



(12) CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2019 00657

(22) Data de depozit: 17/10/2019

(41) Data publicării cererii:
27/11/2020 BOPI nr. 11/2020

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

(72) Inventatori:
• CRĂCIUN ALEXANDRU,
STR.CONSTANTIN ARGETOIANU, NR.284,
COMUNA BREASTA, DJ, RO;
• DASCĂLU TRAIAN, STR.AVIONULUI,
NR.11, SECTOR 1, BUCUREȘTI, B, RO

(54) SISTEM OPTIC PENTRU PRODUCEREA DE FASCICULE
OPTICE ELICOIDALE VECTORIALE

(57) Rezumat:

Invenția se referă la un sistem optic pentru producerea de fascicule optice elicoidale vectoriale, care cuprinde: o lamă (1) sfert de undă, o lamă (2) jumătate de undă, un convertor de mod (3a, 3b) realizat dintr-un cristal birefringent uniaxial, o placă (4) de fază în spirală, un rotator (5) de polarizare și un element (6) optic de focalizare tip lentilă asferică și în care este introdus un fascicul (7a) optic cu distribuție de tip Gauss și polarizare liniară care străbate elementele optice ale sistemului, menționate, care îi modifică starea de polarizare, în timp ce convertorul (3a) de mod schimbă distribuția transversală în distribuție de tip inelar și modifică starea de polarizare într-o stare de polarizare cu variație spațială astfel încât, în funcție de starea de polarizare indusă de sistemul optic conform invenției, fasciculul (7c) prezintă în planul (8) focal al lentilei (6) de focalizare o distribuție de tip inelar și simetrie circulară sau o distribuție de tip doi lobi pe o direcție și intensitate scăzută pe direcția perpendiculară, aceste fascicule fiind de interes pentru microscopia optică de înaltă rezoluție. De asemenea, folosind sistemul optic conform invenției, se mai poate obține pentru fasciculul (7d) livrat la ieșirea convertorului (3b) de mod o distribuție

inelară și o stare de polarizare care îi permite ca, la focalizare, fasciculul să prezinte distribuție uniformă cu simetrie circulară, de interes pentru domeniul prelucrărilor de materiale.

Revendicări: 5
Figuri: 10

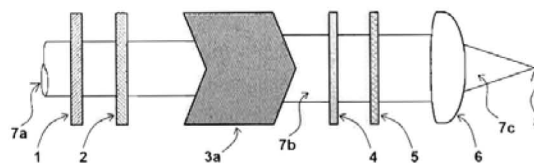


Fig. 1



DESCRIEREA INVENȚIEI

**SISTEM OPTIC PENTRU PRODUCEREA DE FASCICULE OPTICE
ELICOIDALE VECTORIALE**

Invenția se referă la un sistem optic care transformă un fascicul optic polarizat liniar într-un fascicul optic a cărui stare de polarizare depinde de unghiul azimutal măsurat în jurul axei optice și care după focalizare permite obținerea unei distribuții de intensitate a fascicului ajustabilă în punctul de focalizare. Distribuția transversală a fascicului laser poate fi a) de tip inelar cu simetrie circulară sau distribuție simetrică, de tipul doi lobi pe o axă și uniformă, cu intensitate mică, pe direcția perpendiculară, aceste distribuții fiind de interes pentru microscopia optică de înaltă rezoluție, sau b) distribuție uniformă cu simetrie circulară, de interes pentru prelucrări de materiale.

Stadiul tehnicii. Microscopia STED (stimulated emission depletion) este o tehnică de microscopie cu rezoluție înaltă, de mare interes în medicină și biologie, spre exemplu pentru analiza proteinelor. Această tehnică folosește două fascicule laser. Primul fascicul laser este utilizat pentru a induce fluorescență într-o anumită zonă din țesutul biologic investigat. Al doilea fascicul laser, coliniar cu primul și având o distribuție specifică, are rolul de a anula fluorescența obținută cu primul fascicul laser, cu excepția unei zone centrale, al cărui diametru este controlabil. Analiza semnalului de fluorescență emis de proba biologică doar din această zonă, care are dimensiuni reduse, permite obținerea de imagini cu rezoluție de ordinul zecilor de nm, mult îmbunătățită în comparație cu rezoluția sistemelor de microscopie confocală de fluorescență. În prezent, în microscopia STED, pentru anularea fluorescenței se folosesc fascicule polarizate circular și care au frontul de undă elicoidal, acestea fiind numite fascicule elicoidale. Un astfel de fascicul elicoidal poate fi obținut prin introducerea pe traseul unui fascicul laser, care are distribuție transversală de tip Gauss, a unui element optic de tip placă cu fază în spirală (SPP). În acest caz fasciculul laser elicoidal rezultat are simetrie circulară. Această metodă excelează prin simplitate, însă simetria fascicului laser elicoidal nu permite obținerea de imagini ale probei investigate cu rezoluții diferite pe cele două axe Ox și Oy. În locul componentei optice SPP se poate utiliza un element optic a cărui suprafață are o discontinuitate de tip treaptă, rezultând un fascicul laser cu simetrie pe ambele axe, însă prezentând maxime într-un plan și având intensitate foarte scăzută în planul perpendicular. Un astfel de fascicul permite obținerea de imagini STED cu rezoluție ridicată pe direcția care prezintă simetrie cu maxime de intensitate. Totuși, fasciculul nu are intensitate nulă în lungul axei optice, în principal la focalizarea cu un obiectiv optic cu apertură numerică (NA) mare, ceea ce conduce la scăderea raportului semnal-zgomot pentru semnalul de fluorescență analizat.

Pentru prelucrarea materialelor, este indicat ca fasciculul laser să prezinte o distribuție transversală uniformă (de tip 'top-hat'), o astfel de distribuție permițând utilizarea eficientă a energiei fasciculului laser la interacția cu materialul. Sistemele actuale de prelucrare a materialelor folosesc, în principal, elemente optice de tip difractiv și/sau refractiv care modifică distribuția spațială a unui fascicul laser incident de tip Gauss, astfel încât energia acestuia să se redistribuie în planul transversal. Această metodă permite obținerea unei distribuții uniforme a fasciculului laser într-un plan transversal, însă fasciculul laser își modifică proprietățile după propagarea pe o distanță scurtă față de acel plan. Astfel de fascicule pot fi utilizate pentru prelucrări ale suprafeței materialelor, însă pentru prelucrări în adâncime sunt necesare alte modificări ale sistemului optic. În plus, un astfel de sistem optic livrează un fascicul laser ale cărui proprietăți în planul desemnat pentru obținerea profilului uniform depind puternic de profilul fasciculului laser incident în sistemul optic.

Pentru obținerea de fascicule laser elicoidale vectoriale folosind cristale uniaxiale au fost propuse diferite configurații optice. Astfel, în documentul **Optics Letters, vol. 35, nr. 1, pg. 7-9 (2010)**, un fascicul laser, inițial cu distribuție Gaussiană și având polarizare circulară, este mai întâi transformat într-un fascicul de formă inelară, prin propagarea acestuia prin două axicoane optice. În continuare, fasciculul inelar este focalizat, înainte de focalizare acesta trecând printr-un cristal de calcit, cristal care introduce o diferență de fază între unda ordinară (o) și unda extraordinară (e) a fasciculului. După focalizare fasciculul laser este colimat din nou, cu o lentilă, iar în calea fasciculului inelar colimat este introdus un element de polarizare, de tip lamă sfert de undă, $\lambda/4$ (QWP) sau lamă jumătate de undă $\lambda/2$ (HWP). În final, o prismă Wollaston împarte fasciculul laser în două fascicule inelare, unul cu polarizare orizontală și unul cu polarizare verticală. Un astfel de montaj poate fi utilizat pentru fascicule laser cu orice lungime de undă de interes, fapt ce reprezintă un avantaj. Pe de altă parte, sistemul produce doar fascicule elicoidale circulare simetrice, iar proprietățile acestora în planul focal nu au fost studiate.

