, ET.2, AP.12, SECTOR 5,
BUCUREȘTI, B, RO**

(56) Documente din stadiul tehnicii:
**D.URSESCU, L.IONEL, C.P.CRISTESCU,
"SPECTRALLY CLIPPED PULSES
ANALYSIS IN A CPA LASER SYSTEM",
U.P.B., SCIENTIFIC BULLETIN, SERIES A,
VOL.70, ISSUE 4, PP.49-56, 2008,
ISSN 1223-7027; US 5572355; US 5960016**

(54) **METODĂ ȘI SISTEM LASER CU PULSURI ULTRASCURTE
PENTRU GENERARE DE PULSURI MULTIPLE**



RO 126353 B1

1 Inventția se referă la o metodă și la un sistem laser ce produce pulsuri multiple, cu
intensități și întârzieri controlabile și (parțial), separate spectral, pornind de la metoda de
3 amplificare cu pulsuri modulate (Chirped Pulse Amplification - CPA) [G. A. Mourou, T Tajima,
S. V. Bulanov, *Optics in the relativistic regime, Reviews of Modern Physics* 78 (2) (2006)].

5 Generarea de pulsuri multiple este destinată procesărilor de materiale, cu ajutorul
laserilor cu pulsuri ultracurte, și pentru aplicații științifice și de dezvoltare tehnologică, cum
7 ar fi experimentele de tip excită-și-sondează (pump-probe).

Sunt cunoscute metode de generare a pulsurilor multiple, prin modificări în interiorul
9 sau în afara sistemului laser, așa numite tehnici de pulse shaping (A. M. Weiner,
Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators, Rev. Sci. Instrum., Vol. 71, No.
11 5, May, 2000). Dezavantajul acestor metode este că necesită un sistem optic, separat de
sistemul laser, mai complex din punct de vedere tehnic (adică având mai multe componente
13 optice) și, în consecință, sistemele bazate pe această abordare, ce produc pulsuri multiple,
ocupă mai mult spațiu, sunt mai greu de montat și de aliniat, și sunt mai scumpe.

15 Este, de asemenea, cunoscută metoda de generare a pulsurilor multiple, prin
modificări în interiorul sistemului laser (prin construcția unui interferometru), dar în afara
17 sistemului de alungire sau compresie optică a pulsului ultracurt (D. Zimmer, B. Zielbauer,
V. Bagnoud, U. Eisenbarth, D. Javorkova, T. Kuehl, *Optics Express*, Volume 16, Issue 14,
19 7, 10398-10403, 2008).

Dezavantajul acestei metode este că necesită un sistem optic mai complex din punct
21 de vedere tehnic (adică având mai multe componente optice) și, în consecință, sistemele
bazate pe această abordare, ce produc pulsuri multiple, ocupă mai mult spațiu, sunt mai greu
23 de montat și aliniat, și sunt mai scumpe, iar pulsurile optice produse nu sunt separate
spectral.

25 Este, de asemenea, cunoscut articolul ce prezintă modificarea unui alungitor optic,
prin introducerea unui element optic absorbant (University Politehnica of Bucharest, *Scientific
27 Bulletin-Series A-Applied Mathematics and Physics*, Volume 70 Issue: 4, pp. 49...56, 2008).
Dezavantajul acestei metode este că nu produce pulsuri multiple, ci sistemul laser, în acest
29 caz, livrează un singur puls laser.

31 Problema tehnică, pe care o rezolvă invenția, constă în generarea de pulsuri laser
multiple, ultracurte, cu raport controlabil al intensităților și cu întârzieri controlabile în
domeniul nanosecundelor, picosecundelor și femtosecundelor.

33 Metoda pentru generarea de pulsuri multiple, ultracurte, într-un sistem laser bazat
pe amplificarea modulată în frecvență, ce are în componență generatorul de puls laser,
35 alungitorul optic, amplificatoarele puls laser și compresorul optic, conform invenției, înlătură
dezavantajele mai sus, prin aceea că, pentru modificarea diferenței de drum optic, pentru
37 componentele spectrale dintr-un puls laser de bandă largă, se parcurg următoarele etape:

- se introduc, în alungitorul optic al sistemului laser cunoscut, acolo unde
39 componentele spectrale ale pulsului laser sunt parțial separate spectral și colimate, două
ferestre optice, cu fețe plan paralele, de grosimi similare, paralele cu axa x și alipite în planul
41 yz, astfel încât doar o parte a fasciculului este afectată;

