



(12)

## BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: **a 2011 00771**

(22) Data de depozit: **02/08/2011**

(45) Data publicării mențiunii acordării brevetului: **29/11/2017** BOPI nr. **11/2017**

(41) Data publicării cererii:  
**29/03/2013** BOPI nr. **3/2013**

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

(72) Inventatori:  
• **SPOREA DAN, ȘOS. PANTELIMON  
NR. 229, BL. 69, ET. 6, AP. 31, SECTOR 2,  
BUCUREȘTI, B, RO;**  
• **OPROIU CONSTANTIN, STR. TUNARI  
NR. 46C, AP. 1, SECTOR 2, BUCUREȘTI, B,  
RO;**

• **STÂNCĂLIE ANDREI, STR. VULCAN  
NR. 31-35, BL. 3A, ET. 7, AP. 47,  
SECTOR 3, BUCUREȘTI, B, RO;**  
• **SPOREA ADELINA, ȘOS. PANTELIMON  
NR. 229, BL. 69, ET. 6, AP. 31, SECTOR 2,  
BUCUREȘTI, B, RO;**  
• **CIUPITU MIRCEA, CALEA RAHOVEI  
NR. 321, BL. 28, SC. D, ET. 10, AP. 133,  
SECTOR 5, BUCUREȘTI, B, RO**

(56) Documente din stadiul tehnicii:  
**US 3790794; US 3096440; US 2003039579  
A1; RO 78032**

(54) **DOZIMETRU CALORIMETRIC CU FIBRĂ OPTICĂ**

Examinator: fizician **RADU ROBERT**



Orice persoană are dreptul să formuleze în scris și motivat,  
la OSIM, o cerere de revocare a brevetului de invenție, în  
termen de 6 luni de la publicarea mențiunii hotărârii de  
acordare a acesteia

**RO 128239 B1**

# RO 128239 B1

1 Inventția de referă la un dozimetru de tip calorimetric cu fibră optică, folosit pentru măsurarea dozei integral absorbite în cazul iradierii cu fascicule intense de particule accelerate.

3 În construcția acceleratoarelor de particule încărcate, și a surselor de iradiere, trebuie elaborate mijloace de măsură și metode pentru determinarea parametrilor fasciculului: energie, intensitate, distribuție spațială a câmpului de iradiere, valoarea dozei absorbite la suprafață și în adâncime de către materialul expus iradierii. Doza totală absorbită de un material iradiat cu un fascicul de particule accelerate depinde de compoziția, dimensiunile, densitatea și configurația materialului, de parametrii fasciculului: energie, intensitate, de existența unui sistem conveier pentru transportul materialelor în câmpul de iradiere, de existența unor mijloace de uniformizare sau intensificare a câmpului de radiații.

11 În dozimetria radiațiilor există trei metode standard de determinare a expunerii sau a dozei integrale absorbite, prezentate în continuare.

13 *Metoda calorimetrică* reprezintă singura metodă dozimetrică absolută prin care se măsoară direct cantitatea de energie absorbită de un material expus influenței câmpului de radiații, și transformată, prin efecte de excitare și ionizare, în căldură. Cantitatea de energie absorbită pentru producerea unor transformări chimice în sistemul iradiat poate genera erori în măsurări. Această metodă fiind o metodă absolută, este utilizată în special pentru calibrarea altor sisteme dozimetrice.

19 *Metoda ionometrică* are la bază principiul camerei de ionizare prin care se măsoară numărul de ioni produși de câmpul de radiații în aer sau în alt gaz. Curentul de ionizare se măsoară prin culegerea sarcinilor electrice generate de radiație în această cameră, cu ajutorul a doi electrozi între care se aplică o diferență constantă de potențial.

23 *Metoda chimică* prin care se determină mărimea schimbărilor radiochimice produse într-un material expus influenței câmpului de energia absorbită - dintre metodele chimice cele mai răspândite, soluția dozimetrică Fricke este recunoscută de toate laboratoarele, și reprezintă cea de-a treia metodă standard de calibrare a sistemelor dozimetrice.

27 Sunt cunoscute multe metode secundare, în care sunt incluse metode având la bază măsurarea anumitor efecte produse în diverse materiale expuse în câmp de radiații. Precizia de măsură a acestor metode nu este de prim ordin, dar ele oferă avantaje de manipulare și preț de cost redus, având contribuții importante în evaluarea activităților de iradiere. Un exemplu îl reprezintă determinarea distribuției de doză cu ajutorul filmului dozimetric.

33 Calorimetria poate fi utilizată pentru măsurarea dozei integral absorbite, determinând cantitatea de căldură generată de un material absorbant, presupunând că întreaga energie disipată de fascicul se transformă în căldură. Comparativ cu alte tipuri de dozimetre, în calorimetrie apar unele particularități ca, de exemplu, în cazul fasciculelor de electroni accelerați.

37 1. Iradierile cu fascicule de electroni sunt însoțite întotdeauna de variații rapide ale dozei la suprafața și în profunzimea materialului iradiat, în funcție de distribuția energetică a electronilor, și de configurația geometriei de iradiere. De aceea, pentru măsurări de precizie ale distribuției dozei sunt necesare calorimetre simple, de dimensiuni reduse, comparativ cu parcursul electronilor în material.

43 2. Existența unor impurități în compoziția materialului calorimetric influențează nivelul dozei măsurate și, din acest motiv, corpul calorimetric trebuie să fie realizat dintr-un material unic, fără incluziuni.

45 3. Majoritatea materialelor care prezintă structură moleculară suferă transformări chimice atunci când sunt expuse acțiunii câmpului de radiații. Un exemplu este apa, elementul chimic cel mai utilizat în calorimetrie, caz în care o parte a energiei cedate de fascicul va fi consumată pentru disocierea moleculelor în procesul de radioliză care se produce. Acest

# RO 128239 B1

consum energetic este mult diminuat în sistemele închise, comparativ cu cele deschise, datorită atingerii unui regim de saturație între radioliza inițială și reacția inversă, de formare a apei din H <sub>2</sub> și H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> . În acest caz, numai o fracțiune de procent din energia absorbită este consumată pentru reacția de radioliză.	1 3
În metale, cantitatea de energie consumată pentru a produce dislocări atomice este extrem de redusă, reprezentând aproximativ 0,001% din cantitatea de energie absorbită. Din acest motiv metalele pot fi utilizate pentru realizarea corpului calorimetric în dozimetria radiației de frânare și a fasciculelor de electroni.	5 7
Sunt cunoscute mai multe dozimetre folosite pentru măsurarea dozei totale la care este expus un obiect. În continuare vor fi prezentate câteva astfel de soluții.	9
Într-o astfel de realizare [US 4 381 450], un detector de radiație este cuplat la un circuit integrator, conectat, la rândul său, la un circuit de eșantionare, afișarea rezultatelor realizându-se cu un circuit de afișare. Această realizare are inconvenientul că semnalul util poate fi perturbat de radiația electromagnetică.	11 13
O altă implementare [US 4 413 184] folosește o fibră optică pentru a detecta prezența radiației ionizante și a măsura doza totală, prin determinarea intensității semnalului de luminescență generat la două lungimi de undă (450 nm și 650 nm) în fibra optică de radiația ionizantă. Dezavantajele acestei metode sunt:	15 17
- nu consideră modificările transmisiei fibrei optice ca urmare a expunerii sale la radiația ionizantă;	19
- nu consideră faptul că, în cazul unor particule accelerate (de exemplu, electroni), apare suprapusă peste semnalul de luminescență, în domeniul spectral UV-vizibil, o emisie optică datorată radiației Cerenkov, fapt care deteriorează raportul semnal-zgomot la detecția celor două emisii luminescente la 450 nm și 650 nm;	21 23
- prin construcția sa, invenția utilizează o lungime mare de fibră optică ce înconjoară zona în care există radiații ionizante, dozimetrul propus măsoară doza totală integrată pe toată lungimea de fibră optică, deci nu poate fi localizată spațial valoarea dozei totale măsurate.	25 27
O altă invenție [US 4 596 932] sugerează utilizarea unei camere de ionizare cuplată la un echipament de prelucrare a semnalului, în vederea dozimetriei radiațiilor ionizante. Dezavantajele acestei soluții constau în aceea că elementul de detecție are un volum semnificativ, astfel încât nu permite o bună rezoluție spațială. Un alt dezavantaj îl reprezintă faptul că măsurările și citirea rezultatelor nu pot fi realizate de la distanță.	29 31 33
O altă abordare a problemei [US 4 831 271] propune o monitorizare a dozei asociate unui fascicul de ioni, prin expunerea la acest fascicul a unui material pe bază de oxizi, a cărui culoare se modifică drept urmare a iradierii. Dezavantajul major al acestei invenții îl constituie faptul că evaluarea modificării culorii oxidului se realizează vizual, deci este complet subiectivă.	35 37
O altă soluție [US 4 999 504] propune măsurarea de la distanță a dozei, prin utilizarea unui fascicul laser pentru stimularea unei probe dintr-un material luminescent expus radiației ionizante. Ca urmare a acestei stimulări, materialul luminescent produce o radiație optică ce este detectată, cantitatea de radiație detectată fiind corelată cu doza totală primită de probă. Dezavantajele majore ale acestei metode sunt datorate complexității montajelor optice utilizate pentru transmiterea radiației laser de stimulare, și detecția radiației optice generate de materialul luminescent, ca și de faptul că echipamentul nu este portabil.	39 41 43 45
Un alt brevet [US 5 006 714] utilizează un material scintilator care, în urma iradierii, generează un semnal optic ce este cuplat, prin intermediul unui ghid de radiație optică, la un fotomultiplicator. În paralel cu ghidul de radiație optică ce conduce semnalul optic de la materialul scintilator, echipamentul include și un al doilea ghid pentru radiația optică, ce este folosit pentru a scădea din semnalul optic condus de primul ghid de radiație optică un semnal	47 49