În documentul **Optics Letters, vol. 27, nr. 5, pg. 285-287 (2002)**, sunt obținute fascicule laser cu polarizare radială și azimutală după trecerea unui fascicul laser printr-un element optic care conține rețele de difracție cu perioadă mai mică decât lungimea de undă a fasciculului laser. Metoda a fost demonstrată cu ajutorul unui laser CO_2 cu emisie la $10.6 \mu\text{m}$, montajul fiind astfel sensibil la lungimea de undă a fasciculului laser.

În documentul **Chinese Physics Letters, vol. 21, nr. 6, pg. 1041-1043 (2004)**, este utilizat un singur axicon pentru a transforma un fascicul laser Gaussian într-un fascicul laser cu distribuție inelară. Totuși, un astfel de fascicul nu este elicoidal.

În documentul **Optics Letters, vol. 30, nr. 22, pg. 3063-3065 (2005)**, este descrisă o soluție prin care fasciculul laser polarizat radial, având distribuție inelară, este generat direct din oscilatorul laser, prin introducerea în acesta a unei prisme optice conice tăiată la unghi Brewster. Pentru a îmbunătăți selectivitatea polarizării, suprafața laterală a prisme conice convexe este acoperită cu straturi dielectrice (de tip SiO_2 și Ta_2O_5) sensibile la polarizare.

Documentul **Optics Letters, vol. 32, nr. 11, pg. 1468-1470 (2007)**, prezintă o metodă prin care un fascicul laser Gaussian, polarizat liniar, este transformat într-un fascicul inelar cu polarizare radială sau azimutală, cu ajutorul unui element optic circular, compus din opt zone egale, fiecare introducând o întârziere $\lambda/2$. Fiecare dintre aceste zone prezintă o orientare diferită a axei rapide a lamei de undă, iar orientarea variază cu 22.5° între două regiuni învecinate.

În documentul **Photonics Research, vol. 6, nr. 4, pg. 228-233 (2018)** fasciculul laser inițial, polarizat liniar, este împărțit în două componente, polarizate perpendicular una față de cealaltă, care apoi sunt introduse într-un modulator spațial de lumină (SLM); acesta modifică, în mod controlabil, faza spațială pentru fiecare fascicul. Cele două fascicule sunt apoi recombinate, pentru a genera, în final, un fascicul cu diferite stări de polarizare și a cărui intensitate poate fi stabilită cu ajutorul elementului SLM. Sistemul este destul de complicat, iar eficiența a fost de 47%, destul de scăzută.

Documentul **US 10,156,669 B2** propune obținerea de fascicule optice polarizate radial sau azimutal cu ajutorul unui element optic, numit convertor de polarizare. Acest element este realizat prin tehnica de scriere directă cu fascicul laser ultra-scurt (cu durata de ordinul fs). Prin iluminarea cu un fascicul focalizat cu polarizare liniară este indusă formarea de structuri de tip rețea de difracție în material. Perioada rețelei induse în elementul optic (care poate fi realizat din cuarț) este mai mică decât lungimile de undă specifice domeniului vizibil.

Pentru obținerea unui fascicul laser cu distribuție uniformă, în documentul **Optics Letters, vol. 36, nr. 9, pg. 1605-1607 (2011)**, un fascicul Gaussian este suprapus cu un fascicul elicoidal de ordinul doi. Fasciculul elicoidal este generat folosind un modulator spațial care conține cristale lichide, iar cele două fascicule suprapuse sunt focalizate cu o lentilă având apertură numerică mică.

Problema tehnică pe care își propune să o rezolve invenția descrisă în acest document este realizarea unui sistem optic care să transforme un fascicul laser cu distribuție transversală de tip Gaussian și polarizare liniară, într-un fascicul laser a cărui distribuție în planul focal al unui sistem de focalizare este ajustabilă, putând avea formă inelară, de interes pentru microscopia STED de înaltă rezoluție; putând avea alte distribuții transversale simetrice, spre exemplu cu doi lobi pe o direcție și cu amplitudine scăzută pe direcția perpendiculară, sau putând fi uniformă, de tip dreptunghiular, de interes pentru prelucrări de materiale.

Sistemul optic este constituit, potrivit invenției, dintr-un element optic polarizor de tipul lamă sfert de undă $\lambda/4$ (QWP); un element optic polarizor de tipul lamă jumătate de undă $\lambda/2$ (HWP); un element optic original, numit convertor de mod (CM, realizat dintr-un cristal birefringent; un element optic de tip placă de fază în spirală (SPP); un element optic care rotește starea de polarizare a fasciculului laser, element numit în continuare RP; un element

optic de tip lentilă asferică sau obiectiv de microscop pentru focalizarea fascicului laser, toate elementele sistemului optic fiind aliniat în lungul unei axe comune, numită axă optică.

Elementul optic QWP transformă un fascicul optic cu polarizare liniară într-un fascicul polarizat circular sau eliptic. Atunci când axa rapidă a QWP este rotită cu 45° în sensul acelor de ceasornic față de direcția de polarizare a luminii incidente, fasciculul devine polarizat circular spre dreapta. Dacă axa rapidă este rotită cu 45° în sensul invers acelor de ceasornic, atunci fasciculul devine polarizat circular spre stânga. Dacă orientarea axei rapide a QWP are un unghi a cărui valoare se găsește între cele două limite $\pm 45^\circ$, se obține un fascicul optic cu polarizare eliptică caracterizată de orientarea semi-axei mari a elipsei de polarizare paralelă cu direcția axei rapide a QWP.

Elementul optic HWP rotește planul de polarizare al luminii incidente. Semi-axa mare a elipsei de polarizare asociată luminii incidente care vine la unghi γ față de direcția axei rapide a lamei de undă va fi rotită cu unghiul 2γ în sens opus, iar sensul de rotație al planului de polarizare este inversat.

Elementul optic original, numit convertor de mod (CM), este realizat dintr-un cristal birefringent, spre exemplu safir, având suprafața din stânga concavă sub formă de con, pentru a transforma un fascicul laser colimat într-un fascicul divergent în interiorul CM și având suprafața din dreapta concavă sub formă de con, cu rolul de a transforma fasciculul divergent din nou într-un fascicul colimat. Modificările introduse de CM asupra stării de polarizare a fascicului laser depind de diferența ($n_o - n_e$), dintre valoarea indicelui de refracție ordinar, n_o și valoarea indicelui de refracție extraordinar efectiv, n_e ale materialului din care este realizat CM, această diferență fiind mare dacă fasciculul laser are divergența, θ ridicată în CM. Elementul optic CM, care este caracterizat de unghiul α al suprafeței conice, de diametrul D și de grosimea L , introduce o diferență de fază, φ după propagarea fascicului prin el, descrisă de relația:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{L \cos \alpha [n_e(\theta) - n_o]}{\cos \left[\arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{n_o} \right) \right]} \quad (1)$$

unde:

$$\theta = \alpha - \arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{n_o} \right) \quad (2)$$

CM poate să opereze și ca lamă $\lambda/4$ (QWP), caz în care trebuie îndeplinită condiția $\varphi = \pi/2$, dar și lamă $\lambda/2$ (HWP), caz în care trebuie îndeplinită condiția $\varphi = \pi$. Aceste condiții specifice de operare ale CM, precum și alte condiții intermediare, se stabilesc prin alegerea parametrilor α , D , și L .