- se separă pulsul laser în două părți, după trecerea printr-un subsistem format din
43 cele două ferestre optice cu fețe plan paralele, drumul optic prin prima fereastră fiind mai
lung decât cel prin cea de-a doua fereastră, deoarece cele două ferestre optice formează un
45 unghi diferit de zero în planul yz;

- se reflectă, cu o oglindă de tip acoperiș, paralelă cu axa x, cele două pulsuri
47 rezultate în urma separării pulsului laser, prin intermediul subsistemului format din cele două
ferestre optice cu fețe plan paralele;

RO 126353 B1

- se obține, în final, un puls laser, ce conține o parte dintre componentele spectrale ale pulsului laser inițial, și un alt puls laser, ce conține celelalte componente spectrale ale pulsului inițial; 1
- după compresia ulterioară, finală, a pulsurilor obținute în compresorul optic al sistemului laser cunoscut, se obțin două pulsuri ultracurte, ce conțin componente spectrale, complementare. 3
- Sistem laser cu pulsuri ultracurte, pentru generare de pulsuri multiple, ce utilizează metoda de mai sus, alcătuit dintr-o sursă de pulsuri ultracurte, alungitor optic, amplificatoare puls laser și compresorul optic, conform invenției, înlătură dezavantajele de mai sus, prin aceea că, în scopul producerii de pulsuri multiple, ultracurte, alungitorul optic mai conține niște ferestre optice cu fețe plan paralele, introduse în locul unde componentele spectrale ale pulsului laser sunt parțial separate spațial și colimate, ferestre optice care sunt paralele cu axa x și alipite în planul yz , una dintre ele rotindu-se cu axa de rotație x , controlând, în acest fel, întârzierea între cele două pulsuri generate și aceeași fereastră optică putându-se deplasa perpendicular pe direcția de deplasare, solidar cu cealaltă fereastră optică, prin această deplasare, controlându-se raportul între energiile pulsurilor generate. 5
- Metoda și sistemul laser conform invenției prezintă următoarele avantaje: 7
- simplificarea traseului optic față de metodele cunoscute de generare de pulsuri multiple, menționate mai sus; 9
- micșorarea numărului de componente față de sistemele laser cunoscute cu generare de pulsuri multiple, menționate mai sus, compactizarea sistemului laser și simplificarea reglajului sistemului; 11
- un preț mai mic, datorat sistemului simplu de producere a pulsurilor multiple, bazat pe componente optice, existente, în mod obișnuit, pe piața laserilor; 13
- pulsurile laser produse sunt (parțial) separate spectral, acesta fiind un avantaj în experimentele de tip excită și sondează (pump-probe) 15
- metoda este scalabilă la un număr de mai multe pulsuri, de exemplu, prin folosirea combinată a sistemelor prezentate în fig. 1 și 2. 17
- Se dau, în continuare, două exemple de realizare a invenției, în legătură cu fig. 1...5, care reprezintă: 19
- fig. 1, schema simplificată a unei arhitecturi de sistem laser cu amplificare modulată în frecvență (cunoscută sub denumirea "Chirped Pulse Amplification architecture"); 21
- fig. 2, vedere în perspectivă a două ferestre optice cu fețe plan paralele, introduse în alungitorul sau compresorul optic; 23
- fig. 3, vedere în perspectivă cu o oglindă de tip acoperiș, introdusă în alungitorul sau compresorul optic; 25
- fig. 4a, imagine obținută pe osciloscopul Tektronix, atașat autocorelatorului, corespunzând unei întârzieri de 6 ps; 27
- fig. 4b, imagine obținută pe osciloscopul Tektronix, atașat autocorelatorului, corespunzând unei întârzieri de 18 ps; 29
- fig. 4c, imagine obținută pe osciloscopul Tektronix, atașat autocorelatorului, corespunzând unui raport al energiilor celor două pulsuri de 1:1; 31
- fig. 4d, imagine obținută pe osciloscopul Tektronix, atașat autocorelatorului, corespunzând unui raport al energiilor celor două pulsuri de 1:5; 33
- fig. 4e, imagine obținută pe osciloscopul Tektronix, atașat autocorelatorului, de la un sistem în care s-a adăugat, în cascadă, un al doilea sistem de generare de pulsuri multiple, format din două ferestre optice cu fețe plan paralele și o fereastră de sticlă de tip acoperiș, corespunzând unui raport al energiilor celor două pulsuri de 20:35:45 și întârzieri de 0 ps, 5.7 ps și 18 ps; 35

RO 126353 B1

1 - fig. 5, exemplu de compoziție spectrală, pentru două pulsuri generate prin metoda
de generare a pulsurilor multiple, ultrascurte, în cazul utilizării subsistemului format din două
3 ferestre optice cu fețe plan paralele.

