



(12)

BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: **a 2016 01038**

(22) Data de depozit: **22/12/2016**

(45) Data publicării mențiunii acordării brevetului: **30/09/2022** BOPI nr. **9/2022**

(41) Data publicării cererii:
29/06/2018 BOPI nr. **6/2018**

(73) Titular:
• **UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI, SPLAIUL INDEPENDENȚEI NR.313, SECTOR 6, BUCUREȘTI, B, RO;**
• **INSTITUTUL NAȚIONAL DE CERCETARE-DEZVOLTARE PENTRU FIZICA LASERILOR, PLASMEI ȘI RADIAȚIEI-INFLPR, STR.ATOMIȘTILOR NR.409, MĂGURELE, IF, RO**

(72) Inventatori:
• **PETRIS ADRIAN, BD. IULIU MANIU NR. 192, BL. B, SC. 1, AP. 45, SECTOR 6, BUCUREȘTI, B, RO;**

• **VLAD IONEL VALENTIN, STR.STOCKHOLM NR.10, SECTOR 1, BUCUREȘTI, B, RO;**
• **GHEORGHE PETRONELA, STR. REACTORULUI NR. 26, MĂGURELE, IF, RO;**
• **RĂU ILEANA, STR. POIANA CU ALUNI NR.3, BL.10, SC.1, ET.5, AP.22, SECTOR 2, BUCUREȘTI, B, RO;**
• **KAJZAR FRANCOIS, STR. POIANA CU ALUNI NR. 3, BL. 10, SC. 1, AP. 22, SECTOR 2, BUCUREȘTI, B, RO**

(56) Documente din stadiul tehnicii:
US 5062693; EP 1691233 A1;
RO 129610 A0; US 7324286 B1

(54) **MODULATOR SPAȚIAL DE LUMINĂ COMPLET OPTIC BAZAT PE ADN FUNCȚIONALIZAT**



RO 132685 B1

1 Invenția se referă la un modulator spațial de lumină și se încadrează în domeniul dis-
2 pozitivelor optice neliniare pentru modificarea fazei unui fascicul de lumină laser, controlată
3 complet optic de un alt fascicul laser.

4 În funcție de proprietățile optice ale materialului neliniar optic (NLO) care sunt
5 modificate pentru modularea luminii, modulatele de lumină pot fi modulate absorbitive
6 (când este modificat coeficientul de absorbție al materialului NLO) sau refractive (când este
7 modificat indicele de refracție al materialului NLO).

8 Spre deosebire de modulatele refractive în care indicele de refracție este modulată
9 de un factor extern diferit de lumina (modulate electro-optice, magneto-optice, acusto-
10 optice), într-un modulator de lumină complet optic controlul modulației este realizat de un
11 fascicul de lumină modulator.

12 Sunt cunoscute câteva tipuri de modulate spațiale de lumină complet optice
13 bazate pe cristale lichide (brevet **US 7324286 B1**), plasmoni de suprafață, materiale foto-
14 cromice (brevet **US 5062693 A**) etc.

15 Brevetul **US 7324286 B1** se referă la un dispozitiv cu funcțiuni de modulator de fază
16 pentru direcționarea sau comutarea unui fascicul, bazat pe difracția Bragg pe o rețea înscrisă
17 într-o sticlă foto-termo-refractivă, controlată optic prin intermediul unei structuri modulate
18 cu cristal lichid.

19 Dispozitivul propus de T. Okamoto în 1993, funcționând prin reflexie, este bazat pe
20 excitarea plasmonilor de suprafață și constă dintr-o prismă optică cu indice de refracție mare
21 pe care sunt depuse un film subțire de argint și un film de polimer dopat cu colorant.

22 Brevetul **US 5062693 A** face referire la un modulator spațial de lumină bidimensional,
23 controlat optic. Funcționarea acestui dispozitiv are la bază diverse materiale de sinteză
24 fotocromice. Acest dispozitiv funcționează utilizând trei molecule diferite.

25 Toate aceste dispozitive se bazează așadar pe materiale de sinteză, nebiodegrada-
26 bile, neecologice.

27 Problema tehnică pe care o rezolvă invenția constă în obținerea unei modulații de
28 fază mari a unui fascicul de lumină laser, controlată complet optic.

