

# RAPORT ȘTIINȚIFIC

## Etapa 5 (01.01.2016-31.12.2016)

**Cristian Kusko (CO) IMT-Bucuresti**  
**Florin Adrian Popescu SC Optoelectronica 2001 SA**  
**Mona Mihailescu (P2) Universitatea Politehnica Bucuresti**

In aceasta etapa s-au investigat cateva solutii tehnice in vederea cresterii atat a capacitatii unui canal de transmitere a informatiei optice prin spatiu liber utilizand vortexuri optice cat si a imbunatatirii caracterului robust al acestora in vederea pastrarii integritatii semnalului modulat. In etapele precedente s-au utilizat ca grad de libertate fascicule laser cu front de unda helicoidal (vortexuri optice) fiecare dintre acestea fiind caracterizat de o sarcina topologica (numar cinetic orbital) cu valori intregi. De asemenea, vortexurile optice utilizate anterior au avut un caracter scalar, acestea fiind generate in ambele polarizari ale radiatiei laser (vertical, orizontal, circular dreapta, circular stanga). Alta solutie tehnica investigate in etapele precedente a fost generarea de fascicule cu front de unda helicoidal, non-diffractive care sunt descrise de functii de functii Bessel de ordin superior. In aceasta etapa, s-au considerat doua clase de solutii tehnice in vederea cresterii integritatii informatiei:

- (i) utilizarea vortexurilor optice cu sarcina fractionara (ex:  $m=1/2$ ) (ii) utilizarea vortexurilor vectoriale. Astfel s-au realizat si caracterizat elemente optice diffractive care genereaza vortexuri optice fractionare. Acestea au fost, de asemenea caracterizate din punct de vedere functional, testandu-se transmiterea informatiei optice pe un canal in spatiu liber.
- (ii) Utilizarea vortexurilor vectoriale in care polarizarea radiatiei este un grad de libertate additional momentului cinetic orbital. In acest caz elementele optice diffractive care genereaza vortexuri vectoriale sunt masti de faza binare care prezinta numai doua nivele de inaltime. Acest rezultat conduce la fezabilitatea sistemului de comunicatii optice in spatiu liber datorita usurintei de fabricatie a acestor masti binare.

De asemenea au fost investigate experimental si numeric alte solutii tehnice pentru generarea vortexurilor optice cu aplicatii in comunicatii optice. Astfel s-au obtinut elemente optice diffractive care opereaza in transmisie utilizandu-se ca metoda de fabricatie replicarea de tip molding.

S-a investigat posibilitatea de a obtine vortexurilor optice utilizandu-se circuite fotonice pe baza de ghiduri de unda. Acest rezultat este important deoarece conduce la miniaturizarea sistemului de generare a vortexurilor optice fapt care confera o fiabilitate sporita.

S-au investigat modul in care se comporta vortexurile optice de-a lungul unui canal de informatie in spatiu liber care prezinta turbulente. S-a studiat integritatea vortexurilor optice transmise in conditii de turbulenta si s-a verificat astfel caracterul securizat al comunicatiei.

S-a efectuat un studiu despre metoda de a multiplexa doua sau mai multe vortexuri in acelasi fascicul de iesire a unui comunicator optic in spatiu liber realizat in cadrul proiectului HOLCOMM si descris in rapoartele de etapa precedente. Acest sistem se bazeaza pe un ansamblu de diode laser modulate independent in schema OOK (on – off key), a unui ansamblu de elemente optice diffractive care genereaza vortexuri optice cu sarcini topologice diferite, si a unui ansamblu de oglinzi semiargintate. Cu toate ca sistemul respective realizeaza superpozitia fasciculelor optice cu sarcini topologice diferite, exire sta dezavantajul pierderilor de radiatie prin oglinzile semi argintate. Astfel, s-a identificat posibilitatea de a imbunatatii sistemului respectiv, sis a gasit o solutie tehnica care elimina acest dezavantaj. S-au identificat elementele de proprietate intelectuala conferite de aceasta solutie tehnica si s-a intocmit documentatia tehnica necesara pentru a se realiza o cerere de brevet care va fi depusa in cursul lunii decembrie.

De asemenea s-a investigat rata de transmisie a modelul functional de comunicatii optice in spatiu liber in domeniul spectral vizibil, in mod specific la lungimea de unda de 635nm. In etapele precedente s-a realizat un model functional care opereaza in infrarosu. Alegerea domeniului spectral vizibil se datoreaza usurintei de aliniere a componentelor optice in sistemul de comunicatii si a usurintei de aliniere intre blocul de emisie si cel de receptie al comunicatorului.