# RO 128239 B1

1 optic egal cu fondul. Impedimentul pe care îl prezintă acest echipament este asociat faptului  
că ghidurile optice utilizate sunt și ele expuse radiației ionizante și, în acest fel, măsurările  
3 de semnal optic pot fi alterate de modificările de transmisie ale ghidurilor optice, sub acțiunea  
acestor radiații. În plus, acest dozimetru măsoară debitul dozei, și nu doza totală.

5 Un alt brevet [US 5 015 855] propune, ca și în cazul referinței [US 4 999 504], realiza-  
rea unui dozimetru pentru măsurarea dozei totale, prin utilizarea unui element dozimetric  
7 care, sub acțiunea radiației ionizante, stochează energie care este eliberată sub acțiunea  
unui fascicul laser. Dezavantajele majore ale acestei metode sunt datorate complexității  
9 montajelor optice utilizate pentru transmiterea radiației laser de stimulare, și detecția radiației  
optice generate de materialul luminescent, ca și de faptul că echipamentul nu este portabil.

11 O altă soluție [US 6 232 610 B1] propune realizarea unui dozimetru constituit prin  
asocierea unor straturi de material radiocromic, ce se colorează în urma expunerii la radiații  
13 ionizante. Modificările de culoare induse astfel sunt evaluate cu ajutorul unui spectrometru.  
Principalul dezavantaj al acestui dozimetru îl reprezintă faptul că necesită citirea modificării  
15 culorii cu un spectrometru, deci nu funcționează în timp real.

17 O altă implementare [US 6 583 421 B2] propune utilizarea unei cupe tip Faraday,  
care să colecteze sarcina depusă de fasciculul de particule încărcate, sarcină care, fiind citită  
cu un sistem de circuite electronice, este pusă în corespondență cu doza totală. Invenția are  
19 dezavantajul că prezintă rezoluție spațială redusă, determinată de dimensiunile cupei  
Faraday, și că nu poate funcționa ca un dozimetru pentru efectuarea unor măsurări la dis-  
21 tanță. În plus, instrumentul nu este imun la radiația electromagnetică, având circuite electro-  
nice expuse acestor câmpuri.

23 O variantă de realizare a unui dozimetru calorimetric [US 6 762 418 B2] presupune  
folosirea unui calorimetru cu termocuplu pentru citirea diferenței de temperatura rezultată în  
25 urma transferului de energie de la fasciculul de particule încărcate la calorimetru. În imple-  
mentarea descrisă, calorimetrul este deplasat de către o bandă transportoare, de la o poziție  
27 inițială, aflată în afara zonei de iradiere, într-o poziție în zona de iradiere unde calorimetrul  
este expus radiației ionizante. După iradiere, calorimetrul este readus de banda transpor-  
29 toare în poziția inițială. Prin intermediul unui termocuplu atașat calorimetrului se realizează  
citirea temperaturii calorimetrului înainte și după expunerea la radiații. Dezavantajul metodei  
31 propuse constă în aceea că măsurarea de temperatură, deci, implicit, evaluarea dozei totale  
nu se realizează în timp real, în intervalul de timp scurs între expunere și cea de a doua citire  
33 a valorilor indicate de termocuplu, calorimetrul își reduce prin convecție termică temperatura,  
apărând erori în determinarea dozei totale. În plus, instrumentul necesită prezența unui braț  
35 robotic prin intermediul căruia au loc citirile semnalului de la termocuplu. O soluție asemănă-  
toare celei prezentate anterior [US 5 015 855] utilizează metoda OSL (Optically Stimulated  
37 Luminescence) [US 6 936 830 B2], ce rezolvă problemele asociate suprapunerii peste  
semnalul util de luminescență stimulată, a radiației Cerenkov și a fluorescenței induse de  
39 radiația ionizantă în fibra optică, dar, prin faptul că operează în regim de echilibru între pro-  
cesul de iradiere și luminescență stimulată cu laser, are o dinamică a semnalului util foarte  
41 mică, maximum un ordin de mărime.

43 O variantă de realizare [US 7 439 524 B2] indică utilizarea fenomenului de stimulare  
optică sub acțiunea energiei termice, prin care un material luminescent acumulează energie  
pe durata expunerii la o radiație ionizantă, și eliberează această energie sub formă de lumi-  
45 nescență când este încălzit. Invenția propune în principiu două abordări majore de interes:  
cazul în care încălzirea materialului luminescent și citirea semnalului de luminescență se  
47 realizează direct, și cazul în care cele două operații se realizează prin intermediul unor fibre  
optice. În primul caz, dezavantajul este că măsurarea dozei totale nu se poate face de la  
49 distanță, iar în cel de-al doilea caz, măsurarea dozei este perturbată, după cum s-a arătat  
mai sus, de radiația Cerenkov și emisia de fluorescență din fibrele optice de conexiuni.

# RO 128239 B1

Un alt brevet [US 2010/0069749 A1] descrie o variantă de realizare a dozimetrului conform căreia un material luminescent este montat la extremitatea unei fibre optice. La expunerea acestui material la o radiație ionizantă este generat un semnal optic de luminescență care este cuplat, prin intermediul fibrei optice, la un sistem de detecție a semnalului optic. Materialul luminescent, conform invenției, emite un semnal optic în domeniul UV al spectrului optic. O fibră optică suplimentară este folosită pentru a compensa, prin măsurări diferențiate, semnalul parazit care apare la detecție. Dezavantajul acestei soluții constă în aceea că nu prezintă nicio posibilitate de compensare a atenuării induse în cele două fibre optice de către iradierea cu radiație ionizantă, știut fiind că expunerea fibrelor optice la astfel de radiații generează centri de culoare numeroși, în special în domeniul UV. În acest fel, rezultatul măsurării este viciat de creșterea atenuării fibrei optice ca urmare a formării centrilor de culoare amintiți, fapt care denaturează amplitudinea semnalului de luminescență detectat. În plus, instrumentul descris în acest brevet nu măsoară doza totală.

În alegerea celei mai avantajoase metode calorimetrice pentru dozimetria fasciculelor de particule încărcate accelerate, în contextul prezentei invenții, trebuie avute în vedere câteva considerente practice. Este vorba în primul rând de alegerea unor dispozitive care să permită, pe de o parte, penetrația cu ușurință a fasciculului de particule (de exemplu, fascicul de electroni cu energie medie cuprinsă în domeniul 2...10 MeV) către corpul calorimetric activ, și, pe de altă parte, să asigure o izolare termică eficientă a corpului calorimetric activ față de mediul înconjurător.