Placa de fază în spirală (SPP) produce o diferență de drum optic care variază azimutal în jurul axei optice, transformând astfel frontul de undă al unui fascicul laser colimat într-un

front de undă de tip elicoidal. Suprafața elementului SPP este în formă de spirală, cu aspect în trepte, iar diferența dintre grosimea maximă și grosimea minimă este un multiplu întreg m al lungimii de undă a radiației laser pentru care SPP este proiectat, fiind numit sarcina topologică.

Rotatorul de polarizare RP rotește direcția de polarizare a unui fascicul incident polarizat liniar sau semi-axa mare a elipsei de polarizare asociate unui fascicul incident cu polarizare eliptică, cu 45° în sensul acelor de ceasornic indiferent de orientarea inițială.

Problema tehnică de obținere a unor fascicule optice cu formă inelară în focarul unei lentile este rezolvată prin faptul că un fascicul cu distribuție transversală de tip Gauss, având polarizare liniară, este mai întâi trimis către un element optic lamă sfert de undă QWP; prin faptul că lama sfert de undă QWP transformă polarizarea liniară a fasciculului Gaussian în polarizare circulară; prin faptul că lama jumătate de undă HWP este orientată astfel încât inversează sensul polarizării circulare a fasciculului Gaussian; prin faptul că elementul optic original CM transformă fasciculul Gaussian într-un fascicul cu distribuție inelară și schimbă polarizarea circulară în polarizare liniară având planul de polarizare rotit la 45° în sensul invers acelor de ceasornic față de direcția radială; prin faptul că elementul optic SPP introduce o diferență de drum optic care depinde de poziția în jurul axei optice și de sarcina topologică $m = -1$, fără a modifica starea de polarizare și distribuția fasciculului incident pe SPP; prin faptul că elementul optic RP modifică polarizarea fasciculului în polarizare radială; prin faptul că un element optic, de tip lentilă sau obiectiv de microscop, focalizează fasciculul; prin faptul că distribuția transversală a fasciculului în planul focal este de tip inelar, iar dimensiunile acestei distribuții depind de modificările introduse de întregul sistem optic atât asupra stării de polarizare cât și asupra drumului optic caracteristice fasciculului inițial introdus în sistemul optic, incident pe elementul optic de focalizare.

Montajul descris anterior permite obținerea de fascicule optice cu distribuție transversală simetrică de tip doi lobi pe o direcție (de exemplu pe axa Oy) și care au intensitate scăzută pe direcția perpendiculară (axa Oz). Această problemă tehnică este rezolvată prin faptul că un fascicul cu distribuție transversală de tip Gauss cu polarizare liniară este trimis către un element optic QWP; prin faptul că elementul optic QWP nu modifică starea de polarizare și distribuția fasciculului incident; prin faptul că elementul optic HWP rotește starea de polarizare a fasciculului cu 90° , fără a modifica distribuția transversală a acestuia; prin faptul că după trecerea prin elementul optic CM, fasciculul va avea o distribuție transversală de tip inelar iar polarizarea fasciculului este o combinație de polarizare liniară, polarizare circulară și polarizare eliptică; prin faptul că elementul optic SPP cu sarcina topologică $m = -1$ nu modifică starea de polarizare și distribuția fasciculului, dar introduce o diferență de drum optic care depinde de poziția din jurul axei optice; prin faptul că elementul optic RP rotește cu 45° starea de polarizare liniară, fără a schimba sensul polarizării circulare și pe cel al

polarizării eliptice; prin faptul că un element optic focalizează fasciculul; prin faptul că modificările induse de întreg sistemul optic asupra stării de polarizare a fasciculului inițial și în lungimea drumului optic determină ca distribuția fasciculului în planul focal al elementului de focalizare să fie de tip doi lobi pe o direcție și cu intensitate scăzută pe direcția perpendiculară.

Un alt obiectiv al prezentei invenții este obținerea unui fascicul optic cu distribuție transversală uniformă, pornind de la un fascicul cu distribuție transversală de tip Gaussian și polarizare liniară. În acest caz, sistemul optic este constituit dintr-o lamă sfert de undă QWP, un element optic CM, un element optic RP și un element optic de focalizare. Problema tehnică este rezolvată prin faptul că un fascicul optic Gaussian având polarizare liniară este trimis către lama sfert de undă QWP; prin faptul că lama sfert de undă QWP transformă polarizarea liniară a fasciculului Gaussian în polarizare circulară; prin faptul că elementul optic CM transformă fasciculul Gaussian într-un fascicul cu distribuție inelară și schimbă polarizarea circulară în polarizare eliptică având semi-axa mare rotită la 45° în sens invers acelor de ceasornic față de direcția radială; prin faptul că elementul optic RP nu modifică polarizarea de tip eliptic dar rotește axa acesteia cu 45° în sensul acelor de ceasornic; prin faptul că elementul optic de focalizare focalizează fasciculul; prin faptul că distribuția transversală a fasciculului în planul focal este uniformă, având formă cilindrică, iar dimensiunile acestei distribuții depind de apertura numerică a elementului de focalizare.

Elementul optic CM poate fi realizat din safir (Al_2O_3). În cazul în care fasciculul optic are lungimea de undă $\lambda = 800$ nm (în infraroșu apropiat), calculul arată că lungimea acestuia poate fi $L = 9$ mm iar unghiul $\alpha = 7^\circ$. Considerând un fascicul inițial având distribuție Gauss cu talia $2\omega_0 = 16$ mm și o lentilă asferică cu distanța focală $f = 15$ mm, rezultă că diametrul fasciculului inelar poate fi variat între $2.3 \mu\text{m}$ și $3.4 \mu\text{m}$, acesta având o zonă centrală cu intensitate nulă, cu diametrul de 145 nm.

În exemplul prezentat pentru producerea fasciculelor de tip inelar, starea de polarizare a fasciculului incident pe elementul optic CM este circulară spre stânga. Elementul optic CM transformă jumătate din fascicul într-un fascicul polarizat circular spre dreapta caracterizat de sarcina topologică $m = -2$, rezultând o combinație de două fascicule, numite mai departe moduri, cu polarizare spre stânga și spre dreapta și sarcină topologică 0 respectiv -2. Aceste două moduri formează împreună fasciculul cu polarizare liniară având planul de polarizare rotit la 45° . Elementul SPP descrește sarcina topologică a celor două moduri cu 1, rezultând o combinație de moduri cu sarcini topologice -1 și -3. Efectul de rotație cu 45° produs de elementul optic RP este rezultatul introducerii unei diferențe de fază (a unui drum optic) între cele două componente polarizate circular. Modul cu sarcină topologică $m = -1$ va fi focalizat mai aproape de axa optică iar modul cu sarcină topologică $m = -3$ se focalizează mai departe

de axa optică, rezultând un fascicul polarizat circular spre stânga în apropierea axei optice și circular spre dreapta în exteriorul regiunii iluminate. Tranziția între cele două stări de polarizare diferite se realizează prin polarizare liniară de tip azimutal care rezultă din suprapunerea parțială a celor două moduri. În final, suprapunerea modurilor conduce la polarizare azimutală în planul focal, spre deosebire de polarizarea radială obținută înainte de lentilă, datorită faptului că cele două moduri cu sarcini topologice $m = -1$ și $m = -3$ acumulează o diferență de fază de tip Gouy în valoare de π datorită propagării către planul focal.