### **Masti de faza spirala reflective pentru generarea vortexurilor optice fractionare**

Prezentam fabricarea si caracterizarea mastilor de faza spirala reflective pentru generarea vortexurilor optice cu sarcina topologica fractionara. Procesul de fabricare a acestora este unul reproductibil, bazat pe tehnici standard de microfabricatie precum fotolitografie si corodare cu ioni reactivi (RIE), process similar fabricarii si mastilor de faza spirala reflective prezentate in rapoartele de faza anterioare. Mastile de faza opereaza in reflexie generand sarcini topologice  $m=0.5$ . Caracterizarea structurala si functionala demonstreaza calitatea optica a elementelor optice diffractive fabricate.

In vederea stabilirii parametrilor geometrici pentru proiectarea si fabricarea structurilor mai sus mentionate, am realizat simulari pe baza integralei de difractie, in Matlab. Calculul integralei de difractie a fost detaliat intr-un raport de faza anterior.

In figura 1 sunt ilustrate rezultatele simularilor pentru generarea unui vortex fractionar de ordin 0.5. Fig. 1. a) prezinta masca de faza spirala cu diferenta de faza de  $\pi$  intre nivelul maxim si cel minim. Intensitatea unui vortex optic fractionar de sarcina topologica 0.5 este prezentata in fig. 1. b), partea imaginara a campului electromagnetic in fig. 1. c), iar distributia de faza in fig. 1. d).

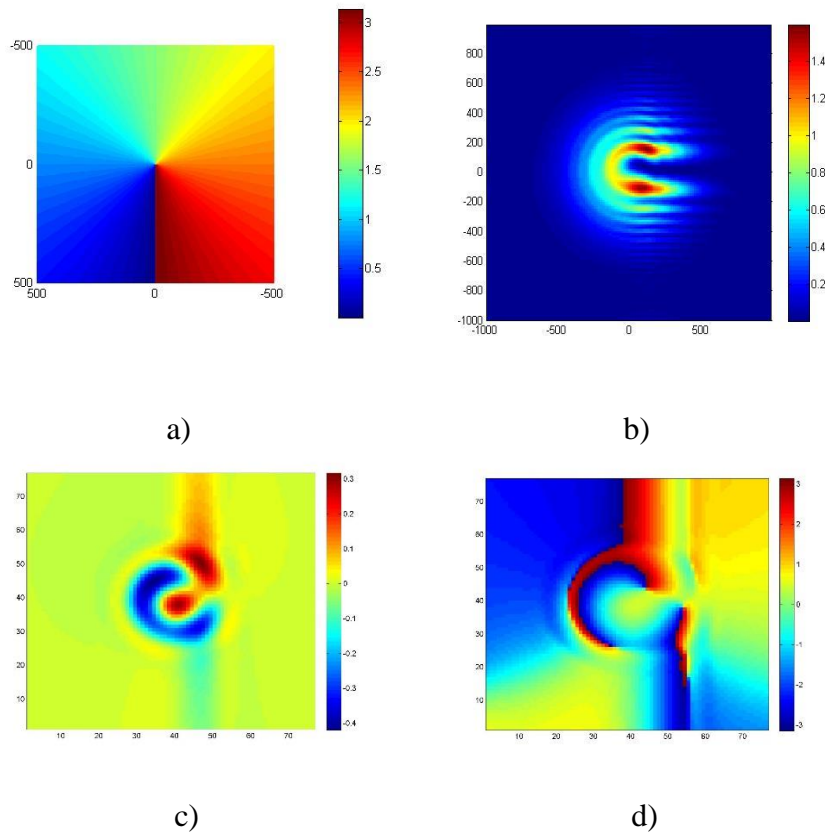


Fig. 1. a) SPP de ordin 0.5; b) intensitatea vortexului optic fractionar  $m=0.5$ ; c) imaginar; d) faza.

*Proiectare masti de faza*

Am proiectat masti fotolitografice pentru lungimea de unda a radiatiei electromagnetice incidente  $\lambda=635$  nm care sa genereze vortexuri optice cu sarcina topologica fractionara 0.5. Pentru a obtine o diferenta de faza de  $\pi$  diferenta maxima de nivel si cea minima trebuie sa fie de 140 nm. In acest scop, am folosit 3 masti fotolitografice, pentru a obtine structuri de faza cu 8 nivele. Prima masca a fost utilizata pentru a obtine o adancime de corodare de 80 nm, cea de-a doua – 40 nm, cea de-a treia – 20 nm.