29 Modulatorul de lumină complet optic ce face obiectul prezentei invenții, este un
30 modulator de fază, bazat pe un material neliniar optic modern, biopolimerul ADN funcțio-
31 nalizat cu cromofori, ce poate fi utilizat în aplicațiile ce necesită modularea fazei unui fascicul
32 laser, controlată pur optic de un fascicul modulator.

33 Astfel, prin interacțiunea dintre fasciculul modulator și biopolimerul ADN-CTMA dopat
34 cu cromofor, utilizat în modulator, lumina fasciculului de modulare poate induce în acest
35 material o serie de structuri de indice de refracție, dinamice, ce pot acționa drept compo-
36 nente optice de fază, cu diferite profile de indice de refracție, controlate spațial și temporal
37 de lumina de modulare, pentru diverse funcționalități fotonice: focalizare, deviere, limitare
38 optică refractivă, difracție în diferite regimuri (Raman-Nath, Bragg), modificare și corectare
39 a profilului fasciculelor laser modulate etc.

40 Materialul neliniar utilizat în modulator este biopolimerul ADN-CTMA (acid dezoxiribo-
41 nucleic (ADN) funcționalizat cu surfactantul cetiltrimetil amoniu (CTMA)) și dopat cu
42 cromofori foto-izomerizabili: Disperse Red 1 (DR1) și Disperse Orange 3 (DO3).

43 Modulatorul propus, conform invenției, înlătură dezavantajele menționate prin aceea
44 că este construit dintr-un laser de probare He-Ne, $\lambda = 633$ nm, care generează fasciculul
45 laser de probare, un laser de pompaj, $\lambda = 532$ nm, care generează fasciculul modulator,
46 ambele fascicule suprapunându-se în materialul neliniar optic (NLO) pe bază de biopolimer
47 ADN-CTMA funcționalizat cu cromoforii fotoizomerizabili Disperse Red 1 -DR1 și Disperse
48 Orange 3 -DO3, obținându-se un fascicul modulată, a cărui modulație este controlată optic de