În exemplul prezentat pentru producerea fasciculelor cu distribuție transversală de tip doi lobi, starea de polarizare a fascicolului incident pe elementul optic CM este liniară, adică o suprapunere cu ponderi egale a două moduri cu polarizare circulară de tip opus, care se vor propaga prin sistem în mod independent către punctul focal. Modul cu polarizare circulară spre stânga se propagă similar ca în exemplul pentru producerea fasciculelor de tip inelar. Modul cu polarizare circulară spre dreapta va trece prin CM, rezultând o combinație de alte două moduri cu polarizare circulară spre dreapta și spre stânga, acestea având sarcină topologică $m = 0$ respectiv $m = +2$. Elementul optic SPP descrește sarcina topologică a acestor două moduri cu 1, rezultând o combinație de moduri cu sarcini topologice $m = -1$ și $m = +1$. Suprapunerea acestor două moduri produce în punctul focal un fascicul cu polarizare azimutală. Împreună cu cele două moduri cu sarcină topologică $m = -1$ și $m = -3$, care rezultă din modul inițial cu polarizare circulară spre stânga, se formează un fascicul cu simetrie față de o axă format din doi lobi, acesta fiind rezultatul interferenței între cele patru moduri suprapuse în planul focal.

În exemplul prezentat pentru obținerea unui fascicul cu distribuție uniformă, elementul optic CM poate avea lungimea $L = 9.35$ mm și unghiul $\alpha = 8.3^\circ$. După focalizarea cu lentila având $f = 3.15$ mm, sistemul permite obținerea unui fascicul cu distribuție uniformă, cu diametrul de 3.15 μm .

Se prezintă, în continuare, un exemplu de realizare a invenției în legătură cu fig. 1...9, care reprezintă:

- fig. 1 arată schema de ansamblu a sistemului optic propus în această invenție, pentru obținerea de fascicule cu distribuție de tip inelar cu simetrie circulară sau cu distribuție simetrică, de tipul doi lobi pe o axă și uniformă, cu intensitate mică, pe direcția perpendiculară;

- fig. 2 arată schema de ansamblu a sistemului optic propus în această invenție, pentru obținerea de fascicule cu distribuție uniformă și având simetrie circulară;

- fig. 3 este o vedere a convertorului de mod CM, realizat dintr-un singur element optic;

- fig. 4 este o vedere a elementului optic placă de fază în spirală SPP;

- fig. 5a și fig. 5b arată distribuția de tip Gaussian a fascicolului laser incident în sistemul

optic și starea de polarizare liniară a acestuia;

- fig. 6a, fig. 6b, fig. 6c, fig. 6d, fig. 6e și fig. 6f arată starea de polarizare a fasciculusului optic după trecerea prin QWP; după trecerea prin HWP; după trecerea prin CM; după trecerea prin RP; în planul focal al elementului de focalizare și distribuția transversală a fasciculusului obținut în planul de focalizare, de tip inelar;

- fig. 7a, fig. 7b, fig. 7c, fig. 7d, fig. 7e și fig. 7f arată starea de polarizare a fasciculusului optic după QWP; după HWP; după elementul optic CM; după rotatorul RP; în planul focal al elementului de focalizare și distribuția transversală a fasciculusului final, obținut în planul de focalizare, având doi lobi;

- fig. 8a, fig. 8b, fig. 8c, fig. 8d și fig. 8e prezintă starea de polarizare a fasciculusului optic după trecerea prin QWP; după trecerea prin CM; după trecerea prin RP; în planul focal al elementului de focalizare și distribuția transversală finală a fasciculusului în planul de focalizare, uniformă și cu simetrie circulară;

- fig. 9a și fig. 9b sunt reprezentări ale elementului optic CM realizat din trei elemente optice distincte, care pot fi plasate în contact sau care pot fi poziționate la o anumită distanță între ele;

- fig. 10 ilustrează modul de realizare a elementului optic CM dintr-o oglindă plană găurită, un axicon convergent, un cristal uniaxial și o oglindă plană cu reflectivitate 100% la lungimea de undă a fasciculusului optic.

Sistemul optic care produce fascicule optice de interes pentru spectroscopia optică cu înaltă rezoluție STED conține o lamă sfert de undă QWP **1** fig. 1, o lamă jumătate de undă HWP **2** fig. 1, un element optic convertor de mod CM **3a** fig. 1, un mediu optic de tip placă cu fază spiralată SPP **4** fig. 1, un rotator de polarizare RP, **5** fig. 1 și un element de focalizare tip lentilă asferică **6** fig. 1. Fasciculusul laser **7a** fig. 1 este incident pe lama sfert de undă QWP **1** fig. 1 și după propagarea prin sistemul optic este focalizat în planul focal **8** fig. 1. Sistemul optic care facilitează obținerea de fascicule cu distribuție uniformă, de interes pentru prelucrări de materiale, are în componență o lamă sfert de undă QWP **1** fig. 2, un element optic convertor de mod CM **3b** fig. 2, un rotator de polarizare RP **5** fig. 2 și o lentilă asferică pentru focalizare **6** fig. 2. Convertorul de mod CM **3a**, **3b** fig. 3 este realizat dintr-un material birefringent, având formă cilindrică de lungime L și diametru D , cu suprafața din stânga prin care intră fasciculusul optic **7a** fig. 3 de formă conică concavă și cu suprafața din dreapta prin care iese fasciculusul optic **7b**, **7d** fig. 3 tot de formă concavă, unghiul dintre suprafața concavă și diametrul CM fiind α . Placa cu fază spiralată SPP **4** fig. 4 are grosime variabilă, cu suprafața din stânga, prin care intră fasciculusul optic, plană și suprafața din dreapta, prin care iese fasciculusul optic, de tip spirală.

Fasciculusul optic inițial **7a** fig. 1 cu distribuție transversală de tip Gaussian, fig. 5a și polarizare liniară **9a** fig. 5b este trimis către lama QWP **1** fig. 1, care îi schimbă polarizarea în

polarizare circulară **9b** fig. 6a; în continuare se propagă prin lama HWP **2** fig. 1 unde își modifică sensul polarizării circulare **9c** fig. 6b; trece prin convertorul CM **3a** fig. 1 după care noul fascicul **7b** fig. 1 are distribuție transversală de tip inelar și are schimbată starea de polarizare circulară în polarizare liniară cu planul rotit la 45° în sensul acelor de ceasornic **9d** fig. 6c; se propagă prin SPP **4** fig. 1 care introduce o diferență de drum în jurul axei optice fără a influența starea de polarizare și apoi trece prin RP **5** fig. 1 care transformă polarizarea în polarizare radială **9e** fig. 6d; în continuare trece prin lentila asferică **6** fig. 1 și este focalizat **7c** fig. 1, iar în planul focal polarizarea **9f** fig. 6e depinde de diferența de fază de tip Gouy și astfel distribuția transversală finală este de tip inelar cu simetrie circulară, fig. 6f.