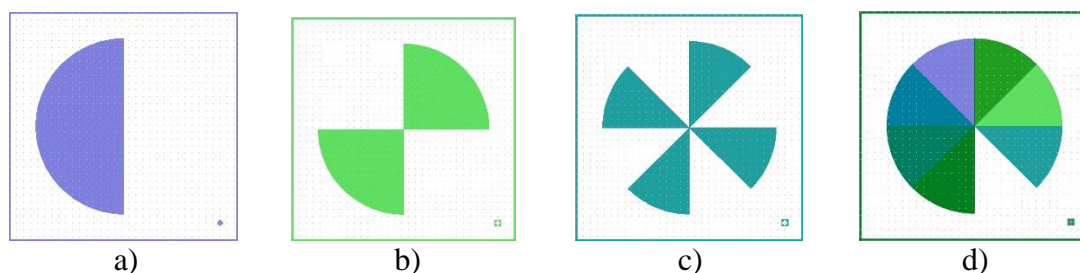


Fig. 2. Masti fotolitografice pentru fabricarea elementelor de faza spirala de ordin fractionar a) masca 1, pentru corodare 80 nm; b) masca 2, pentru corodare 40 nm; c) masca 3, pentru corodare 20 nm; d) suprapunerea celor trei masti fotolitografice.

Procesul de fabricare a mastilor de faza spirala ce genereaza vortexuri optice fractionare este

similar cu cel aferent masilor de faza pentru generarea vortexurilor optice cu sarcina topologica numar intreg, acesta din urma fiind prezentat intr-un raport de faza anterior. Singura diferenta intre cele doua procese de fabricare consta in alegerea altor adancimi de corodare pentru fiecare dintre cele 3 procese fotolitografice: 80 nm pentru primul process, 40 nm pentru cel de-al doilea si 20 nm pentru cel de-al treilea, astfel incat diferenta de faza introdusa sa fie de  $\pi$ .

### *Caracterizare structurala calitativa*

In continuare vom prezenta caracterizarea structurala a masilor de faza spirala de ordin fractionar. In fig. 3. Este prezentata imaginea unei masti de faza de ordin 0.5 in 8 nivele de discretizare realizata cu un microscop optic. Se pot observa 8 sectoare de culori diferite, acestea reprezentand diferite adancimi de corodare. Nivelul minim al structurii este reprezentat de culoarea albastru turcoaz, nivelul maxim al probei fiind reprezentat de culoarea roz. Acest rezultat ofera o informatie calitativa a morfologiei mastii de faza de ordin fractionar.

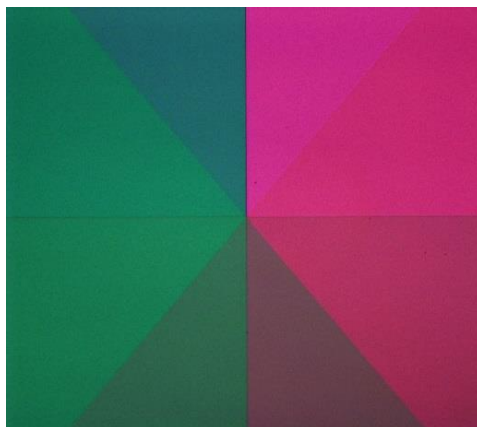


Fig. 3. Imagine microscop optic pentru masca de faza spirala de ordin fractionar  $m=0.5$ .

### *Caracterizare structurala cantitativa*

In scopul de a valida calitatea optica a mastii de faza spirala fractionara am realizat si o caracterizare structural cantitativa cu ajutorul interferometrului de lumina alba. Profilul 3D al structurii este prezentat in fig. 4. Uniformitatea acesteia pe o sectiune transversala este ilustrata in fig. 5, iar in tabelul 1 sunt date valori pentru diferentele de nivel ale celor 4 sectiuni transversale. Din tabelul 1 rezulta diferente de inaltime intre 2 nivele consecutive cuprinse intre 11.9 si 28.4 nm, iar diferenta de inaltime intre nivelul maxim si el minim este de 146.7 nm. In etapa de proiectare am stabilit in urma calculelor, a simularilor si in limita restrictiilor tehnologice ca diferenta intre doua nivele consecutive sa fie de 20 nm (in cazul masilor de faza spirala de ordin intreg calculul a dat 40 nm), iar diferenta de nivel intre maxim si minim sa fie de 140 nm (in cazul masilor de faza

spirala de ordin intreg calculul a dat 280 nm).