Obiectivul invenției este producerea de pulsuri laser multiple, cu raport controlabil al
5 intensităților și cu întârzieri controlabile în domeniul nanosecundelor, picosecundelor și
femtosecundelor, cu cost redus, cu un număr redus de componente optice și cu un reglaj mai
7 simplu decât metode similare.

Producerea și controlul pulsurilor multiple, în cadrul metodei pentru generare de
9 pulsuri multiple, conform invenției, în scopul reducerii costului și al simplificării traseului optic
și al reglajelor de efectuat, se realizează prin modificarea drumului optic, pentru diferitele
11 componente spectrale ale pulsului laser ce intră în alungitorul sau compresorul optic.
Aceasta se realizează la nivelul alungitorului (stretcher) sau compresorului optic, existente
13 în orice sistem bazat pe CPA, în locul unde aceste componente spectrale sunt (parțial)
separate spațial și colimate.

15 În majoritatea sistemelor laser bazate pe CPA, există un astfel de loc, în alungitorul
sau/și în compresorul optic, bazate pe prisme, grisme (grism) sau rețele de difracție. În acest
17 loc, se introduce un drum optic, suplimentar, pentru componentele spectrale ale pulsului
laser ce se intenționează a fi întârziate, producând astfel un al doilea puls. Folosind aceeași
19 metodă, se poate introduce, în același loc, un drum optic adițional, pentru o altă parte dintre
componentele spectrale ale pulsului laser ce intră în alungitor sau compresor, generând un
21 al treilea puls, și așa mai departe, putându-se genera mai multe pulsuri, după nevoi.

Sistemul laser, conform invenției, folosește un minimum de componentă optică, de
23 tip fereastră optică cu fețe plan paralele, ce se introduce în alungitorul sau în compresorul
optic, unde componentele spectrale ale pulsului laser ce intră în alungitor sau compresor
25 sunt (parțial) separate spațial și colimate. Întârzierea t , între cele două pulsuri astfel produse,
este dată de grosimea ferestrei optice d și de indicele de refracție al acesteia n , după formula
27 $t=(n-1)d/c$.

Întârzierea se poate face și prin utilizarea mai multor ferestre optice, pentru a genera
29 două sau mai multe pulsuri. Se pot folosi alternativ sau împreună cu componentele optice
refractive, ca în cazul prezentat mai sus, și componente optice reflective (oglinzi), pentru a
31 genera două sau mai multe pulsuri, de exemplu, prin folosirea a două sau mai multe oglinzi
de tip acoperiș (roof mirrors). În sistem, se pot folosi și alte componente optice (inclusiv
33 difractive), pentru a produce pulsuri multiple, prin controlul lungimii drumului optic și pentru
a mări controlul asupra proprietăților pulsurilor multiple, produse, cum ar fi durata acestor
35 pulsuri.

În fig. 1, se prezintă schema simplificată a unei arhitecturi de sistem laser, bazat pe
37 amplificarea modulată în frecvență, ce are în componență următoarele componente
principale: un generator de puls laser **A**, un alungitor optic (stretcher) **B**, niște amplificatoare
39 puls laser **C** și un compresor optic **D**.

Sistemul laser, bazat pe arhitectura cu amplificare modulată în frecvență, exemplifi-
41 cată în fig. 1, ce aplică modificarea alungitorului optic, în modul exemplificat în fig. 2, conform
invenției, utilizează, la nivelul alungitorului sau compresorului, un puls laser **1**, în locul unde
43 componentele spectrale ale pulsului laser sunt (parțial) separate spațial și colimate, care se
propagă în plan orizontal de-a lungul axei y și care trece prin două ferestre optice cu fețe
45 plan paralele **2** și **3**, de grosimi similare, paralele cu axa x și alipite în planul yz .