Doza medie integral absorbită (D) în corpul calorimetric se determină cu ajutorul următoarei relații:

$$\Delta D \text{ (kGy)} = 10 \cdot K \cdot \Delta T \text{ (}^\circ\text{C)}, \quad (1)$$

unde:  $\Delta T$  reprezintă variația de temperatură a corpului calorimetric la expunerea în fasciculul de particule, iar K este constanta caracteristică a calorimetrului:

$$K = \frac{\sum m_i c_i}{2,389 \sum m_i s_i} \quad (2)$$

în care:  $m_i$  este masa în grame a componentului i al calorimetrului;  $c_i$  - căldura specifică (cal/g\*grad) a componentului i față de apă;  $s_i$  - raportul puterii de oprire a componentului i față de apă. Factorul 2,389 reprezintă numărul de calorii echivalent la  $1\text{g} \cdot 10^4$  Gy sau  $1\text{g} \cdot 10^8$  erg.

Problema tehnică pe care o rezolvă invenția constă în măsurarea în timp real, de la distanță, a dozei integral absorbite în cazul iradierii cu fascicule de particule încărcate.

Dozimetrul calorimetric cu fibră optică, conform invenției, este compus dintr-un calorimetru care funcționează în regim cvasiadiabatic, a cărui variație de temperatură, datorată expunerii sale la un fascicul de particule încărcate accelerate, determină modificarea unei lungimi de undă centrale a unei rețele de difracție Bragg, fenomen sesizat prin intermediul unui semnal optic generat de o sursă optică, și detectat de un echipament de detecție, semnalul optic fiind transmis prin intermediul unei fibre optice, fibră optică în care este realizată o rețea de difracție Bragg, localizată în interiorul calorimetrului.

Dozimetrul se bazează pe utilizarea unui senzor intrinsec cu fibră optică, de tipul unei rețele de difracție Bragg, pentru măsurarea variației de temperatură produsă ca urmare a transferului de energie de la fasciculul de particule accelerate către un corp calorimetric din grafit, separat față de mediul înconjurător de o incintă din spumă de polistiren, izolatoare termic, variație de temperatură evidențiată ca modificare a lungimii de undă nominale a rețelei de difracție Bragg, modificare determinată cu ajutorul unui echipament de spectroscopie optică la care este atașată fibra optică.

# RO 128239 B1

1           Avantajul principal al dozimetruului calorimetric cu fibră optică, conform invenției, față  
de dispozitivele descrise în conformitate cu stadiul tehnicii descris anterior, constă în faptul  
3           că permite măsurarea în timp real, de la distanță, a dozei integral absorbite în cazul iradierii  
cu un fascicul de particule încărcate. Un alt avantaj al dozimetruului calorimetric cu fibră optică  
5           îl constituie faptul că este imun la radiația electromagnetică prezentă în zona de funcționare  
a acceleratoarelor de particule încărcate. Un avantaj suplimentar este conferit de imunitatea  
7           sistemului față de semnalul optic parazit (radiație Cerenkov și/sau radiație de fluorescență)  
care apare în fibrele optice iradiate. Un avantaj important al dozimetruului calorimetric cu fibră  
9           optică este că imunitatea acestuia la degradarea transmisiei optice, degradare care apare  
în condițiile în care fibrele optice sunt iradiate. Un alt avantaj se referă la faptul că permite  
11          măsurări ale dozei integral absorbite cu rezoluție spațială ridicată și cu sensibilitate ridicată.  
Un alt avantaj major al soluției propuse este conferit de gama sa dinamică mare, de trei  
13          ordine de mărime, pentru determinarea dozei integral absorbite, prin echivalarea acestei  
doze cu măsurări de temperatură. Un alt avantaj al dozimetruului calorimetric cu fibră optică  
15          îl constituie faptul că este portabil. Toate aceste avantaje vor fi ilustrate pe parcursul des-  
crierii dozimetruului calorimetric cu fibră optică.

17          Fig. 1 prezintă principiul de funcționare a unui senzor cu fibră optică având rețea de  
difracție tip Bragg.

19          Fig. 2 ilustrează stabilitatea în raport cu iradierea folosind fascicule de particule  
încărcate, a caracteristicii de transfer a unui senzor cu fibră optică având rețea Bragg.

21          În fig. 3 este reprodus un detaliu al caracteristicii de transfer a unui senzor cu fibră  
optică având rețea de difracție tip Bragg, înainte și după iradierea cu un fascicul de electroni  
23          accelerați.

25          Un exemplu de realizare a dozimetruului calorimetric cu fibră optică este prezentat în  
fig. 4, unde sunt ilustrate componentele sale constitutive și modul lor de asamblare, în cazul  
utilizării unui echipament de spectroscopie optică tip integrator cu funcționare prin reflexie.

27          În fig. 5 este prezentat în detaliu principiul calorimetruului cu fibră optică.

29          Fig. 6 redă variația în timp a temperaturii în cazul unui calorimetru cvasiadiabatic.

31          În fig. 7 este prezentată reproductibilitatea măsurărilor realizate cu dozimetruul calori-  
metric cu fibră optică, pentru cazul a trei iradieri repetate cu doze integral absorbite de câte  
2 kGy.

33          Fig. 8 ilustrează linearitatea bună și gama dinamică mare a dozimetruului calorimetric  
cu fibră optică, prin modificarea valorii lungimii de undă centrale a semnalului reflectat de  
rețeaua Bragg, în cazul unei doze integral absorbite de 8 kGy (marcată cu  $\Delta\lambda_{0,8}$ ), și al unei  
35          doze integral absorbite de 16 kGy (marcată cu  $\Delta_0\lambda_{1,6}$ ).

37          În fig. 9 este prezentat un exemplu de realizare a dozimetruului calorimetric cu fibră  
optică, în cazul utilizării unui echipament de spectroscopie optică tip integrator cu funcționare  
prin transmisie.

39          În fig. 10 este indicat un exemplu de realizare a dozimetruului calorimetric cu fibră  
optică, în cazul utilizării unui echipament de spectroscopie optică tip spectrometru.

41          În fig. 11 este ilustrat un exemplu de realizare a dozimetruului calorimetric cu fibră  
optică, în cazul utilizării unui echipament de spectroscopie optică tip analizor de spectru. Se  
43          dau în continuare câteva exemple de realizare a invenției.

45          Principiul de funcționare a unei rețele de difracție de tip Bragg este explicat în legătură  
cu fig. 1. O rețea **4** de difracție Bragg, realizată prin metode cunoscute în zona centrală  
(core) a fibrei **3** optice, reprezintă o modificare spațială periodică, în lungul axei fibrei optice,  
47          a indicelui de refracție a materialului acesteia. În cazul în care este injectat un semnal optic  
 $\lambda_1$  de bandă spectrală largă la una dintre extremitățile fibrei **3** optice, acest semnal se pro-  
49          pagă în interiorul fibrei **3** optice până în zona unde este localizată rețeaua **4** de difracție

Bragg. În acest moment au loc două procese: o parte din semnalul optic injectat se propagă sub forma unui semnal reflectat  $\lambda_2$  către o extremitate a fibrei **3** optice unde a avut loc injecția, iar restul de semnal optic se propagă ca semnal optic transmis  $\lambda_3$  către extremitatea opusă a fibrei **3** optice. Caracteristicile: lungimea de undă centrală  $\lambda_c$ , lărgimea spectrală de bandă (FBHW) și amplitudinea semnalului **A** ale celor două semnale, reflectat  $\lambda_2$  și transmis  $\lambda_3$ , identificate în fig. 3, depind de caracteristicile constructive ale rețelei **4** de difracție Bragg. Semnalul optic  $\lambda_1$  injectat în fibra **3** optică este generat de o sursă **1** optică. Semnalul optic reflectat  $\lambda_2$  este detectat cu ajutorul unui echipament **2** de detecție, iar semnalul optic transmis  $\lambda_3$  este detectat cu ajutorul unui al doilea echipament **5** de detecție. În conformitate cu cele cunoscute din literatura de specialitate, lungimea de undă centrală  $\lambda_c$  a semnalului optic reflectat  $\lambda_2$  sau a celui transmis  $\lambda_3$  variază în funcție de temperatura la care se găsește rețeaua **4** de difracție Bragg. Lărgimea de bandă spectrală (FBHW) a semnalului optic reflectat  $\lambda_2$  și a celui transmis  $\lambda_3$  nu sunt influențate de temperatura la care se găsește rețeaua de difracție Bragg **4**. Amplitudinea **A** semnalelor optice provenind de la rețeaua de difracție Bragg  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  nu se modifică la modificarea temperaturii la care se găsește rețeaua de difracție Bragg **4**. Prin acest mod de operare, rețeaua de difracție Bragg **4** realizată în fibra optică **3** este utilizată pentru măsurarea temperaturii la care se găsește aceasta, în urma determinării modificării lungimii de undă centrală  $\lambda_c$  a unuia dintre semnalele optice  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ .