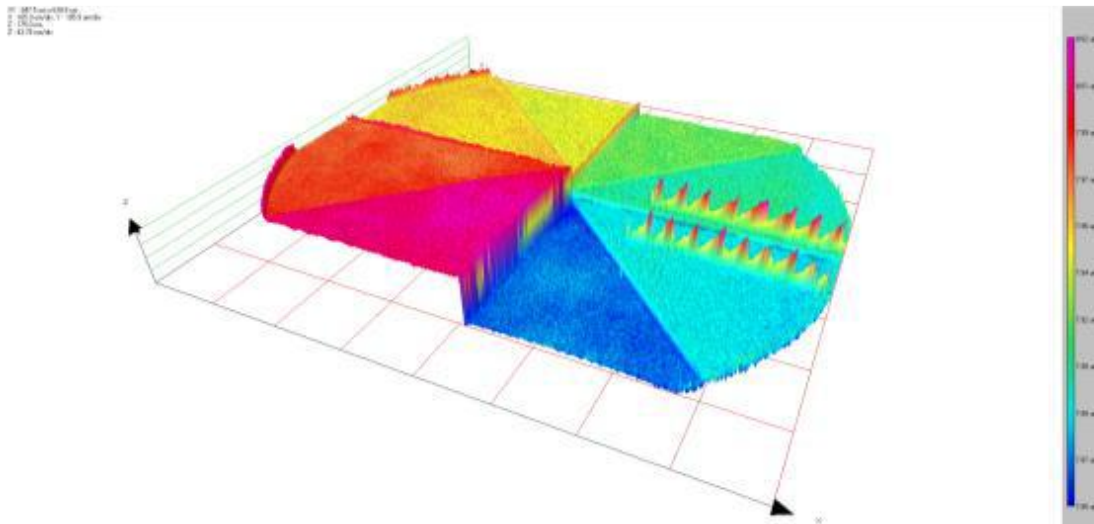


Fig. 4. Imagine WLI pentru masca de faza spirala de ordin fractionar  $m=0.5$

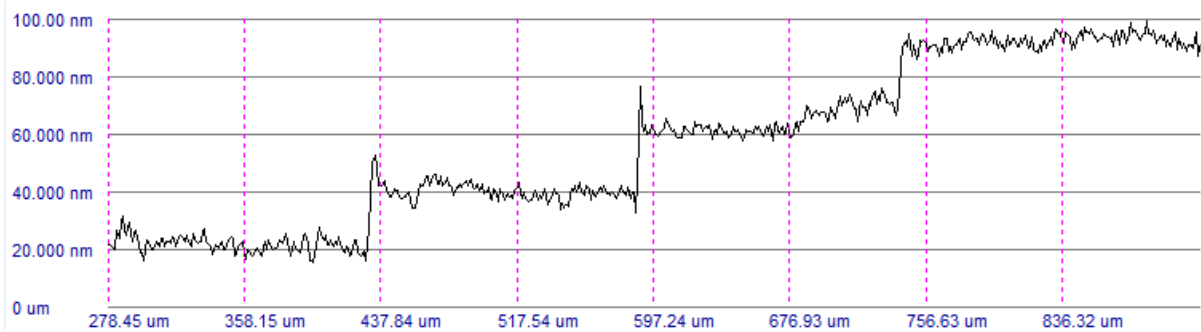


Fig. 5. Profil sectiune pentru masca de faza spirala de ordin fractionar  $m=0.5$

(nm)→	1	2	3
$\Delta z$ (S1)	18.2	22.8	17.3
$\Delta z$ (S2)	17.9	11.9	19.3
$\Delta z$ (S3)	24.4	22	30.6
$\Delta z$ (S4)	28.4	146.7	23.6

Tabel 1. Diferentele de nivel pentru cele 4 sectiuni transversal pentru masca de faza spirala de ordin fractionar  $m=0.5$

#### Caracterizare functionala: Generarea unui vortex fractionar

Dorim sa caracterizam functional mastile de faza spirala de ordin fractionar. In acest scop am realizat un montaj experimental similar celui din fig. 5. a). O dioda laser care emite radiatie electromagnetica la lungime de unda  $\lambda=633$  nm, este transmisa printr-o apertura numerica cu scopul

de a regla diametrul sectiunii transversal a fascicului laser. Dupa obtinerea unui diametru optim, fascicului este trimis la incidenta normala pe masca de faza in reflexie de ordin intreg printr-un beam-splitter (BS), divizor de fascicul. In urma difractiei fascicului incident gaussian pe elementul de faza se genereaza un vortex optic fractionar cu sarcina topologica  $m=0.5$  ilustrat in fig. 5. b). Poate fi observata singularitatea de faza in centrul “potcoavei”, intensitatea fascicului laser fiind zero.