Datorită faptului că fereastră optică **2** formează un unghi diferit de zero cu fereastră
47 optică **3** în planul yz , drumul optic prin fereastră **2** este mai lung decât cel prin fereastră **3** și,
în consecință, pulsul laser se separă în două părți, după această trecere. Cele două pulsuri

RO 126353 B1

astfel formate ajung pe o oglindă de tip acoperiș **4**, paralelă cu axa x , ce se întâlnește în general în sistemele alungitor sau compresor, care retrimite, printr-un subsistem **5**, format din cele două ferestre optice cu fețe plan paralele **2** și **3**, cele două pulsuri laser generate după prima trecere prin subsistemul **5**. Se obțin astfel două pulsuri laser: un puls laser **6**, ce conține o parte dintre componentele spectrale ale pulsului laser inițial **1**, și un puls laser **7**, ce conține celelalte componente spectrale ale pulsului **1**.

După compresia ulterioară, finală, a pulsurilor **6** și **7**, în compresorul optic al sistemului laser, se obțin două pulsuri laser ultrascurte, ce conțin componente spectrale, complementare.

Controlul întârzierii între pulsurile **6** și **7** se realizează prin modificarea diferenței de drum optic între acestea, prin varierea unghiului între ferestrele **2** și **3**, în planul yz .

Controlul raportului intensităților între pulsul **6** și **7** se realizează prin deplasarea solidară a ferestrelor **2** și **3**, de-a lungul unei axe paralele cu axa x , modificând în acest fel domeniul spectral ce contribuie la pulsurile **6** și **7**.

Sistemul laser, bazat pe arhitectura cu amplificare modulată în frecvență, exemplificată în fig. 1, ce aplică modificarea alungitorului optic, în modul exemplificat în fig. 3, conform invenției, utilizează, la nivelul alungitorului sau compresorului, un puls laser **1**, în locul unde componentele spectrale ale pulsului laser sunt (parțial) separate spațial și colimate, care se propagă în plan orizontal de-a lungul axei y .

Acesta ajunge întâi, parțial, pe o oglindă de tip acoperiș **8**, paralelă cu axa x , ulterior, cealaltă parte a pulsului laser ajungând pe o oglindă de tip acoperiș **4**, paralelă cu axa x , ce se întâlnește, în general, în sistemele alungitor sau compresor optic. Un puls laser **7**, obținut prin reflexia pe oglinda de tip acoperiș **4**, are un drum optic mai lung și va fi întârziat față de un puls laser **6**, obținut prin reflexia pe oglinda de tip acoperiș **8**.

După compresia ulterioară, finală, a pulsurilor **6** și **7**, în compresorul optic al sistemului laser, se obțin două pulsuri laser ultrascurte, ce conțin componente spectrale, complementare.

Controlul întârzierii între pulsurile **6** și **7** se realizează prin modificarea diferenței de drum optic între acestea, prin varierea distanței între oglinzile de tip acoperiș **8** și **4**, de-a lungul axei y .

Controlul raportului intensităților între pulsul **6** și **7** se realizează prin deplasarea solidară a oglinzii de tip acoperiș **8**, de-a lungul unei axe paralele cu axa x , modificând în acest fel domeniul spectral ce contribuie la pulsurile **6** și **7**.

Implementarea abordării exemplificate în fig. 3 a fost realizată la un sistem laser cu pulsuri cu durata de 200 fs, cu rata de repetiție de 2000 Hz, cu lungimea de undă centrală de 775 nm și cu lărgimea de bandă de aproximativ 8 nm, având energia pe puls, la intrarea în alungitorul optic, de până la 0,6 mJ. În urma modificării alungitorului, după alungitor, au fost produse pulsuri cu întârziere de până la 600 ps, ce au fost amplificate până la energia totală de 3 mJ și comprimate într-un compresor optic.

După compresorul optic, s-au obținut două pulsuri laser separate, cu până la 600 ps, având durata fiecare sub 300 fs. Fig. 4 ilustrează rezultatul măsurătorii, produs cu ajutorul unui autocorelator de pulsuri laser de ordinul 2, produs de firma Femtochrome Inc., astfel: în fig. 4a, este prezentată imaginea obținută pe osciloscopul Tektronix, atașat autocorelatorului, corespunzând unei întârzieri de 6 ps; în fig. 4b, este prezentată imaginea obținută pe osciloscopul Tektronix, atașat autocorelatorului, corespunzând unei întârzieri de 18 ps; în fig. 4c, este prezentată imaginea obținută pe osciloscopul Tektronix, atașat autocorelatorului, corespunzând unui raport al energiilor celor două pulsuri de 1:1; în fig. 4d, este

RO 126353 B1

1 prezentată imaginea obținută pe osciloscopul Tektronix, atașat autocorelatorului,
corespunzând unui raport al energiilor celor două pulsuri de 1:5; în fig. 4e, este prezentată
3 imaginea obținută pe osciloscopul Tektronix, atașat autocorelatorului, de la un sistem în care
s-a adăugat, în cascadă, un al doilea sistem de generare de pulsuri multiple, bazat pe un
5 subsistem format din două ferestre optice cu fețe plan paralele și o fereastră de sticlă de tip
acoperiș, corespunzând unui raport al energiilor celor două pulsuri de 20:35:45 și întârzieri
7 de 0 ps, 5.7 ps și 18 ps.