Într-o altă variantă a montajului, fasciculul inițial **7a** fig. 1 cu distribuție transversală de tip Gauss, fig. 5a și polarizare liniară **9a** fig. 5b nu își modifică, după trecerea prin lama QWP **1** fig. 1, starea de polarizare **10a** fig. 7a; la trecerea prin lama HWP **2** fig. 1 polarizarea liniară este rotită cu 90° **10b** fig. 7b; după propagarea prin CM **3a** fig. 1 fasciculul **7b** fig. 1 are distribuția transversală de tip distribuție inelară și polarizarea fasciculului este o combinație de polarizare liniară, polarizare circulară și polarizare eliptică **10c** fig. 7c; elementul SPP **4** fig. 1 nu influențează polarizarea dar introduce o diferență de drum optic care depinde de poziția în jurul axei optice, iar după propagarea prin RP **5** fig. 1 polarizarea liniară și cea eliptică a fasciculului inelar este rotită cu 45° în timp ce polarizarea circulară nu este modificată **10d** fig. 7d; în final fasciculul inelar cu stare de polarizare mixtă este focalizat **7c**, fig. 1 cu o lentilă asferică **6** fig. 1, având polarizare azimutală în planul focal de tip circular **10e** fig. 7e și distribuția transversală de tip doi lobi pe o direcție și cu intensitate scăzută pe direcția perpendiculară fig. 7f.

Pentru îndeplinirea celui de-al doilea obiectiv al prezentei invenții, fasciculul **7a**, fig. 2 cu distribuție transversală de tip Gaussian, fig. 5a și polarizare liniară **9a** fig. 5b trece prin QWP **1** fig. 2, unde își schimbă starea de polarizare în polarizare circulară **11a** fig. 8a; în continuare, elementul optic CM **3b** fig. 2 schimbă distribuția fasciculului **7d**, fig. 2 într-una de tip inelar și modifică polarizarea circulară în polarizare eliptică cu semi-axa mare rotită 45° în sens invers acelor de ceasornic față de direcția radială **11b** fig. 8b; elementul RP **5** fig. 2 rotește semi-axa mare a elipsei de polarizare cu 45° în sensul acelor de ceasornic **11c** fig. 8c; lentila asferică **6** fig. 2 focalizează fasciculul optic **7e**, fig. 2, iar polarizarea în planul focal **11d** fig. 8d este o combinație de polarizare circulară și polarizare liniară, distribuția transversală fiind uniformă cu simetrie circulară fig. 8e.

Elementul optic convertor de mod CM poate fi realizat dintr-un singur element **3a**, **3b** fig. 3. O altă soluție este executarea CM din trei corpuri distincte, un axicon divergent **12** fig. 9a, un cristal uniaxial cu fețe plan paralele **13** fig. 9a aliniat cu axa de anizotropie paralelă cu axa optică și un axicon convergent **14** fig. 9a, aceste trei corpuri fiind poziționate, într-o primă variantă, în contact direct fig. 9a. Figura 9b prezintă varianta de obținere a CM având

axiconul divergent **12** fig. 9b, cristalul uniaxial **13** fig. 9b și axiconul convergent **14** fig. 9b plasate la distanță unul față de altul, caz în care diametrul fasciculului optic **7b**, **7d**, fig. 9b de tip inelar poate fi crescut în mod controlabil în raport cu diametrul fasciculului Gaussian incident **7a** fig. 9b.

Figura 10 prezintă o nouă variantă constructivă a convertorului de mod CM, care poate fi obținut prin combinarea unei oglinzi plane găurite **15**, a unui axicon convergent **14**, a unui cristal uniaxial **13** cu fețe plan paralele aliniat cu axa de anizotropie paralelă cu axa optică și a unei oglinzi plane **16** care poate fi plasată în contact cu cristalul uniaxial sau la o anumită distanță față de acesta. Un fascicul **7a** cu distribuție transversală de tip Gauss trece prin oglinda plană **15**; axiconul **14** modifică distribuția transversală în distribuție de tip inelară fără a modifica polarizarea fasciculului; cristalul uniaxial **13** schimbă în mod controlabil starea de polarizare a fasciculului; oglinda plană **15** reflectă fasciculul înapoi în sistem; fasciculul traversează din nou cristalul uniaxial și axiconul convergent și se reflectă pe oglinda plană **16**, rezultând un fascicul **7b**, **7d** cu distribuție inelară și polarizare care permite obținerea după focalizare a unor distribuții transversale de interes pentru microscopia optică de înaltă rezoluție sau pentru prelucrări de materiale.

REVENDICĂRI

SISTEM OPTIC PENTRU PRODUCEREA DE FASCICULE OPTICE ELICOIDALE
VECTORIALE

1. Un element optic (**3a**, **3b**) numit convertor de mod (CM), realizat în formă cilindrică dintr-un material birefringent uniaxial, având axa de anizotropie aliniată paralel cu axa de simetrie a acestuia, **caracterizat prin aceea că** suprafața din stânga este concavă sub formă de con și suprafața din dreapta este concavă sub formă de con, iar CM poate fi construit de tip monolitic dintr-o singură componentă optică, sau din trei corpuri distincte, un axicon divergent **12**, un cristal uniaxial **13** cu fețe plan paralele aliniat cu axa de anizotropie paralelă cu axa optică și un axicon convergent **14**, aceste trei corpuri fiind poziționate în contact direct sau la distanță unul față de altul, iar CM transformă un fascicul incident **7a** cu distribuție de tip Gaussian într-un fascicul de tip inelar **7b**, **7d** și modifică starea de polarizare a fasciculului incident.

2. Un sistem optic pentru obținerea de fascicule cu distribuție transversală de tip inelar cu simetrie circulară, constituit dintr-o lamă sfert de undă QWP **1**, o lamă jumătate de undă HWP **2**, un element optic convertor de mod CM **3a**, un mediu optic de tip placă cu fază spiralată SPP **4**, un rotator de polarizare RP **5** și un element de focalizare tip lentilă asferică **6**, **caracterizat prin aceea că** un fascicul **7a** cu distribuție transversală de tip Gauss și polarizare liniară **9a** traversează QWP care îi schimbă polarizarea liniară în polarizare circulară **9b**, că fasciculul se propagă prin HWP care îi modifică sensul polarizării circulare **9c**, că fasciculul trece prin CM care conform revendicării 1 îi modifică distribuția transversală **7b** în distribuție inelară și îi schimbă starea de polarizare circulară în polarizare liniară cu planul rotit cu 45° în sensul invers acelor de cearsornic față de direcția radială **9d**, că fasciculul se propagă prin SPP care îi introduce o diferență de drum care variază cu unghiul de rotație în jurul axei optice fără a îi influența starea de polarizare, că după trecerea prin RP fasciculul are polarizare radială **9e**, că fasciculul trece prin lentila asferică care îl focalizează **7c**, iar în planul focal fasciculul are distribuție transversală de tip inelar și simetrie circulară, de interes pentru microscopia optică de înaltă rezoluție.