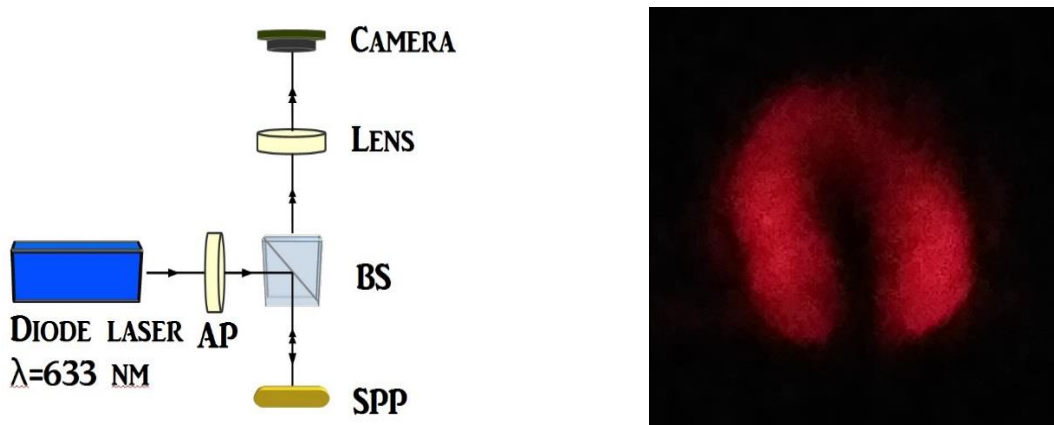


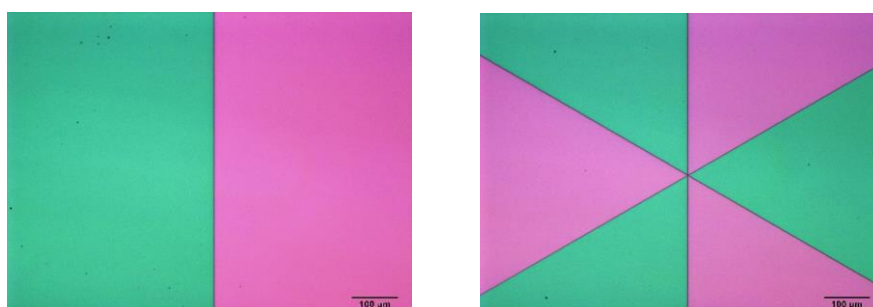
Fig. 5. a) Montaj optic pentru generarea vortexurilor optice fractionare; b) vortex optic de ordin  $m=0.5$ .

## Generarea vortexurilor optice vectoriale

### *Realizarea mastilor de faza binare*

O metoda de a genera vortexuri optice vectoriale de diferite sarcini topologice reprezinta interferenta modurilor petale intr-un interferometru Sagnac. In acest scop am realizat elemente de faza binara fabricate in reflexie, intr-un singur proces fotolitografic si unul de corodare cu ioni reactivi (acelasi proces de fabricare ca in cazul mastilor de faza prezentat detaliat intr-un raport de faza anterior). In procesul fotolitografic s-a utilizat prima masca folosita si in cazul mastilor de faza spirala. Pentru corodarea in plasma RIE, s-au corodat 160 nm astfel incat diferenta de faza introdusa de diferenta dintre nivelul maxim si cel minim al structurii sa fie de  $\pi$ .

In figura 6 sunt ilustrate imaginile obtinute la microscop optic pentru mastile de faza reflexive fabricate de diferite ordine: a) 1, b) 3, c) 6, d) 8.





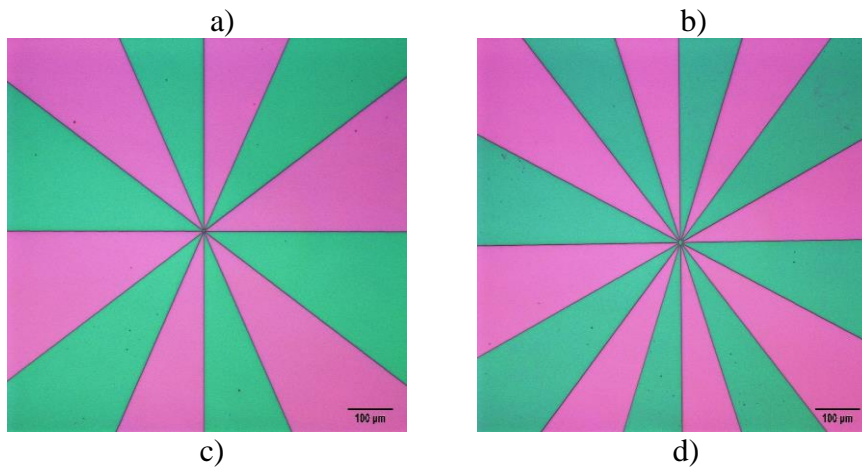


Fig. 6. Imagini microscop optic pentru masti de faza binare de ordin a) 1; b) 3; c) 6; d) 8.

In scopul generarii vortexurilor optice vectoriale a fost realizat un montaj experimental – un interferometru Sagnac ilustrat in fig. 7. Radiatia electromagnetica de lungime de unda de 633 nm emisa de un laser HeNe este cade pe o oglinda, apoi este transmisa pe o lama de unda de injumatatire (HWP, half wave plate) care are rol de a genera un fascicul in polarizare liniara, dar si de a echilibra intensitatea pe cele doua brate ale interferometrului.