O măsurătoare de compoziție spectrală a celor două pulsuri generate prin metoda
9 de generare a pulsurilor multiple ultrascurte, ce utilizează subsistemul format din două
ferestre optice cu fețe plan paralele, este prezentată în fig. 5. Acolo, curba marcată cu cercuri
11 indică compoziția spectrală a pulsului mai slab energetic, curba marcată cu semnul +
reprezintă spectrul celui alt puls, iar cea de-a treia curbă reprezintă spectrul măsurat, cumulat
13 pentru ambele pulsuri.

RO 126353 B1

Revendicări

1. Metodă pentru generarea de pulsuri multiple, ultrascurte, într-un sistem laser bazat pe amplificarea modulată în frecvență, ce are în componență generatorul de puls laser (A), alungitorul optic (B), amplificatoarele puls laser (C) și compresorul optic (D), **caracterizată prin aceea că**, pentru modificarea diferenței de drum optic pentru componentele spectrale dintr-un puls laser de bandă largă (1), se parcurg următoarele etape: 3
- se introduc, în alungitorul optic (B) al sistemului laser cunoscut, acolo unde componentele spectrale ale pulsului laser sunt parțial separate spectral și colimate, două ferestre optice cu fețe plan paralele (2 și 3), de grosimi similare, paralele cu axa x și alipite în planul yz, astfel încât doar o parte a fasciculului este afectată; 7
 - se separă pulsul laser (1) în două părți, după trecerea printr-un subsistem (5), format din cele două ferestre optice cu fețe plan paralele (2 și 3), drumul optic prin fereastra (2) fiind mai lung decât cel prin fereastra (3), deoarece cele două ferestre optice (2 și 3) formează un unghi diferit de zero în planul yz; 9
 - se reflectă, cu o oglindă de tip acoperiș (4), paralelă cu axa x, cele două pulsuri rezultate în urma separării pulsului laser (1), prin intermediul subsistemului (5); 11
 - se obține, în final, un puls laser (6) ce conține o parte dintre componentele spectrale ale pulsului laser inițial (1) și un puls laser (7) ce conține celelalte componente spectrale ale pulsului (1); 13
 - după compresia ulterioară finală a pulsurilor (6 și 7) în compresorul optic (D) al sistemului laser cunoscut, se obțin două pulsuri ultrascurte, ce conțin componente spectrale, complementare. 15
2. Metodă conform revendicării 1, **caracterizată prin aceea că** ferestrele optice cu fețe plan paralele (2 și 3), introduse în alungitorul optic (B), pot să fie și de tip acoperiș (8), cu vârful îndreptat pe direcția de propagare a pulsului laser incident (1) și care se poate deplasa atât de-a lungul direcției de propagare a pulsului, cât și perpendicular pe aceasta, prin aceste deplasări, controlându-se întârzierea între pulsurile generate și raportul între energiile pulsurilor. 17
3. Metodă conform revendicării 2, **caracterizată prin aceea că**, pentru modificarea diferenței de drum optic, pentru componentele spectrale dintr-un puls laser de bandă largă (1), ferestrele optice cu fețe plan paralele (2 și 3), de grosimi similare, paralele cu axa x și alipite în planul yz, se introduc în compresorul optic (D) al unui sistem laser cunoscut, bazat pe amplificarea modulată în frecvență, acolo unde componentele spectrale ale pulsului laser sunt parțial separate spectral și colimate, astfel încât doar o parte a fasciculului să fie afectată. 19
4. Metodă conform revendicării 3, **caracterizată prin aceea că**, respectiv, controlul întârzierii între pulsuri (6 și 7) se realizează prin modificarea diferenței de drum optic între acestea, prin varierea unghiului dintre ferestrele optice cu fețe plan paralele (2 și 3) în planul yz. 21
5. Metodă conform revendicării 4, **caracterizată prin aceea că**, respectiv, controlul raportului intensităților între pulsuri (6 și 7) se realizează prin deplasarea solidară a ferestrelor optice cu fețe plan paralele (2 și 3) de-a lungul unei axe paralele cu axa x, modificând, în acest fel, domeniul spectral ce contribuie la pulsuri (6 și 7). 23
6. Metodă conform revendicării 5, **caracterizată prin aceea că** ferestrele optice cu fețe plan paralele (2 și 3) pot fi componente optice, reflectante, refractante sau difractive, de tip oglindă, lentilă, prismă sau rețea de difracție. 25