3. Un sistem optic pentru obținerea de fascicule cu distribuție transversală de tip doi lobi pe o axă și cu intensitate scăzută pe direcția perpendiculară, constituit conform revendicării 2 dintr-o lamă sfert de unda QWP **1** rotită cu un unghi de 45° , o lamă jumătate de undă HWP **2**, un element optic convertor de mod CM **3a**, un mediu optic de tip placă cu fază spiralată SPP **4**, un rotator de polarizare RP **5** și un element de focalizare tip lentilă asferică **6**, **caracterizat prin aceea că** un fascicul **7a** cu distribuție transversală de tip Gauss și

polarizare liniară nu își modifică starea de polarizare **10a** la traversarea QWP, că polarizarea liniară este rotită cu 90° la trecerea prin HWP **10b**, că fasciculul trece prin CM care conform revendicării 1 modifică distribuția transversală de tip Gauss în distribuție **7b** inelară și că polarizarea fasciculului devine o combinație de polarizare liniară, polarizare circulară și polarizare eliptică **10c**, că SPP introduce în fascicul o diferență de drum care variază cu unghiul de rotație în jurul axei optice fără a influența starea de polarizare, că fasciculul trece prin RP iar polarizarea liniară și cea eliptică a fasciculului inelar este rotită cu 45° iar polarizarea circulară nu este modificată **10d**, că fasciculul inelar cu stare de polarizare mixtă este focalizat **7c** cu o lentilă asferică, iar distribuția transversală a fasciculului în planul focal este de tip doi lobi pe o direcție și cu intensitate scăzută pe direcția perpendiculară, de interes pentru microscopia optică de înaltă rezoluție.

4. Un sistem optic pentru obținerea de fascicule cu distribuție transversală, constituit dintr-o lamă sfert de undă QWP **1**, un element optic convertor de mod CM **3b**, un rotator de polarizare RP **5** și un element de focalizare tip lentilă asferică **6**, **caracterizat prin aceea că** un fascicul optic inițial **7a** cu distribuție transversală de tip Gauss și polarizare liniară trece prin QWP și își schimbă starea de polarizare în polarizare circulară **11a**, că fasciculul traversează CM care conform revendicării 1 îl transformă într-un fascicul **7d** cu distribuție inelară și având polarizarea circulară modificată în polarizare eliptică cu semi-axa mare rotită 45° în sens invers acelor de ceasornic față de direcția radială **11b**, că fasciculul trece prin RP care îi rotește semi-axa mare a elipsei de polarizare cu 45° în sensul acelor de ceasornic **11c**, că fasciculul **7e** este focalizat de lentila asferică, iar polarizarea în planul focal este o combinație de polarizare circulară și polarizare liniară **11d** și că distribuția transversală este uniformă cu simetrie circulară, de interes pentru prelucrări de materiale.

5. Un sistem optic convertor de mod, realizat dintr-o oglindă plană gaurită **15**, un axicon convergent **14**, un cristal uniaxial **13** cu fețe plan paralele aliniat cu axa de anizotropie paralelă cu axa optică și o oglindă plană **16** cu reflectivitatea de 100% pentru fasciculul optic, **caracterizat prin aceea că** transformă un fascicul **7a** cu distribuție transversală de tip Gaussian într-un fascicul **7b**, **7d** cu distribuție transversală de tip inelar și polarizare care este modificată corespunzător pentru a obține după focalizare, conform revendicărilor 1, 2 și 3, fascicule cu distribuții transversale de interes pentru microscopia optică de înaltă rezoluție sau pentru prelucrări de materiale.