fasciculul modulator, care trece printr-o lentilă, dispusă între materialul NLO și un analizor de fascicul, adaptând mărimea spotului fasciculului modulat la mărimea matricii fotosensibile a analizorului de fascicul utilizat pentru vizualizarea fasciculului modulat.	1
Biopolimerul ADN are o serie de avantaje față de polimerii sintetici, atât în ce privește modul de obținere, cât și al unor proprietăți ce îl recomandă pentru aplicații în fotonica organică, în general, și în cele bazate pe funcționalizarea cu cromofori fotoizomerizabili, în particular.	3
Legat de modul de obținere, biopolimerul ADN este un material ecologic, biodegradabil, obținându-se din resurse regenerabile (de exemplu, deșeuri din industria alimentară) prin tehnologii ecologice moderne.	5
Biopolimerul ADN este transparent în domeniile spectrale vizibil și infraroșu apropiat. În ce privește transformările de fotoizomerizare trans-cis-trans ale DR1 și DO3, viteza și reversibilitatea modificărilor conformaționale ale moleculelor de colorant sunt puternic influențate de mediul molecular în care se găsesc aceste molecule. Rigiditatea matricii în care este înglobat cromoforul este importantă. Din acest punct de vedere, structura specifică dublu-elicooidală a spiralei ADN-ului asigură un volum liber mai mare în acest biopolimer decât în polimerii sintetici, făcând mai ușoare și mai rapide modificările conformaționale ale moleculelor de colorant fotoizomerizabil, în special pentru molecule mici de cromofor. Aceste modificări conformaționale sunt mult mai rapide în mediu lichid (soluții ADN-CTMA-cromofor) decât în matrice solidă. De asemenea, elicea dublă a macro-moleculii de ADN stabilizează și protejează mai bine moleculele de colorant, împiedicând și agregarea lor, ceea ce permite realizarea unor concentrații mai mari de colorant în soluții sau mediu solid.	7
Un alt avantaj al biopolimerului ADN este stabilitatea lui termică bună. El se descompune la temperaturi de 220°C. Pragul de distrugere, parametru important în folosirea unui material în fonică, este foarte mare pentru acest biopolimer. Valorile măsurate sunt 5,3 GW·cm ⁻² pentru ADN și respectiv 5,2 GW·cm ⁻² pentru ADN-CTMA, ceea ce arată că acești biopolimeri sunt mult mai rezistenți la pulsuri laser cu energie mare decât alți polimeri sintetici.	9
În continuare se prezintă un exemplu de realizare a modulatorului conform invenției în legătură cu fig. 1...5 care reprezintă:	11
- fig. 1, schema de principiu a modulatorului spațial de lumină complet optic (AOSLM) cu ADN funcționalizat;	13
- fig. 2, spectrele de absorbție ale ADN-CTMA-DO3, ADN-CTMA-DR1 în butanol și pozițiile lungimilor de undă de pompaj ($\lambda_{\text{pump}} = 532 \text{ nm}$) și de probă ($\lambda_{\text{probe}} = 633 \text{ nm}$) relativ la aceste spectre;	15
- fig. 3, dependența modificării fazei în ADN-CTMA-DR1 și ADN-CTMA-DO3 de intensitatea fasciculului de modulare;	17
- fig. 4, modificarea fazei, $\Delta\Phi_{\text{NL}}(0,0,L)$, în biopolimerul ADN funcționalizat cu DR1, respectiv, DO3, în AOSLM descris, corespunzătoare intensității $I_{\text{pump}}(0,0,0)$, a fasciculului gaussian de modulare la intrarea în materialul NLO;	19
- fig. 5, transformarea fasciculului de probare gaussian (TEM00) într-un fascicul de tip „doughnut” (~ TEM01*) în AOSLM descris.	21
Modulatorul, conform invenției, se referă la materialul NLO utilizat, care este ecologic, biodegradabil, prietenos cu mediul, obținut din deșeuri, cu o stabilitate termică foarte bună, structura simplă a modulatorului, obținerea unei modulații de fază mari, de aproximativ 14 radiani (în regim liniar de funcționare), comparativ cu modulatele existente. Modulatorul este construit dintr-un laser de probare He-Ne, $\lambda = 633 \text{ nm}$, care generează fasciculul laser de probare, un laser de pompaj, $\lambda = 532 \text{ nm}$, care generează fasciculul modulator, ambele	23
	25
	27
	29
	31
	33
	35
	37
	39
	41
	43
	45
	47

RO 132685 B1

1 fascicule suprapunându-se în materialul neliniar optic (NLO) pe bază de biopolimer ADN-
CTMA funcționalizat cu cromoforii fotoizomerizabili Disperse Red 1 (DR1) și Disperse
3 Orange 3 (DO3), obținându-se un fascicul modulată, a cărei modulație este controlată optic
de fasciculul modulator, care trece printr-o lentilă L, dispusă între materialul NLO și analizorul
5 de fascicul AF, adaptând mărimea spotului fasciculului modulată la mărimea matricii
fotosensibile a AF utilizat pentru vizualizarea fasciculului modulată.

7 Principiul de funcționare al modulatorului de lumină spațial complet optic ("All Optical
Spatial Light Modulator" - AOSLM) cu ADN funcționalizat ce face obiectul prezentei invenții
9 este următorul:

- faza optică Φ_0 a unui fascicul de lumină cu lungimea de undă λ care trece printr-un
11 mediu cu indicele de refracție n_0 și grosimea L este dată de:

$$13 \quad \Phi_0(L) = \frac{2\pi n_0 L}{\lambda} \quad (1)$$

15 Elementul esențial al modulatorului este un material optic neliniar (NLO) (ADN
funcționalizat cu cromofori, în cazul prezentei invenții) al cărui indice de refracție n_0 este
17 modificat de lumină având lungimea de undă în domeniul de sensibilitate spectrală al
materialului considerat. Pe acest material este incident un fascicul laser modulator (denumit
19 și fascicul de pompaj), având lungimea de undă λ_{pump} (în domeniul de sensibilitate spectrală
al materialului NLO) și distribuția de intensitate $I_{\text{pump}}(x, y, z)$.