RO 126353 B1

1 7. Sistem laser cu pulsuri ultrascurte, pentru generare de pulsuri multiple, ce
utilizează metoda de la revendicările 1...6, alcătuit din sursa de pulsuri ultrascurte (A),
3 alungitor optic (B), amplificatoare puls laser (C) și compresorul optic (D), **caracterizat prin**
aceea că, în scopul producerii de pulsuri multiple, ultrascurte, alungitorul optic (B) mai
5 conține niște ferestre optice cu fețe plan paralele (2 și 3), introduse în locul unde
componentele spectrale ale pulsului laser (1) sunt parțial separate spațial și colimate,
7 ferestre optice (2 și 3) care sunt paralele cu axa x și alipite în planul yz, una dintre ele (2)
rotindu-se cu axa de rotație x, controlând, în acest fel, întârzierea între cele două pulsuri
9 generate (6 și 7) și aceeași fereastră optică (2) putându-se deplasa perpendicular pe direcția
de deplasare solidar cu fereastra optică (3), prin această deplasare, controlându-se raportul
11 între energiile pulsurilor (6 și 7).

8. Sistem laser, conform revendicării 7, **caracterizat prin aceea că** ferestrele optice
13 cu fețe plan paralele (2 și 3), introduse în alungitorul optic (B), pot să fie și de tip acoperiș
(8), cu vârful îndreptat pe direcția de propagare a pulsului laser incident (1) și care se poate
15 deplasa atât de-a lungul direcției de propagare a pulsului, cât și perpendicular pe aceasta,
prin aceste deplasări, controlându-se întârzierea între pulsurile generate și raportul între
17 energiile pulsurilor.

9. Sistem laser, conform revendicării 8, **caracterizat prin aceea că**, în scopul
19 producerii de pulsuri multiple, ultrascurte, ferestrele optice cu fețe plan paralele (2 și 3) se
introduc în compresorul optic (D).