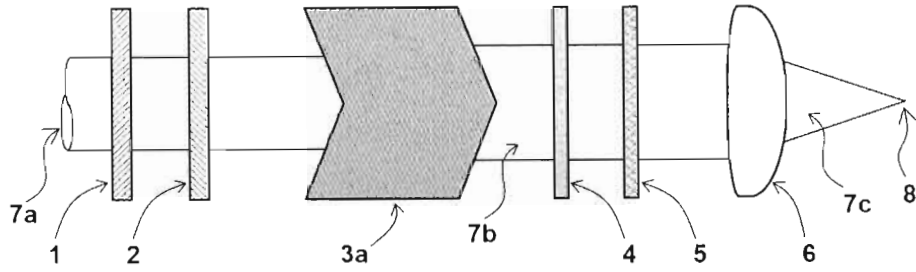


Figura 1

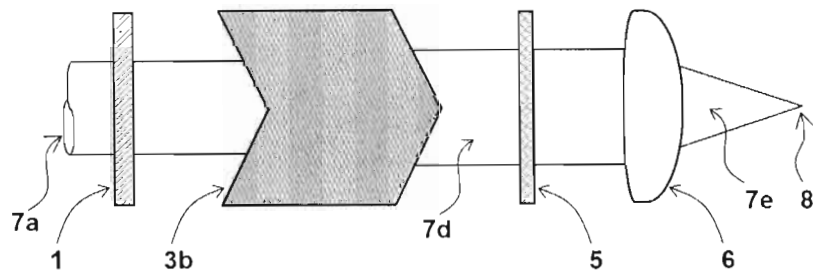


Figura 2

67

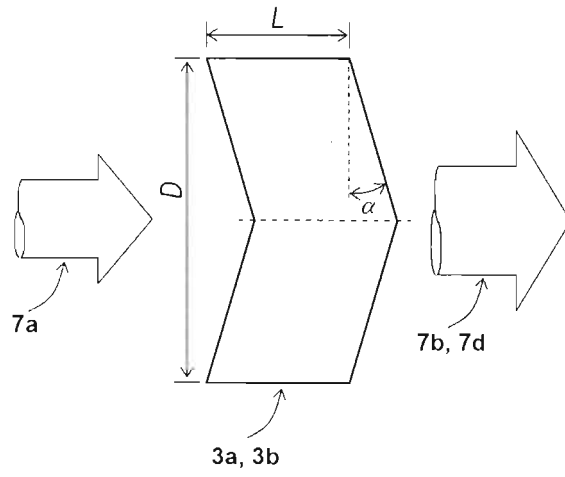


Figura 3

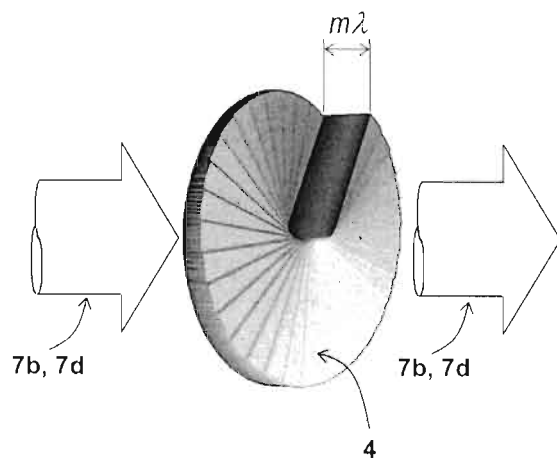


Figura 4

46

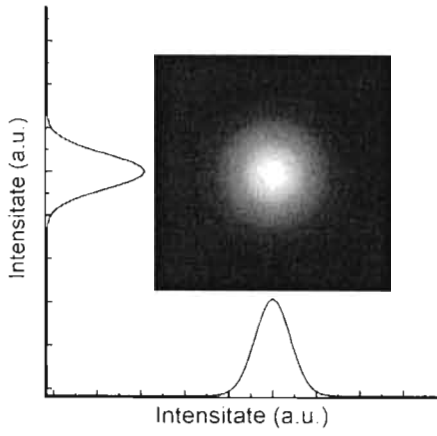


Fig. 5a

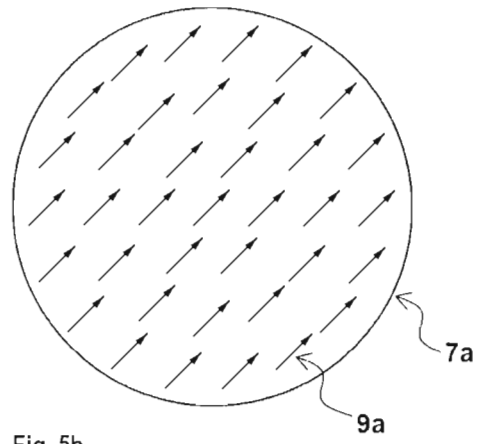


Fig. 5b

Figura 5

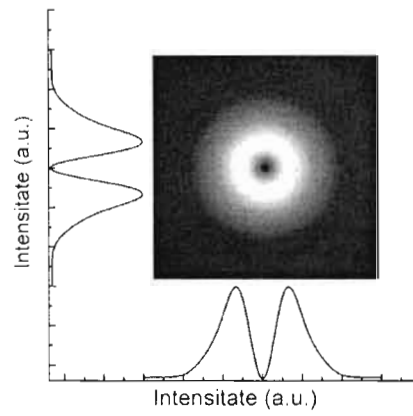
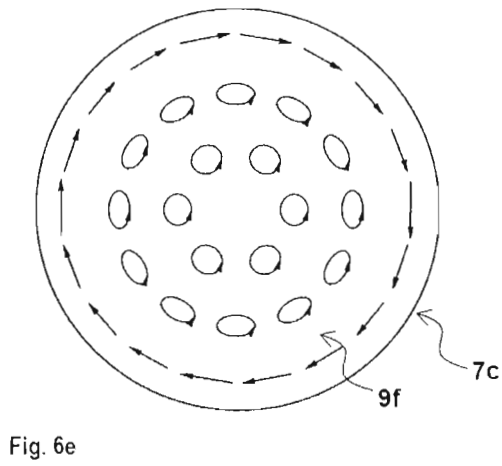
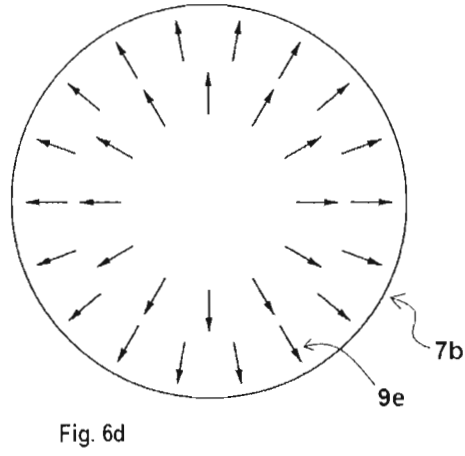
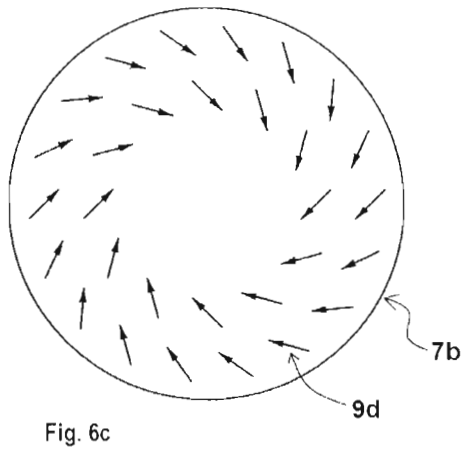
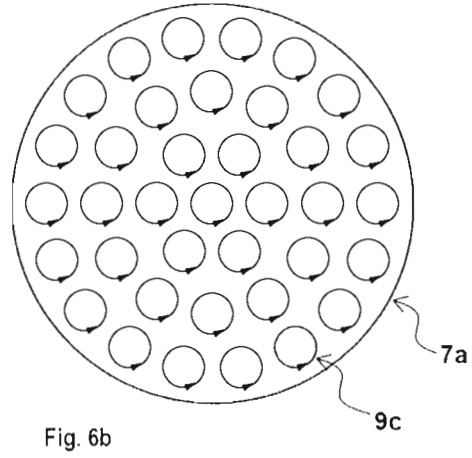
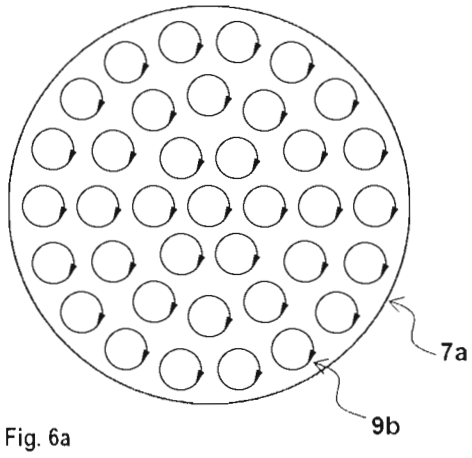


Figura 6

34

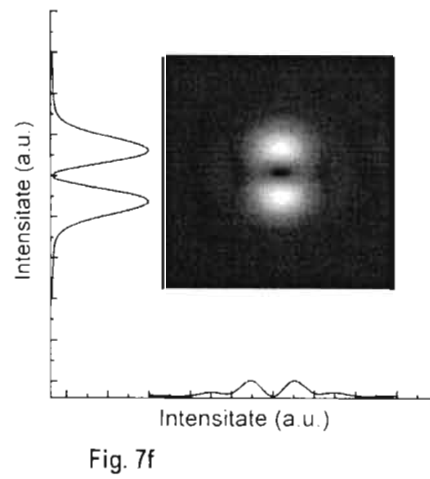
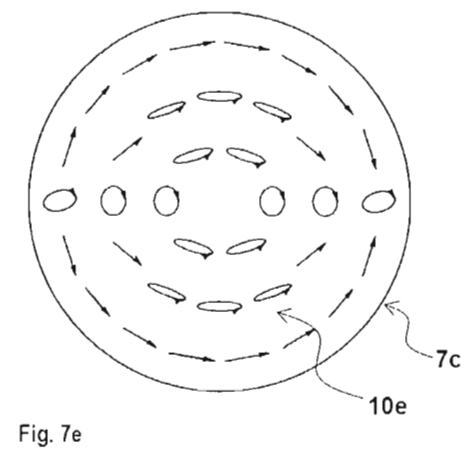
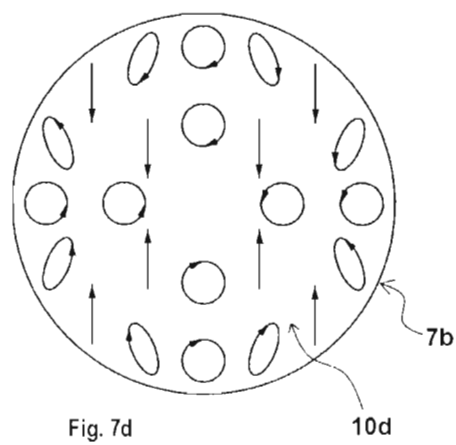
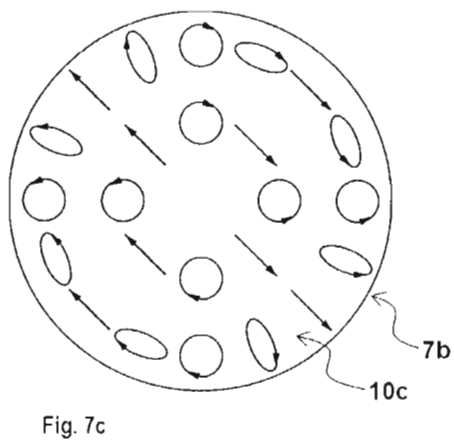
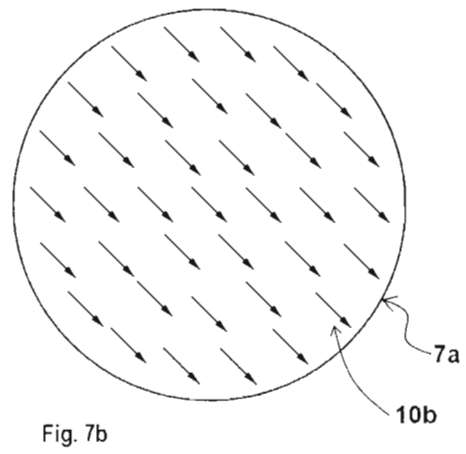
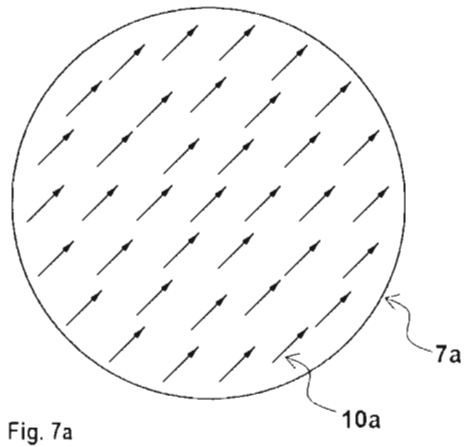