În vederea utilizării rețelei de difracție Bragg pentru măsurarea dozei integral absorbite pe durata iradierii cu un fascicul accelerat de particule încărcate, au fost realizate încercări pentru a constata stabilitatea caracteristicilor rețelei - lungime de undă centrală  $\lambda_c$ , lărgime de bandă spectrală (FBHW), amplitudinea semnalului **A** în cazul iradierii rețelei de difracție Bragg cu un fascicul de electroni accelerați. Rezultatul este prezentat în fig. 2, pentru un spectru al semnalului optic de reflexie  $\lambda_2$  de o rețea **4** de difracție Bragg în urma iradierii cu o doză integral absorbită de 108 kGy, pentru domeniul spectral 1510...1590 nm. În fig. 3 este indicat un detaliu al imaginii din fig. 2, respectiv, maximum semnalului optic de reflexie  $\lambda_2$ . Determinările au fost realizate măsurând semnalul reflectat de către rețeaua **4** de difracție Bragg înainte și după iradierea cu o doză integral absorbită de 108 kGy, în ambele cazuri rețeaua **4** de difracție Bragg realizată în fibra **3** optică fiind menținută într-o etuvă izolată termic, la temperatura de 60°C. În acest fel, modificările care ar fi putut să apară, referitoare la valoarea lungimii de undă centrale  $\lambda_c$  a semnalului optic reflectat de rețeaua de difracție Bragg **4**, s-ar datora numai iradierii acesteia, și nu modificării temperaturii sale. Se poate observa că iradierea cu un fascicul de electroni accelerați până la o doză integral absorbită mare de 108 kGy nu produce modificări ale caracteristicilor rețelei **4** de difracție Bragg. Deci aceasta poate fi expusă fasciculelor de particule încărcate accelerate, fără a se degrada.

Un exemplu de realizare a unui dozimetru calorimetric cu fibră optică este prezentat în fig. 4, în cazul utilizării unui echipament **6** de spectroscopie optică tip integrator cu funcționare prin reflexie. Fibra **3** optică în care este realizată rețeaua **4** de difracție Bragg este cuplată la una dintre extremități la un echipament **6** de spectroscopie optică tip integrator, fibra optică **3** fiind montată în interiorul calorimetrului **10**, calorimetru care este expus unui fascicul **11** de particule încărcate accelerate. Un detaliu de realizare a calorimetrului **7** este prezentat în fig. 5, construit pentru a funcționa în regim cvasiadiabatic. Calorimetrul este format dintr-un corp **15** calorimetric, sub forma unui paralelogram de grafit ce are dimensiuni reduse, și care este izolat termic față de mediul înconjurător de un paralelipiped din polistiren **14** expandat, având grosimea convenabil aleasă pentru a realiza izolarea termică a corpului calorimetric și, în același timp, să asigure trecerea cu ușurință a electronilor având o energie

# RO 128239 B1

1 de câțiva MeV spre corpul **15** calorimetric. Corpul calorimetric permite montarea în interiorul  
său a porțiunii din fibra **3** optică unde este localizată rețeaua **4** de difracție Bragg, fibra **3** optică  
3 având montate la cele două extremități conectoare **9** fixe. În momentul iradierii calorimetrului  
**10** cu un fascicul **11** de particule accelerate încărcate (de exemplu, electroni), energia  
5 particulelor este transferată corpului **15** calorimetric care, fiind din grafit, își crește temperatura  
și transmite această variație de temperatură rețelei **4** de difracție Bragg. Izolația din polistiren  
7 **14** expandat asigură menținerea constantă a temperaturii corpului **15** calorimetric pe durata  
măsurării și, în acest fel, se asigură precizia ridicată a determinării. Un echipament **6** de  
9 spectroscopie optică tip integrator, prevăzut cu un emițător **8** optic acordabil, transmite, prin  
intermediul unui comutator **12** pentru fibre optice, un semnal optic în infraroșu, în lungul fibrei  
11 **3** optice care este cuplată, prin intermediul unui conector **9** fix, la un port **13** al său de ieșire.  
Semnalul optic transmis de echipamentul de spectroscopie optică tip integrator **6** este baleiat  
13 în domeniul lungimilor de undă astfel încât să acopere domeniul spectral corespunzător rețelei  
**4** de difracție Bragg, din fibra **3** optică. Conform prezentei realizări a invenției, în momentul  
15 în care distribuția spectrală a semnalului optic transmis de către echipamentul **6** de spectro-  
scopie optică tip integrator corespunde cu distribuția spectrală caracteristică rețelei **4** de difracție  
17 Bragg, o parte din el este reflectat  $\lambda_2$  de rețeaua **4** de difracție Bragg, iar o parte este transmis  
 $\lambda_3$ , conform fig. 1. Semnalul optic reflectat  $\lambda_2$  este cuplat, prin același port **13** de ieșire și un  
19 comutator **12** pentru fibre optice, la un detector **7** pentru semnale optice în infraroșu, montat  
în interiorul echipamentului **6** de spectroscopie optică, tip integrator. Comutatorul **12** pentru  
21 fibre optice, din interiorul echipamentului **6** de spectroscopie optică tip integrator, are rolul de  
a separa semnalul emis de cel recepționat, având în vedere că se utilizează același port **13**  
23 de intrare pentru ambele semnale. Prin baleierea lungimii de undă a semnalului optic de  
infraroșu, realizată cu emițătorul **8** optic acordabil, și prin detectarea corespunzătoare a  
25 semnalului optic reflectat  $\lambda_2$  cu ajutorul detectorului **7** pentru semnale optice în infraroșu, echipa-  
mentul de spectroscopie optică tip integrator **6** generează o caracteristică asemănătoare celei  
27 prezentate în fig. 2 și 3, din care poate fi determinată variația lungimii de undă centrală  $\lambda_c$  a  
radiației optice reflectate  $\lambda_2$ . Creșterea temperaturii rețelei de difracție Bragg **4** conduce la  
29 modificarea valorii lungimii de undă centrale  $\lambda_c$  a semnalului optic reflectat  $\lambda_2$  detectat de  
echipamentul **6** de spectroscopie optică tip integrator. Corespondența dintre variația temperaturii  
31 rețelei **4** de difracție Bragg și modificarea lungimii de undă centrale  $\lambda_c$  a semnalului optic reflectat  
 $\lambda_2$  se realizează prin etalonarea sistemului format din echipamentul **6** de spectroscopie optică  
33 tip integrator și fibra optică **3**, care include rețeaua **4** de difracție Bragg, folosind o etuvă  
termostată, având temperatura controlată.

35 Funcționarea dozimetrului calorimetric cu fibră optică este de tip cvasiadiabatic,  
variația în timp a temperaturii la nivelul rețelei **4** de difracție Bragg corespunzând graficului  
37 din fig. 6. În figură se disting trei domenii de variație în timp a temperaturii. În intervalele I și  
III rețeaua de difracție Bragg **4** urmărește schimbul termic dintre corpul calorimetric **15** și  
39 mediu, în absența iradierii. În intervalul II, corpul calorimetric absoarbe o energie  $Q$  în inter-  
valul de timp  $t = t_b - t_a$ , rezultând o variație de temperatură a acestuia  $\Delta T = T_B - T_A$ . Adevărata  
41 variație de temperatură pentru cazul adiabatic ideal se obține prin extrapolarea în regiunea  
II a zonei liniare a curbei caracteristice din regiunile I și III, presupunând că întreaga energie  
43 este absorbită instantaneu la momentul  $t_x$ . Dreapta  $T'_B T'_A$  trebuie astfel trasată încât ariile  
 $T_A T'_A M$  și  $T_B T'_B M$  să fie egale. Graficul din fig. 6 este folosit pentru corectarea temperaturii  
45 determinate prin citirea variației lungimii de undă centrale  $\lambda_c$  a radiației optice reflectate **4**,  
astfel încât dozimetrul calorimetric cu fibră optică, conform invenției, să poată fi echivalat cu  
47 un calorimetru adiabatic ideal.