Fig. 1

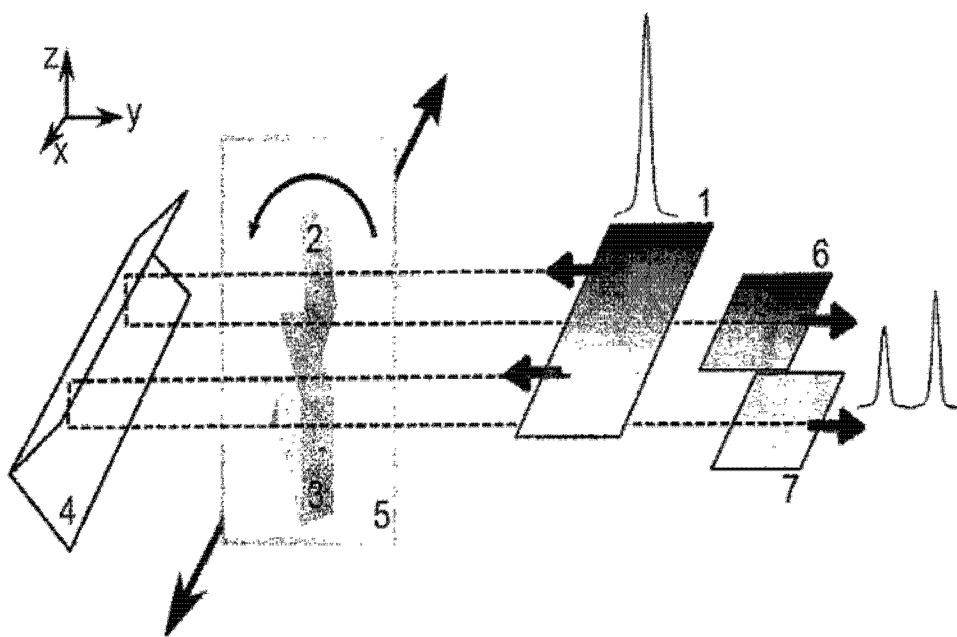


Fig. 2

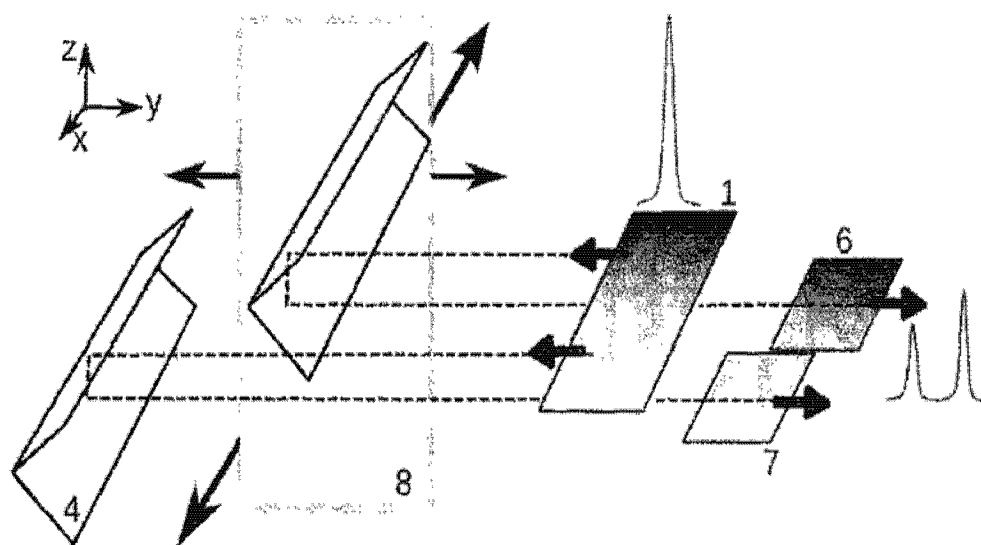