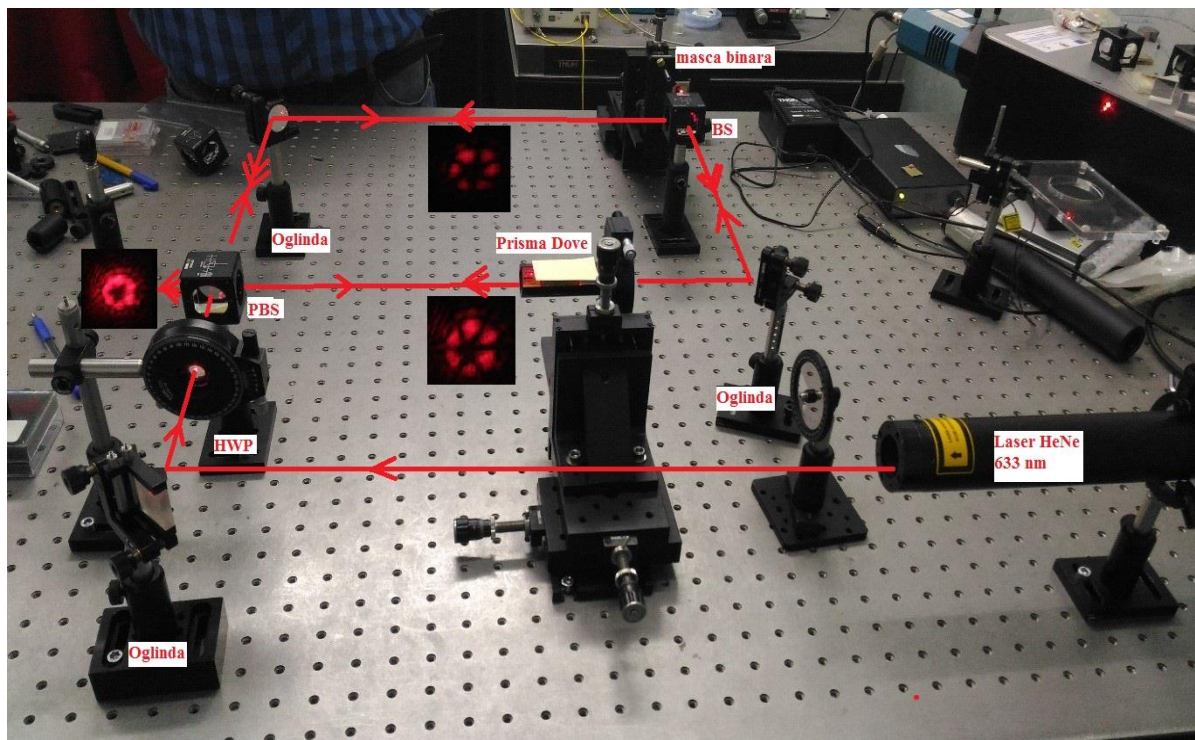


Fig. 7. Montaj experimental pentru generarea vortexurilor optice vectoriale cu ajutorul unui interferometru Sagnac

Aceasta este divizata de un divizor de fascicul de polarizare (PBS, polarizing beam splitter) in radiatie polarizata vertical pentru directia corespunzatoare transmisiei si in radiatie polarizata

vertical pentru directia reflexiei, perpendiculara celei dintai. Pentru cazul intai, radiatia polarizata vertical este reflecata de o oglinda la 45 de grade, ajungand la incidenta normala pe masca de faza binara dupa trecerea printr-un divizor de fascicul (BS, beam splitter). Fascicul gaussian difractat pe masca de faza va genera modul petale care se va propaga pe cale inversa celui incident astfel incat reflectat fiind de BS, oglinda la 45 de grade, este transmis de PBS pe ecran. Radiatia cu polarizare orizontala este transmisa prin prisma Dove, polarizarea nefiind modificata, este apoi reflectata de o oglinda la 45 de grade, transmisa prin BS, difractata de masca de faza binara genereaza modul petale si se intoarce pe traiectoria radiatiei incidente. Prisma Dove are rolul de a roti la 90 de grade modul petale ajungand pe ecran dupa transmiterea prin PBS. Aici are loc interferenta dintre cele doua moduri petale defazate la 90 de grade, obtinandu-se astfel vortexuri vectoriale cu ajutorul interferometrului Sagnac.