21 În cazul proceselor optice neliniare de ordinul trei există o relație de directă
proporționalitate între distribuția de intensitate $I_{\text{pump}}(x, y, z)$ a fasciculului modulator și
23 modificarea indicelui de refracție $\Delta n(x, y, z)$ produsă de acesta în materialul NLO:

$$25 \quad \Delta n(x, y, z) = n_2 \cdot I_{\text{pump}}(x, y, z), \quad (2)$$

27 în care n_2 este indicele de refracție neliniar al materialului NLO.

Ca urmare, indicele de refracție al materialului NLO, n_0 în absența iluminării, se
29 modifică atunci când este iluminat cu fasciculul modulator, distribuția de indice de refracție
 $n(x, y, z)$ devenind:

$$31 \quad n(x, y, z) = n_0 + \Delta n(x, y, z), \quad (3)$$

33 Astfel, distribuția de indice de refracție $n(x, y, z)$ este proporțională cu distribuția de
intensitate $I_{\text{pump}}(x, y, z)$ a fasciculului modulator.

35 Faza optică a unui fascicul laser de probare (fascicul modulată), cu lungimea de undă
 λ_{probe} , situată în afara domeniului de sensibilitate spectrală a materialului NLO (pentru a nu
37 induce, la rândul lui, modificări ale indicelui de refracție al materialului NLO), ce trece prin
materialul NLO cu indicele de refracție modificat de fasciculul modulator, este modulată în
39 conformitate cu modificarea $\Delta n(x, y, z)$ a indicelui de refracție, ajungând la ieșirea din proba
la $\Delta\Phi_{\text{NL}}(x, y, L)$, dată de:

$$41 \quad \Delta\Phi_{\text{NL}}(x, y, L) = k_{\text{probe}} \cdot \int_0^L \Delta n(x, y, z) \cdot dz, \quad (4)$$

43 în care $k_{\text{probe}} = 2\pi/\lambda_{\text{probe}}$ este numărul de undă al fasciculului modulată (de probare).

45 Astfel, în modulatorul considerat în această invenție, distribuția spațială a fazei optice
a fasciculului modulată este controlată de fasciculul modulator, ce modifică indicele de
47 refracție al materialului NLO, conform propriei distribuții de intensitate luminoasă.

Deoarece absorbția fasciculului modulator în materialul NLO este ne-neglijabilă, intensitatea fasciculului de pompaj nu este constantă în grosimea acestuia. Ca urmare a absorbției liniare în materialul NLO, caracterizată de coeficientul de absorbție α , intensitatea fasciculului modulator este maximă pe fața de intrare a materialului NLO și scade în lungul direcției de propagare a luminii, z , conform legii Lambert - Beer:

$$I_{pump}(x, y, z) = I_{pump}(x, y, 0) \exp(-\alpha z), \quad (5)$$

Modificarea indicelui de refracție în adâncimea materialului NLO va avea o dependență de z de același tip:

$$\Delta n(x, y, z) = n_2 I_{pump}(x, y, z) = \Delta n(x, y, 0) \exp(-\alpha z), \quad (6)$$

modulația maximă a indicelui de refracție, $\Delta n(x, y, 0) = n_2 I_{pump}(x, y, 0)$, obținându-se la intrarea fasciculului laser de pompaj în materialul NLO ($z = 0$). La ieșirea din acesta, modulația fazei va fi dată de:

$$\Delta \Phi_{NL}(x, y, L) = k_{probe} \cdot \Delta n(x, y, 0) \cdot \int_0^L \exp(-\alpha z) \cdot dz = k_{probe} \cdot \Delta n(x, y, 0) \cdot L_{eff} \quad (7)$$

unde L_{eff} este lungimea efectivă, dată de

$$L_{eff} = (1 - e^{-\alpha_0 L}) / \alpha_0 \quad (8)$$

Așadar, distribuția modificării fazei fasciculului modulat, la ieșirea din materialul NLO:

$$\Delta \Phi_{NL}(x, y, L) = \frac{2\pi}{\lambda_{probe}} \cdot L_{eff} \cdot n_2 \cdot I_{pump}(x, y, 0) \quad (9)$$

va fi proporțională cu distribuția de intensitate a fasciculului modulator, la intrarea în materialul NLO. Ea va depinde și de mărimea absorbției liniare (prin L_{eff}) și de mărimea răspunsului nelinier (prin n_2) ale materialului NLO utilizat în modulator.