Figura 7

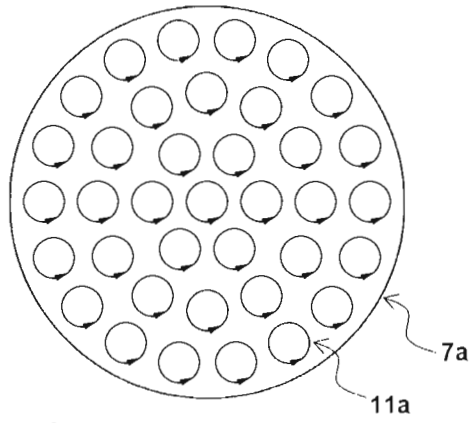


Fig. 8a

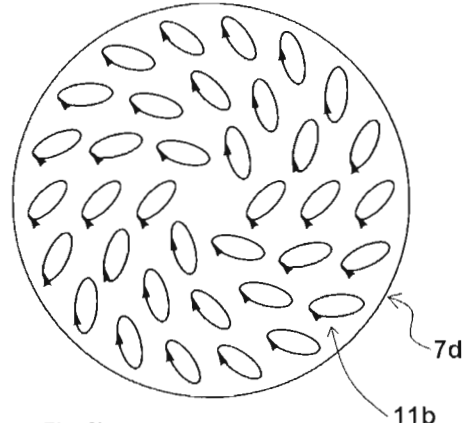


Fig. 8b

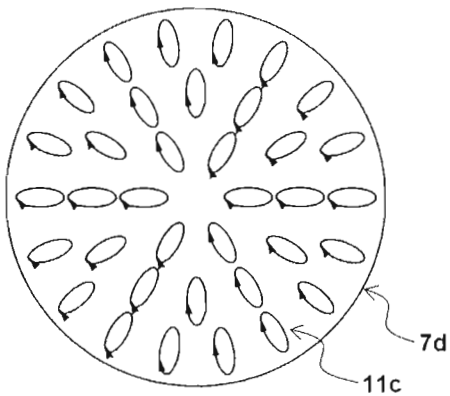


Fig. 8c

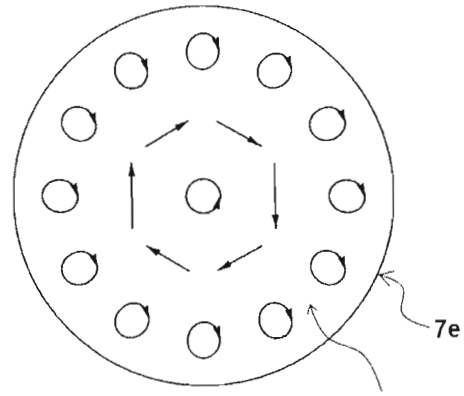


Fig. 8d

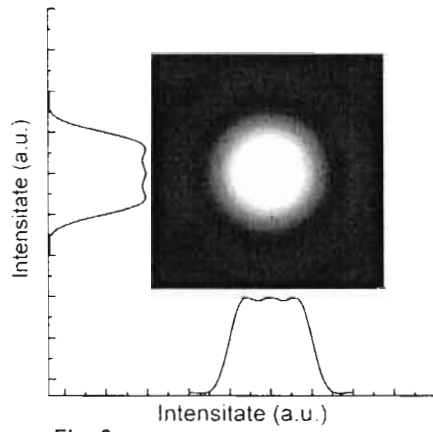


Fig. 8e

Figura 8

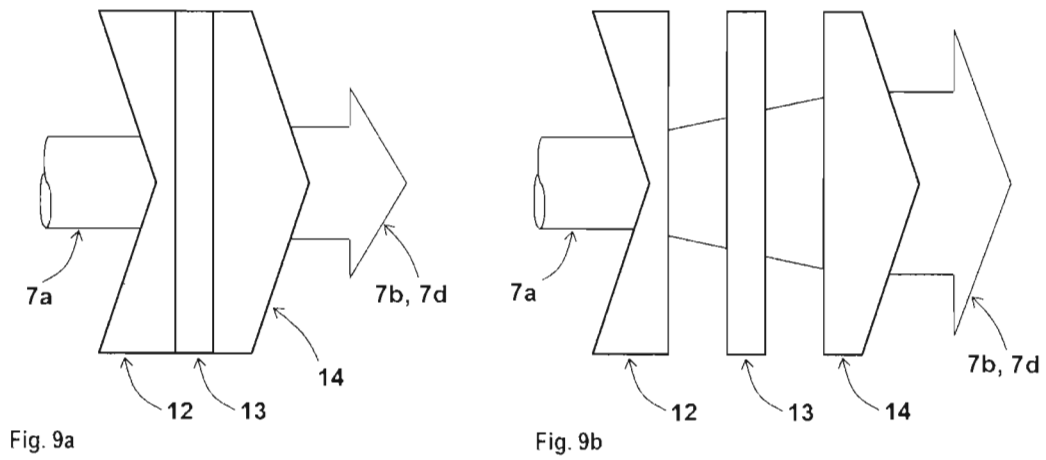


Figura 9

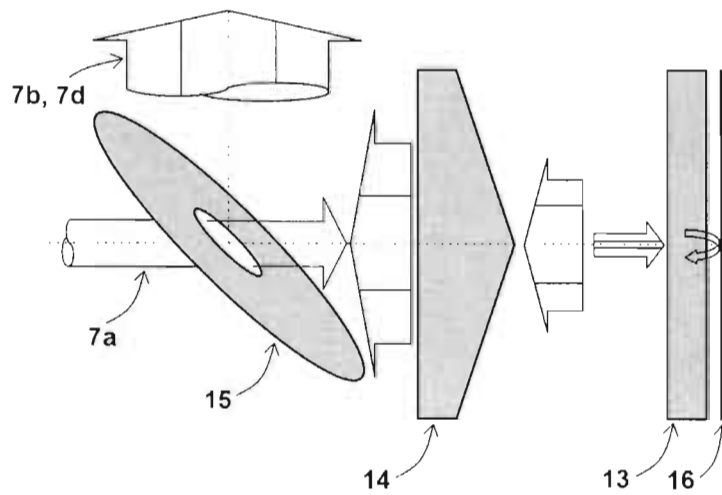


Figura 10