# RO 128239 B1

Încercările efectuate cu dozimetrul calorimetric cu fibră optică au indicat o reproductibilitate mai bună de 2% (fig. 7) a relației dintre doza integral absorbită de corpul **15** calorimetric și modificarea lungimii de undă centrale  $\lambda_c$ , determinată cu ajutorul echipamentului **6** de spectroscopie optică tip integrator. 1  
3

Linearitatea bună a răspunsului dozimetrului calorimetric cu fibră optică, precum și dinamica semnalului asociat variației lungimii de undă centrale  $\lambda_c$  sunt demonstrate de datele experimentale prezentate în fig. 8. 5  
7

Semnalul util corespunzător modificărilor lungimii de undă centrale  $\lambda_c$ , detectate cu echipamentul **6** de spectroscopie optică tip integrator, modificări proporționale cu doza integral absorbită de corpul **15** calorimetric, se obține prin diferența dintre vârful semnalului  $S_v$  corespunzător iradierii și semnalul corespunzător palierului  $S_p$  anterior lui, corespunzător duratei cât nu are loc iradierea (fig. 7 și 8). Măsurările efectuate au demonstrat o dinamică de trei ordine de mărime (între  $10^2$  Gy și  $10^5$  Gy). 9  
11  
13

Etalonarea dozimetrului calorimetric cu fibră optică se poate realiza fie prin compararea cu un calorimetru etalon, fie prin calcul folosind formulele (1) și (2), în cazul în care se cunosc mărimile  $m_i$ ,  $c_i$ , și  $s_i$ , pentru materialele care alcătuiesc calorimetrul. 15

Un alt exemplu de realizare a unui dozimetrului calorimetric cu fibră optică este prezentat în fig. 9, caz în care o fibră **3** optică, folosită pentru măsurarea variației de temperatură a unui calorimetru **10**, ca urmare a iradierii cu fascicule **11** de particule încărcate, este montată astfel încât rețeaua de difracție Bragg **4** realizată în fibra **3** optică să se afle în interiorul corpului calorimetric **15** de grafit, fibra optică **3** fiind cuplată cu o extremitate, prin intermediul unui conector **9** fix și al unui port **13** de ieșire, aparținând unui echipament **6** de spectroscopie optică tip integrator, la un emițător **8** optic acordabil, iar cu cealaltă extremitate este conectată, după ce trece printr-un dispozitiv **16** circulator, pentru fibre optice, prin intermediul unui conector **9** fix, la un port **17** de intrare, al unui echipament **6** de spectroscopie optică tip integrator, unde se găsește un detector **7** de radiație optică infraroșie. Conform acestui exemplu de realizare, dozimetrul calorimetric cu fibră optică funcționează prin transmisie, conform principiului prezentat în fig. 1. Prin baleierea lungimii de undă a radiației optice infraroșii emise de emițătorul **8** optic acordabil, și detectarea corespunzătoare, cu ajutorul detectorului **7** de radiație infraroșie, a semnalului optic transmis  $\lambda_s$  de rețeaua de difracție Bragg **4**, se generează o caracteristică ce este complementară celei prezentate în fig. 2 și 3, conform fig. 1, din care poate fi determinată variația lungimii de undă centrale  $\lambda_c$  a radiației optice transmise  $\lambda_s$ , variație datorată creșterii de temperatură a corpului **15** calorimetric ca urmare a iradierii sale. În acest exemplu de realizare a invenției, între una dintre extremitățile fibrei **3** optice și portul **17** de intrare al echipamentului **6** de spectroscopie optică tip integrator a fost intercalat un dispozitiv **16** circulator, pentru a separa la detecție semnalul transmis  $\lambda_s$  de semnalul emis la nivelul portului de intrare. 17  
19  
21  
23  
25  
27  
29  
31  
33  
35  
37

În fig. 10 este dat un exemplu de realizare a unui dozimetru calorimetric cu fibră optică, pentru cazul în care semnalul transmis de rețeaua de difracție Bragg **4** este detectat cu ajutorul unui minispectrometru **18** cu fibre optice. O sursă **19** optică de bandă largă emite un semnal optic ce este cuplat prin intermediul unui conector **9** fix la o fibră **3** optică, ce are realizată în interiorul ei o rețea de difracție Bragg, rețea de difracție montată în interiorul unui corp **15** calorimetric al unui calorimetru **10**. Cealaltă extremitate a fibrei optice este cuplată, prin intermediul unui conector **9** fix, la intrarea unui minispectrometru **18** cu fibre optice. Minispectrometrul **18** cu fibre optice are în interior o rețea lineară de detectoare optice **20**, care permit generarea unui semnal care să reproducă distribuția spectrală a semnalului cuplat la intrarea sa. Minispectrometrul **18** cu fibre optice detectează radiația optică transmisă  $\lambda_s$  de rețeaua de difracție Bragg, și generează o caracteristică ce este complementară 39  
41  
43  
45  
47

# RO 128239 B1

1 celei prezentate în fig. 2 și 3, conform principiului de funcționare prezentat în fig. 1. Din  
această caracteristică poate fi determinată variația lungimii de undă centrale  $\lambda_c$  a radiației  
3 optice transmise  $\lambda_3$ , variație datorată creșterii de temperatură a corpului **15** calorimetric, ca  
urmare a iradierii sale.

5 Un alt exemplu de realizare a unui dozimetru calorimetric cu fibră optică este pre-  
zentat în fig. 11. Principiul de funcționare este tot prin transmisie, ca și în soluția ilustrată în  
7 fig. 10. Deosebirea între cele două realizări constă în faptul că, în prezenta implementare,  
minispectrometrul **18** cu fibră optică este înlocuit de un analizor **21** de spectru optic. Anali-  
9 zorul de spectru optic are un singur detector **22**, caracteristica spectrală a semnalului optic  
transmis de rețeaua de difracție Bragg **4** se obține în acest caz prin baleierea spectrului cu  
11 ajutorul unui element **23** dispersiv. Ca și în cazul minispectrometrului cu fibre optice, și în  
această realizare se obține o caracteristică ce este complementară celei prezentate în fig. 2  
13 și 3, principiul de funcționare fiind cel de transmisie de către rețeaua de difracție a unei  
radiații optice (fig. 1). Din această caracteristică poate fi determinată variația lungimii de undă  
15 centrale  $\lambda_c$  a radiației optice transmise  $\lambda_3$ , variație datorată creșterii de temperatură a corpului  
calorimetric **15** ca urmare a iradierii sale.

17 Sensibilitatea ridicată a rețelei **4** de difracție Bragg la variații foarte mici (de  $0,01^\circ\text{C}$ )  
de temperatură permite măsurări foarte precise ale unor valori mici (de 100 Gy) ale dozei  
19 integral absorbite, ideal pentru domeniul iradierilor tehnologice curente. Utilizarea unei fibre  
optice **3** pentru determinarea temperaturii corpului **15** calorimetric prin sesizarea modificărilor  
21 intervenite în lungimea de undă centrală  $\lambda_2$  a radiației optice reflectate  $\lambda_2$  sau transmise  $\lambda_3$   
asigură măsurarea de la distanță a unei mărimi aflată în relație de proporționalitate cu doza  
23 integral absorbită de corpul **15** calorimetric, ca urmare a iradierii cu particule încărcate  
accelerate **11**.

25 Folosirea fibrei **3** optice pentru detectarea modificărilor de temperatură ale corpului  
**15** calorimetric garantează și imunitatea dozimetruului la radiația electromagnetică asociată  
27 acceleratoarelor de particule încărcate. Prin utilizarea unei radiații optice infraroșii emise  $\lambda_1$ ,  
respectiv, recepționate  $\lambda_2$  sau transmise  $\lambda_3$  de un echipament **6** de spectroscopie optică tip  
29 integrator, se obține imunitatea dozimetruului calorimetric cu fibra optică față de semnalul optic  
parazit, datorat radiației Cerenkov și a radiației de fluorescență, având în vedere faptul că  
31 aceste radiații sunt localizate în domeniul UV și vizibil al spectrului optic, deci sunt separate  
de radiația optică purtătoare de informație utilă, care este în domeniul infraroșu al spectrului  
33 optic.