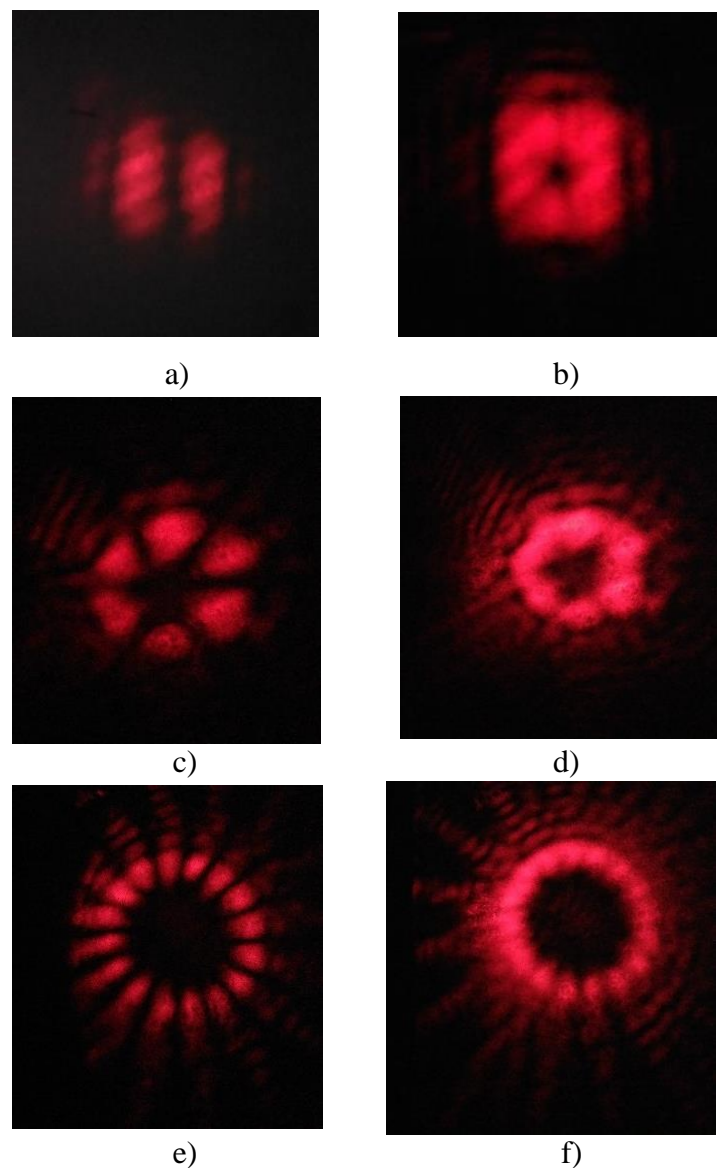


Fig. 8. Moduri petale de ordin a) 2; c) 6; e) 16 pentru a genera vortexuri vectoriale de ordin b) 1; d) 3; f) 8.



In fig. 8. sunt ilustrate modurile petale cu care s-au generat vortexuri vectoriale. Am generat vortexuri optice vectoriale de ordin 1, 3, respectiv 8 (fig. 8. b) d) f)) din moduri petale de ordin 2, 6, respectiv 16 (fig. 8. a), c), e))

### **Masti de faza spirala in transmisie**

Fluxul tehnologic pentru replicare structuri fotonice prin tehnica replica molding (fig. 9) include trei etape principale si anume:

- 1) fabricare „master” (tipar initial) prin prelucrarea 3D a unui substrat in cazul de fata masca spirala de faza;
- 2) fabricare replicii prin transferul masterului in poli-dimetilsiloxan (PDMS) – intarirea pre-polimerului PDMS in contact cu masterul si apoi desprinderea PDMS de master;

### **Microprelucrarea componentelor optice prin replicare**

Pentru a obtine componenta optica in PDMS trebuie parcursa urmatoarea succesiune de operatii:

1. Preparare prepolimer PDMS din componentele A+B in raport 10 :1, omogenizare prin amestecare timp de 5 min. si vidarea amestecului pentru eliminarea incluziunilor gazoase;
2. Tratarea masterului cu agent de demulare timp de 10 min. in incinta ermetica. Agentii de demulare faciliteaza desprinderea moldului de master si pot fi de tip bariera sau de tip reactiv. Am experimentat varianta trimetil-clor silan, care este cea mai simpla si in acelasi timp cea mai eficienta pentru ca: trimetil-clor silanul este volatil, nu necesita preparare de solutie, nu necesita solvent si implicit nu trebuie asigurata compatibilitatea solventului cu materialul din care este confectionat masterul.
3. Etalare prepolimer PDMS peste masterul tratat cu agent de demulare;
4. Tratament termic in etuva la 60 °C, timp de 3 ore pentru solidificare PDMS;
5. Demulare PDMS - desprinderea mold-ului de master;
6. Caracterizare preliminara.