Așadar, în modulatorul considerat în această invenție, distribuția de intensitate a fasciculului de pompaj (modulator) este transferată sub forma unei distribuții de fază, fasciculului de probare (modulat).

Fasciculul laser de pompaj (modulator) considerat este armonica a doua a unui laser c.w. Nd:YAG cu lungimea de undă $\lambda_{pump} = 532$ nm, situată în zona de sensibilitate spectrală a complexului ADN-CTMA dopat cu cromofor (DR1, DO3). Fasciculul modulator produce modificarea spațială a indicelui de refracție al materialului NLO, conform distribuției lui spațiale de intensitate. Fasciculul laser de probare (fasciculul modulat) este generat de un laser He-Ne având lungimea de undă ($\lambda_{probe} = 633$ nm) în afara domeniului de sensibilitate spectrală a complexului ADN-CTMA-cromofor considerat.

Lentila L poate fi dispusă în montaj între materialul NLO și analizorul de fascicul (AF) laser, având rolul de a adapta mărimea spotului fasciculului modulat la mărimea matricii fotosensibile a AF. De exemplu, dacă lentila cu distanță focală f , egală cu un sfert din distanța dintre planul în care este dispus materialul NLO și planul AF, este plasată la jumătatea distanței material NLO-AF, lentila formează o imagine a planului materialului NLO în planul AF, cu mărime egală cu 1. Introducerea (sau nu) a acestei lentile în montaj și poziția ei depind de aplicația specifică de modulare a fazei.

RO 132685 B1

1 *Materialele NLO considerate în AOSLM*

3 Materialul NLO considerat în AOSLM este reprezentat de soluții de biopolimer ADN-
CTMA (30 g/L) dopat cu cromoforii DR1, DO3, în butanol. Concentrația de dopare cu
cromofor este de 10% din masa ADN-CTMA.

5 Soluțiile sunt introduse în cuve etanșe transparente, cu ferestre de calitate optică, cu
grosimea de 0,5 mm.

7 Spectrele de absorbție ale compușilor ADN-CTMA-DO3 și ADN-CTMA-DR1, utilizați
ca material NLO în AOSLM descris, sunt prezentate în fig. 2. În această figură sunt marcate
9 și lungimile de undă ale fasciculului modulator și, respectiv, modulat.

11 *Mărimea modulației fazei în AOSLM considerat*

11 În aplicații este de dorit o dependență liniară a modulației fazei fasciculului modulat
de intensitatea fasciculului modulator. Această cerință presupune dependența liniară a
13 modificării indicelui de refracție, Δn , a materialului NLO de intensitatea fasciculului
modulator.

15 Pentru determinarea domeniului de liniaritate a răspunsului materialelor NLO
considerate (dependent de natura cromoforului cu care este funcționalizat biopolimerul ADN)
17 s-a măsurat dependența mărimii modulației fazei de intensitatea fasciculului modulator,
utilizând un montaj interferometric.

19 Dependența mărimii modulației fazei de intensitatea de pompaj, în structura de
AOSLM ce face obiectul invenției, este prezentată în fig. 3.

21 În domeniul intensităților considerate ale fasciculului modulator ($I_{pump} = 0 \div 15 \text{ W/cm}^2$)
dependența liniară a modulației fazei de intensitatea de modulare, este data de:

23

$$25 \quad \Delta\Phi_{NL}(0,0,L)(rad) = -0,98 \cdot \left(\frac{rad}{W/cm^2} \right) \cdot I_{pump}(0,0,0)(W/cm^2), \quad (10)$$

27 pentru ADN-CTMA-DR1,

29

$$\Delta\Phi_{NL}(0,0,L)(rad) = -1,14 \cdot \left(\frac{rad}{W/cm^2} \right) \cdot I_{pump}(0,0,0)(W/cm^2), \quad (11)$$

31 pentru ADN-CTMA-DO3.