35 Experimentele realizate cu dozimetruul calorimetric cu fibră optică sub forma unor  
iradiere cu fascicul de electroni accelerați, și ilustrate în fig. 2 și 3, demonstrează imunitatea  
dozimetruului față de degradarea transmisiei optice a fibrelor optice iradiate, având în vedere  
37 faptul că amplitudinea semnalului optic **A** reflectat nu se modifică după o iradiere cu o doză  
integral absorbită de până la 108 kGy.

39 Dimensiunile mici ale rețelei **4** de difracție Bragg, de câțiva milimetri lungime, și de  
circa 0,3 mm diametru, asigură rezoluția spațială foarte bună a dozimetruului.

41 Comutarea rapidă între semnalul optic emis  $\lambda_1$  de echipamentul **6** de spectroscopie  
optică tip integrator, și cel detectat  $\lambda_2$  de către acesta, ca urmare a reflexiei în regiunea unde  
43 se găsește rețeaua **4** de difracție Bragg, baleiajul rapid al lungimii de undă, realizat de echi-  
pamentul **6** de spectroscopie optică tip integrator sau de analizorul **21** de spectru, ca și gene-  
45 rarea practic instantanee a spectrului de către minispectrometrul **18** cu fibră optică fac posi-  
bilă funcționarea în timp real a dozimetruului, considerând variația mult mai lentă a tempe-  
47 raturii corpului **15** calorimetric.

49 Dozimetruul calorimetric cu fibră optică folosește, în toate exemplele de realizare pre-  
zentate, surse de radiație optică și echipamente de detecție ușor de transportat, astfel încât,  
în ansamblul lui, dozimetruul este un instrument portabil.

1. Dozimetru calorimetric cu fibră optică, ce permite măsurarea de la distanță a dozei integral absorbite, **caracterizat prin aceea că** este compus dintr-un calorimetru (10) care funcționează în regim cvasiadiabatic, o fibră (3) optică în care este realizată o rețea (4) de difracție Bragg, localizată în interiorul calorimetrului (10), a cărei variație de temperatură, datorată expunerii sale la un fascicul (11) de particule încărcate accelerate, determină modificarea unei lungimi de undă centrale ( $\lambda_c$ ) a rețelei (4) de difracție Bragg, fenomen sesizat prin intermediul unui semnal optic ( $\lambda_1$ ) generat de o sursă (1) optică prin intermediul fibrei (3) optice, și detectat de niște echipamente (2, 5) de detecție. 3
2. Dozimetru calorimetric, conform revendicării 1, **caracterizat prin aceea că** fibra (3) optică este folosită pentru a conecta calorimetrul (10), iar sursa (1) optică și echipamentele (2, 5) de detecție sunt folosite astfel încât semnalul transmis să nu fie perturbat de radiația electromagnetică asociată acceleratoarelor de particule. 5
3. Dozimetru calorimetric, conform revendicării 1, **caracterizat prin aceea că** utilizează radiație optică infraroșie, pentru ca semnalul transmis în lungul fibrei (3) optice să nu fie perturbat de radiația Cerenkov și cea de fluorescență, care apar în fibrele optice la iradierea cu fascicule (11) de particule încărcate accelerate. 7
4. Dozimetru calorimetric, conform revendicării 1, **caracterizat prin aceea că** utilizează, ca mărime asociată variațiilor de temperatură a calorimetrului (10) iradiat cu fascicule (11) de particule încărcate, modificarea lungimii de undă centrale ( $\lambda_c$ ) a rețelei (4) de difracție Bragg. 9
5. Dozimetru calorimetric, conform revendicării 1, **caracterizat prin aceea că** respectivul calorimetru (10) este alcătuit dintr-un corp (15) calorimetric de grafit, izolat termic de un paralelipiped (14) de polistiren expandat, și având montat în interiorul corpului (15) calorimetric rețeaua (4) de difracție Bragg, realizată în fibra (3) optică. 11
6. Dozimetru calorimetric, conform revendicării 1, **caracterizat prin aceea că** utilizează, pentru detecția modificărilor lungimii de undă centrale ( $\lambda_c$ ) ale rețelei (4) de difracție Bragg, modificări datorate creșterii temperaturii corpului (15) calorimetric, ca urmare a iradierii acestuia, un echipament (6) de spectroscopie optică tip integrator, prevăzut cu un emițător (8) optic acordabil, ce realizează un baleiaj spectral al semnalului optic de infraroșu ( $\lambda_1$ ) care este transmis, prin intermediul fibrei (3) optice, către rețeaua (4) de difracție Bragg, și un detector (7) pentru semnale optice în infraroșu, care detectează semnalul optic reflectat ( $\lambda_2$ ) de rețeaua (4) de difracție Bragg. 13
7. Dozimetru calorimetric, conform revendicării 1, **caracterizat prin aceea că** utilizează, pentru detecția modificărilor lungimii de undă centrale ( $\lambda_c$ ) ale rețelei de difracție Bragg (4), modificări datorate creșterii temperaturii corpului (15) calorimetric, ca urmare a iradierii acestuia, echipamentul (6) de spectroscopie optică tip integrator, prevăzut cu emițătorul (8) optic acordabil, ce realizează un baleiaj spectral al semnalului optic de infraroșu ( $\lambda_1$ ), ce este transmis, prin intermediul fibrei (3) optice, către rețeaua (4) de difracție Bragg, un dispozitiv (16) circulator și detectorul (7) pentru semnale optice în infraroșu, care detectează semnalul optic transmis ( $\lambda_3$ ) de rețeaua (4) de difracție Bragg. 15
8. Dozimetru calorimetric, conform revendicării 1, **caracterizat prin aceea că** utilizează, pentru detecția modificărilor lungimii de undă centrale ( $\lambda_c$ ) ale rețelei (4) de difracție Bragg, modificări datorate creșterii temperaturii corpului (15) calorimetric, ca urmare a iradierii acestuia, o sursă (19) optică de bandă largă, ce emite un semnal optic ( $\lambda_1$ ), care este 17

# RO 128239 B1

1 cuplată, prin intermediul unui conector (9) fix, la fibra (3) optică ce are realizată în interiorul  
ei rețeaua (4) de difracție Bragg, și un minispectrometru (18) cu fibre optice, prevăzut cu o  
3 rețea (20) lineară de detectoare, care generează o caracteristică specifică semnalului optic  
transmis ( $\lambda_3$ ) de rețeaua (4) de difracție Bragg.

5 9. Dozimetru calorimetric, conform revendicării 1, **caracterizat prin aceea că** utili-  
zează, pentru detecția modificărilor lungimii de undă centrale ( $\lambda_c$ ) ale rețelei (4) de difracție  
7 Bragg, modificări datorate creșterii temperaturii corpului (15) calorimetric, ca urmare a  
iradierii acestuia, sursa (19) optică de bandă largă, pentru a emite un semnal optic ( $\lambda_1$ ), care  
9 este cuplată, prin intermediul conectorului (9) fix, la fibra (3) optică ce are realizată în interio-  
rul ei rețeaua (4) de difracție Bragg, și un analizor de spectru (21) optic, prevăzut cu un  
11 sistem de baleiaj al spectrului optic, care generează o caracteristică specifică semnalului  
optic transmis ( $\lambda_3$ ) de rețeaua (4) de difracție Bragg.

13 10. Dozimetru calorimetric, conform revendicării 1, **caracterizat prin aceea că**  
rețeaua (4) de difracție Bragg este o rețea cu sensibilitate, linearitate și gamă dinamică mari.

15 11. Dozimetrul calorimetric, conform revendicării 1, **caracterizat prin aceea că**  
rețeaua (4) de difracție Bragg este de dimensiuni mici, pentru a măsura punctual doza inte-  
17 gral absorbită în cazul iradierii cu fascicule (11) de particule încărcate accelerate.

19 12. Dozimetru calorimetric, conform revendicărilor 1...11, **caracterizat prin aceea**  
**că** echipamentul (6) de spectroscopie optică tip integrator, sursa (19) optică de bandă largă,  
minispectrometrul (18) cu fibre optice și analizorul (21) de spectru optic sunt instrumente  
21 portabile.

23 13. Dozimetru calorimetric, conform revendicării 1, **caracterizat prin aceea că** res-  
pectiva caracteristică de temperatură a calorimetrului (10) cvasiadiabatic, pentru a calcula  
temperatura reală a corpului (15) calorimetric, în cazul unui calorimetru ideal, este variabilă  
25 în timp.