Fig. 3

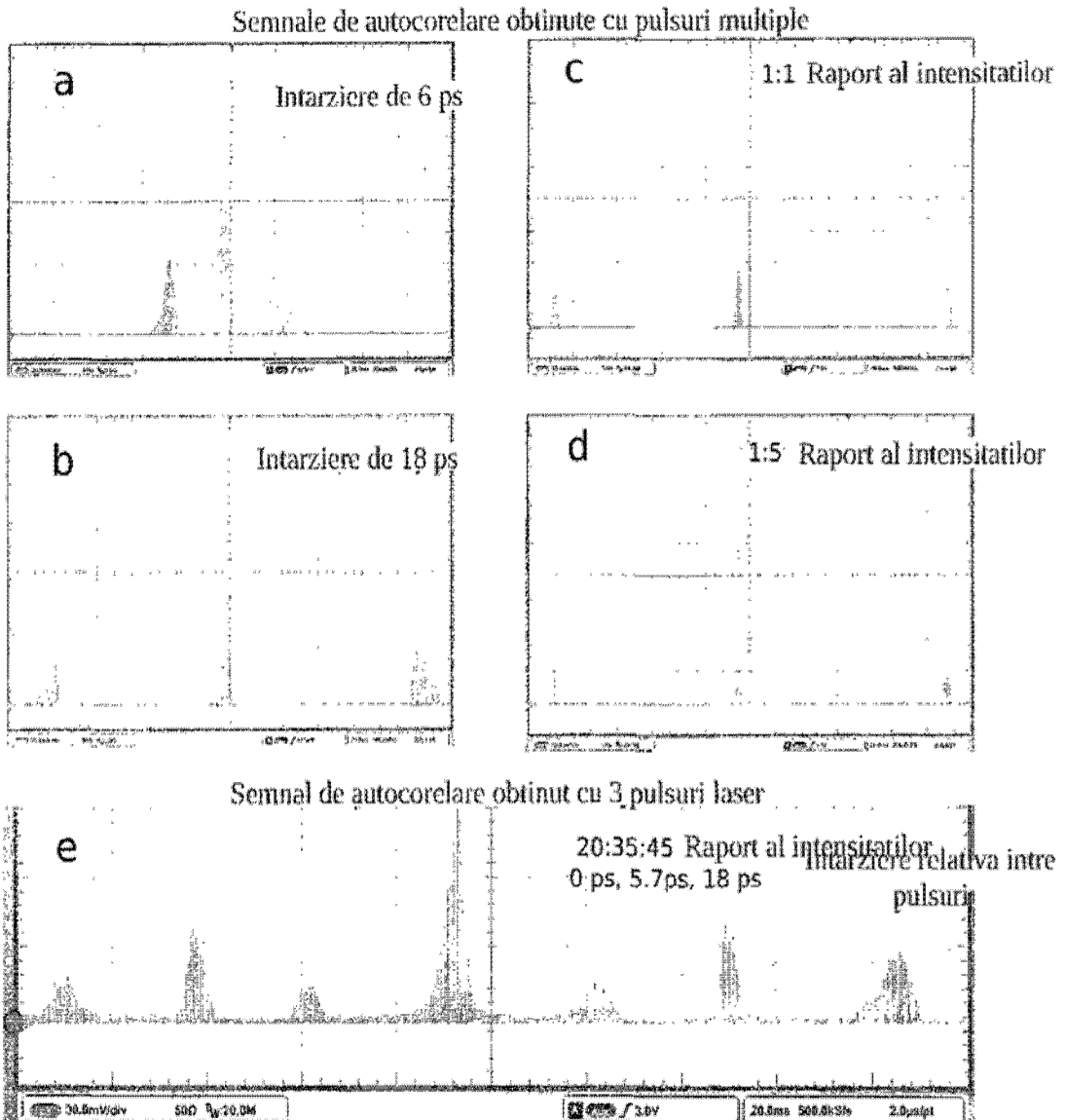


Fig. 4

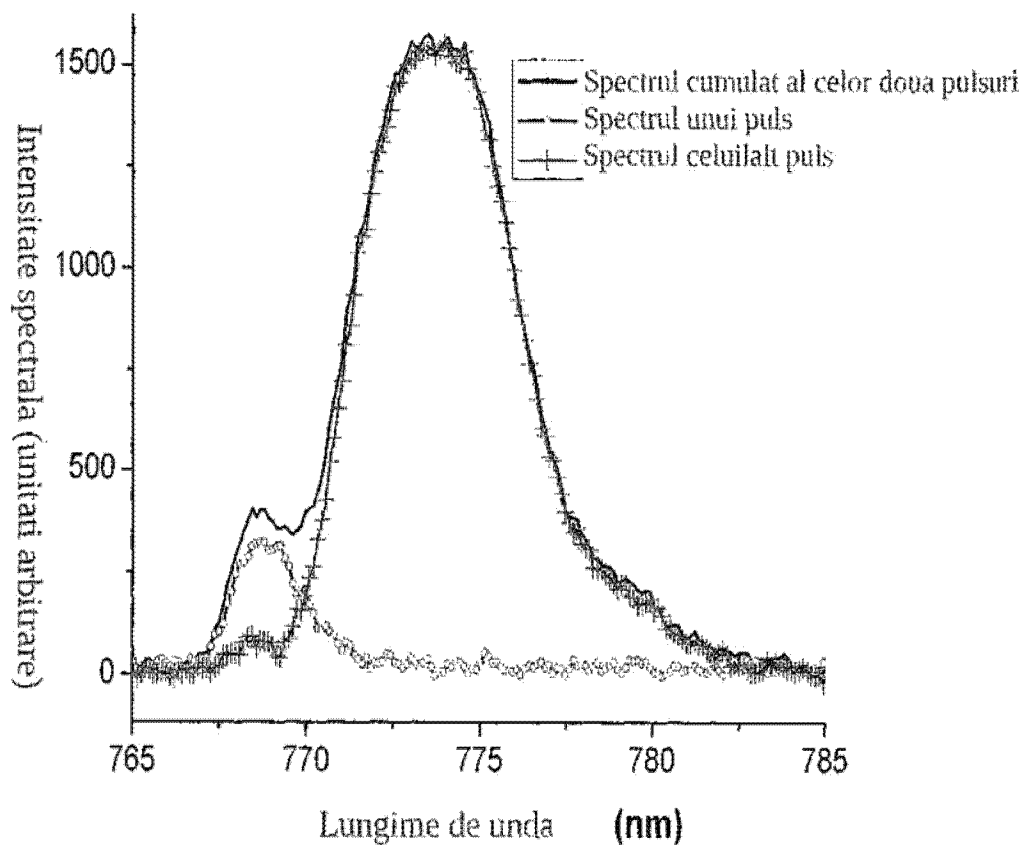


Fig. 5