31 Modificarea fazei, $\Delta\Phi_{NL}(0,0,L)$, considerată în fig. 3 și în dependențele din relațiile (10)
și (11) este corespunzătoare intensității din centrul fasciculului gaussian de modulare,
33 $I_{pump}(0,0,0)$, la intrarea în materialul NLO. Semnul negativ al modulației fazei corespunde unei
lentile divergente induse în probă de fasciculul de modulare.

35 În fig. 4 sunt prezentate, pentru exemplificare două distribuții 3D ale modulației fazei,
pentru cele două materiale NLO considerate, determinate folosind algoritmul dezvoltat pentru
37 reconstrucția directă a fazei optice din imagini cu franje („Direct Spațial Reconstruction of
Optical Phase” - DSROP).

39 *Exemplu de utilizare a AOSLM descris*

41 Un exemplu de utilizare a AOSLM descris este ilustrat în fig. 5, în care este
prezentată transformarea unui fascicul de probare gaussian (TEM00) într-un fascicul de tip
„doughnut” (~TEM01*) în materialul NLO al cărui indice de refracție a fost modulat spațial
43 local de fasciculul de pompaj, ce are, de asemenea, o distribuție de intensitate gaussiană.
În materialul NLO este indusă, de către fasciculul de modulare, o lentilă de indice de refracție
45 divergentă, cu apertura mai mică decât dimensiunea transversală a fasciculului modulat.

RO 132685 B1

Revendicări

1. Modulator spațial de lumină complet optic bazat pe ADN funcționalizat, **caracterizat prin aceea că**, este constituit dintr-un laser de probare He-Ne, $\lambda = 633 \text{ nm}$, care generează fasciculul laser de probare, un laser de pompaj, $\lambda = 532 \text{ nm}$, care generează fasciculul modulator, ambele fascicule suprapunându-se în materialul optic neliniar (NLO) pe bază de biopolimer ADN-CTMA dopat cu cromoforii fotoizomerizabili Disperse Red 1 - DR1 - și Disperse Orange 3 - DO3 - obținându-se un fascicul modulat care trece printr-o lentilă (L), dispusă între material (NLO) și un analizor (AF) de fascicul, adaptând mărimea spotului fasciculului modulat la mărimea matricii fotosensibile a analizorului (AF) utilizat pentru vizualizarea fasciculului modulat. 11
2. Modulatorul conform revendicării 1, **caracterizat prin aceea că**, materialul (NLO) neliniar optic constă în soluții în butanol de concentrație 30 g/L de biopolimer ADN-CTMA dopat cu cromofor fotoizomerizabil DR1 în concentrație de 10% față de ADN-CTMA, dispus în cuva transparentă, etanșă, cu ferestre de calitate optică, cu grosimea de 0,5 mm. 15
3. Modulatorul conform revendicării 1, **caracterizat prin aceea că**, materialul (NLO) neliniar optic constă în soluții în butanol de concentrație 30 g/L de biopolimer ADN-CTMA dopat cu cromofor fotoizomerizabil DO3 în concentrație de 10% față de ADN-CTMA, dispus în cuva transparentă, etanșă, cu ferestre de calitate optică, cu grosimea de 0,5 mm. 19

(51) Int.Cl.

G02B 26/06 (2006.01);

G02F 1/361 (2006.01)