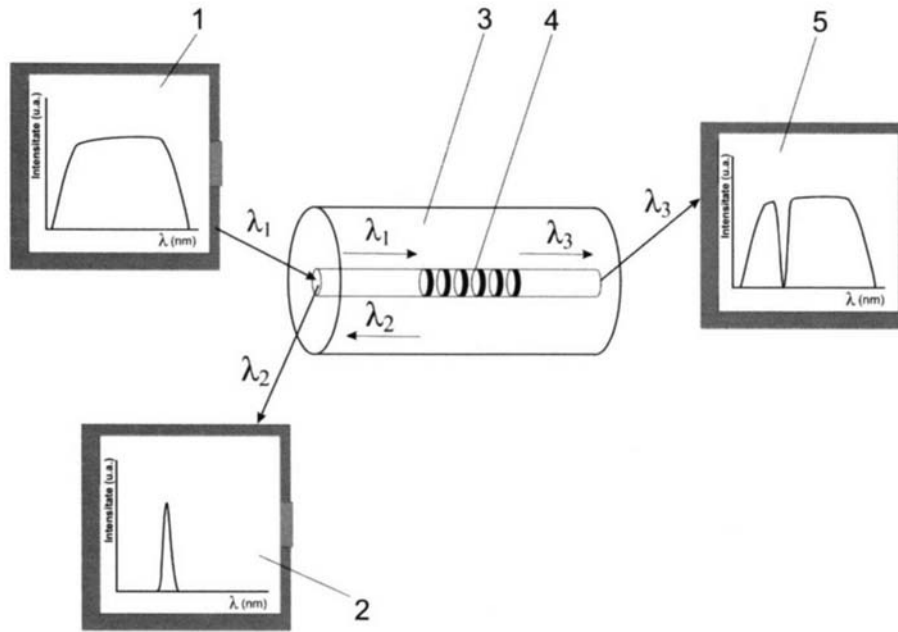


Fig. 1

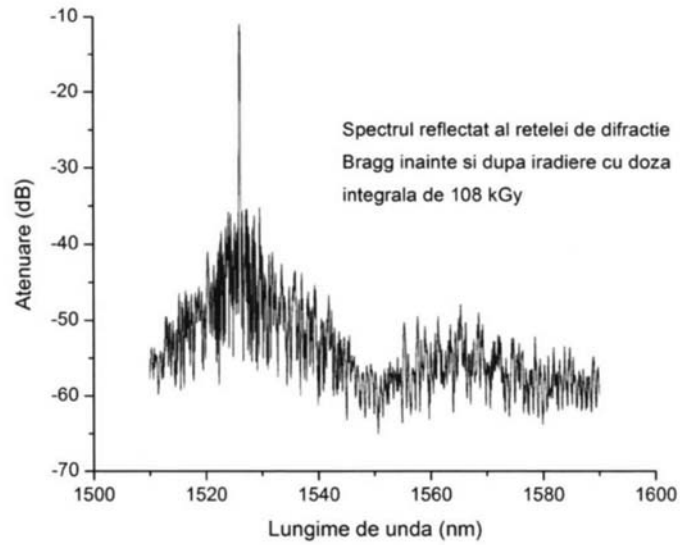


Fig. 2

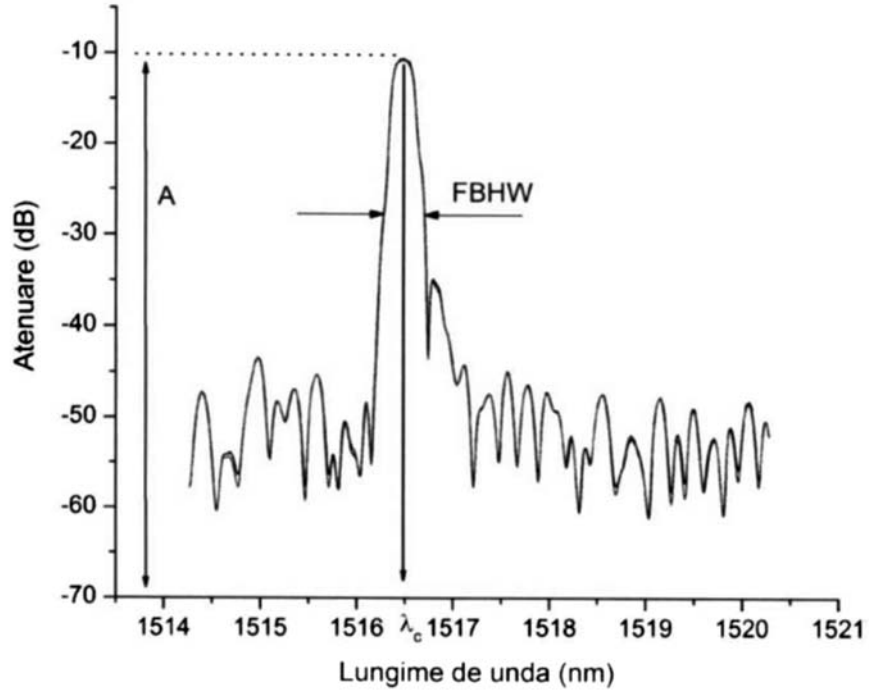


Fig. 3

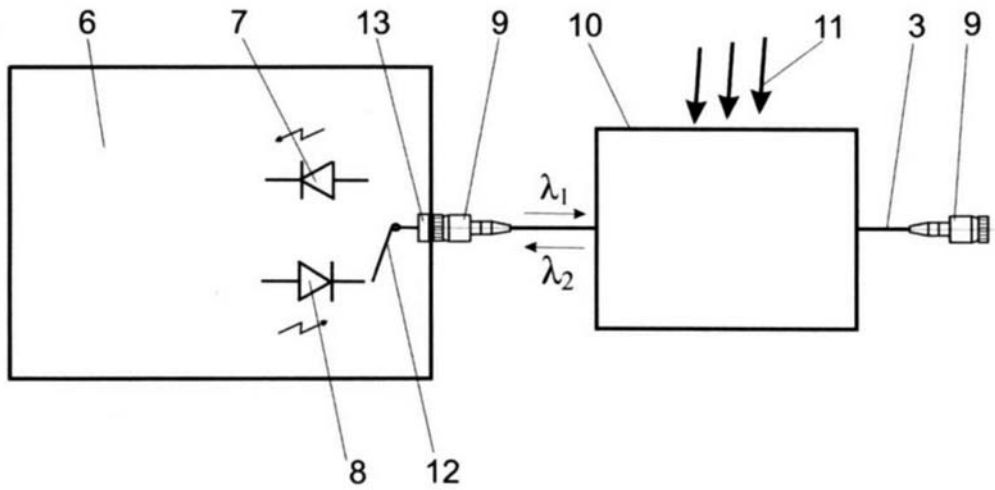


Fig. 4

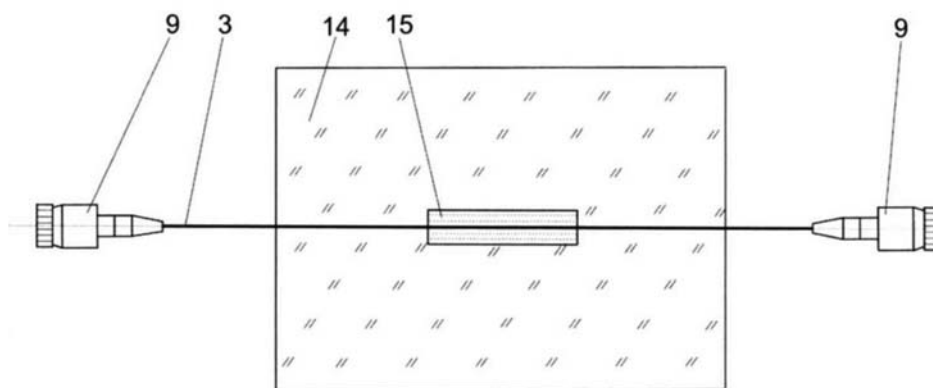


Fig. 5

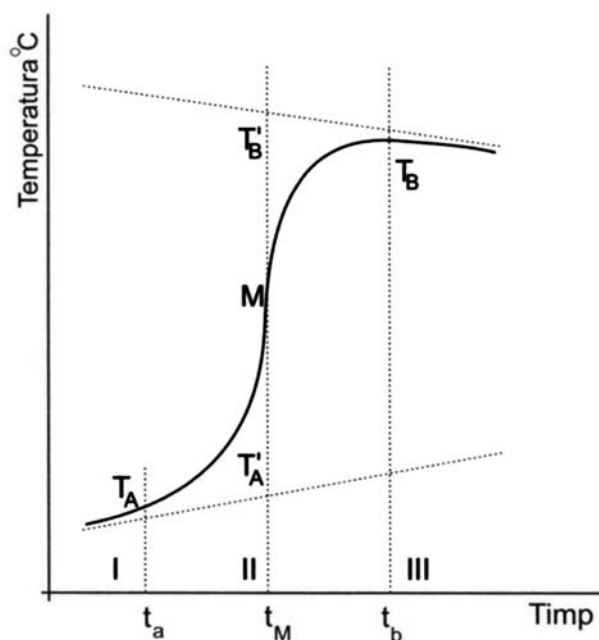


Fig. 6

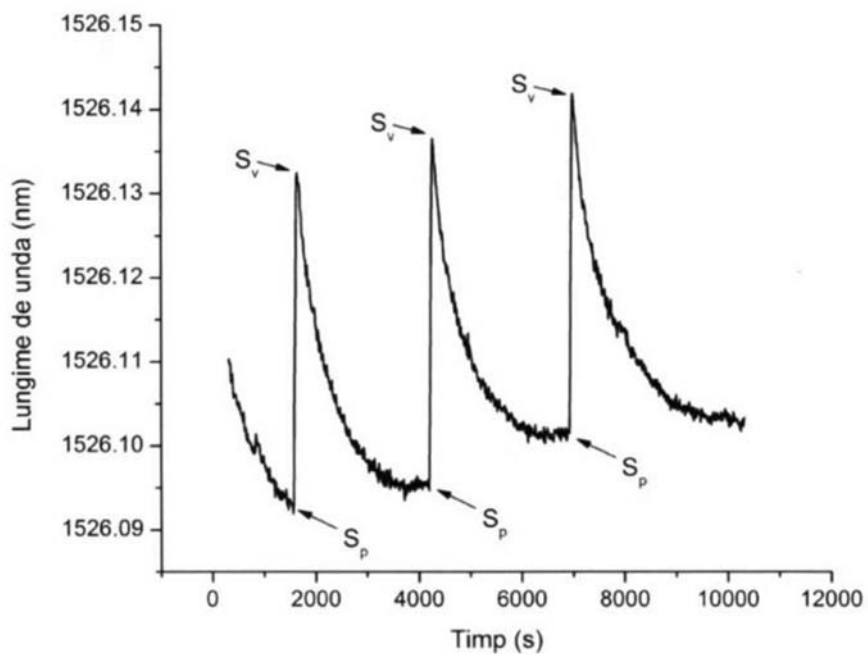


Fig. 7

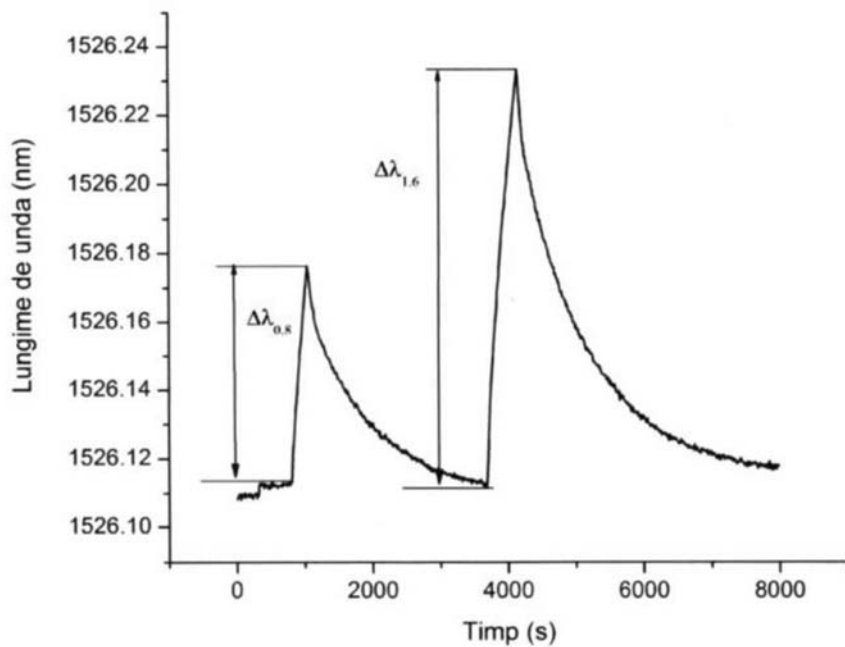


Fig. 8



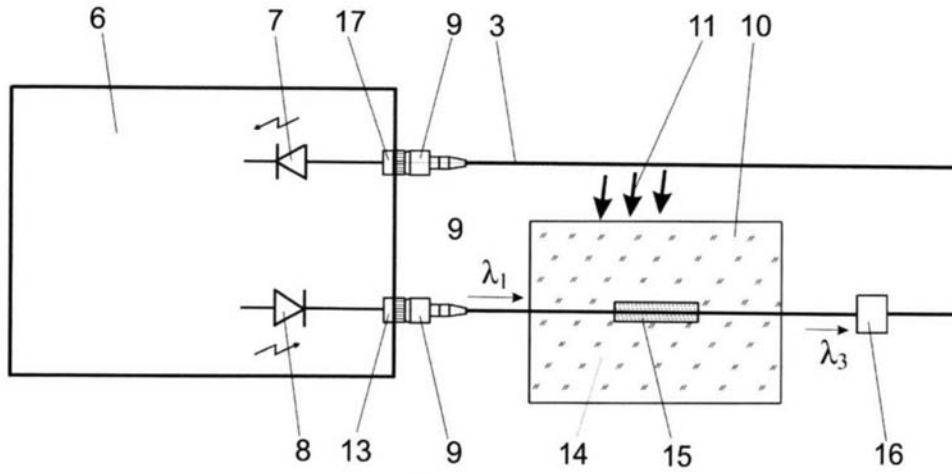


Fig. 9

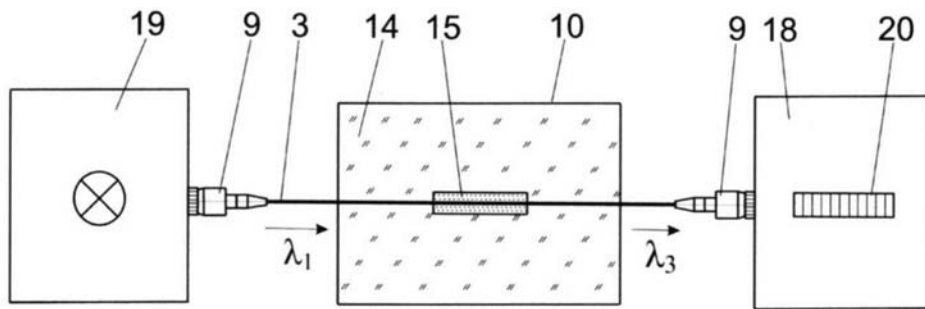


Fig. 10

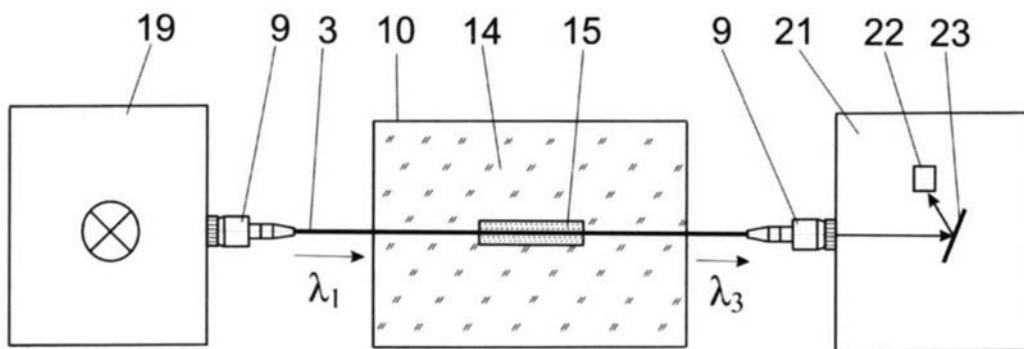


Fig. 11