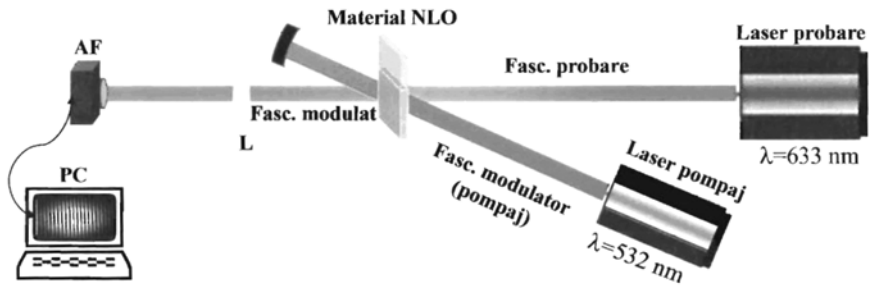


Fig. 1

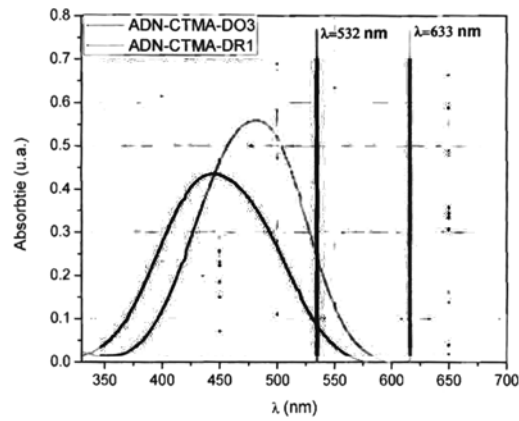


Fig. 2

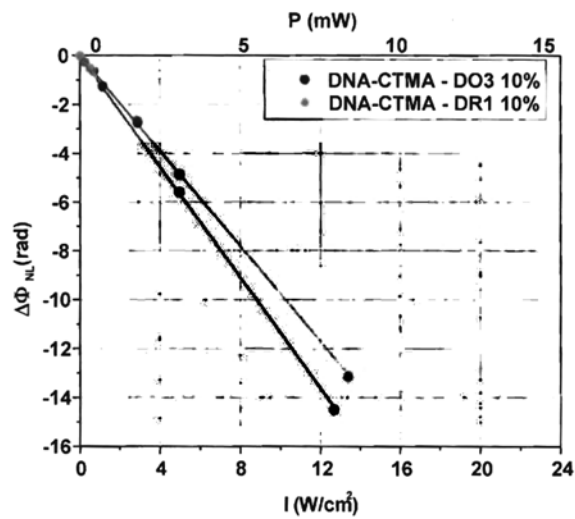


Fig. 3

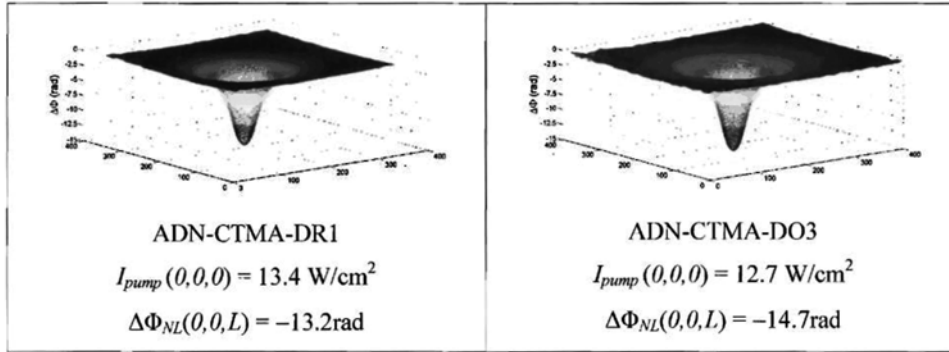


Fig. 4

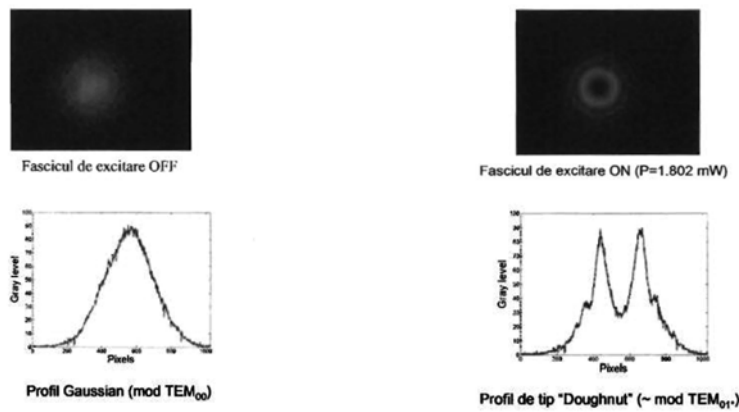


Fig. 5