Caracterizarea functionala s-a efectuat iluminand elementul optic difractiv cu un fascicul laser cu profil Gaussian inregistrandu-se imaginea fasciculului difractat atat in campul apropiat cat si in campul indepartat. Imaginea din camp apropiat ilustrata in Fig. 9 a releva structura componentei optice unde se pot observa sectoarele de cerc care imprima fasciculului Gaussian faza azimutala. In camp indepartat se observa figura de difractie de tip petala.

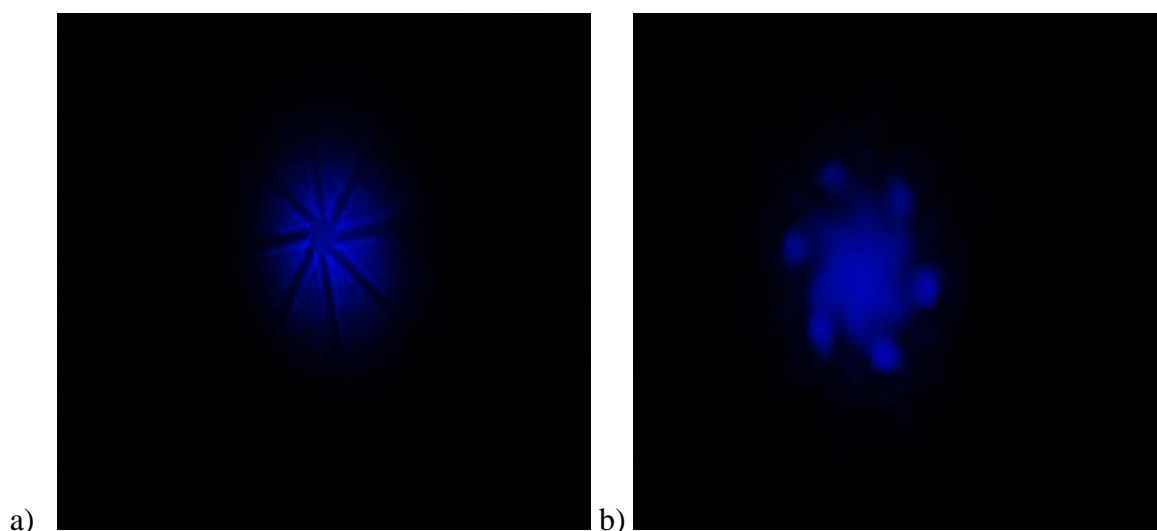


Fig. 9. Imaginea in camp apropiat (a) si in camp indepartat (b) a unui fascicul Gaussian transmis printr-un element optic difractiv care opereaza in transmisie.

### **Generarea vortexurilor optice in ghiduri dielectrice prin combinarea modurilor de ordin 1 pe directia verticala si orizontala**

Am demonstrat teoretic, prin simulari, generarea vortexurilor optice in ghiduri dielectrice pe baza de nitrura de siliciu, prin compunerea modurilor de ordin intai a ghidurilor pe directie verticala respectiv orizontala. Fiecare mod se propaga in ghidul de unda in urma cuplarii indicelui efectiv al acestuia cu ale altor ghiduri de unda. Rezultatele simularilor BPM (Beam Propagation Method) arata o aparitie periodica a vortexurilor optice in ghidul de unda ca urmare a diferentei de indice efectiv intre moduri.

In literatura, s-a demonstrat generarea vortexurilor optice si in ghiduri de unda, acestea fiind emise pe directia perpendiculara planului circuitului optic integrat. Este cunoscut faptul ca superpozitia modurilor de ordin intai a ghidurilor pe directie verticala, respectiv orizontala, permite propagarea vortexului in ghidul de unda daca exista un defazaj de 90 de grade intre cele doua moduri.

Propunem un model de circuit optic integrat pe baza de nitrura de siliciu pentru generarea vortexurilor optice care sa se propage intr-un ghid de unda, nu in spatiu liber.

### **Design**

Am ales ghidul de unda pe baza de nitrura de siliciu (indice de refractie  $n=2$  pentru lungimea de unda  $\lambda=635$  nm) care va fi folosit ca si support si mediu de propagare a vortexului optic. Acest ghid de unda are dimensiunile latime  $l=500$  nm si grosime  $g=400$  nm. Am considerat ghidul acesta ca fiind intr-un invelis de dioxid de siliciu (indice de refractie  $n=1.46$ ). Cuplarea modului vertical de ordin unu s-a realizat printr-un ghid de unda din nitrura de siliciu de o latime  $l=180$  nm si o grosime  $g=200$  nm separat de un layer de dioxid de siliciu de 200 nm grosime. Cuplarea partiala a radiatiei s-a obtinut prin mode-matching a modului fundamental TM a ghidului inferior cu primul mod vertical asimetric a ghidului de unda pentru generarea vortexului.

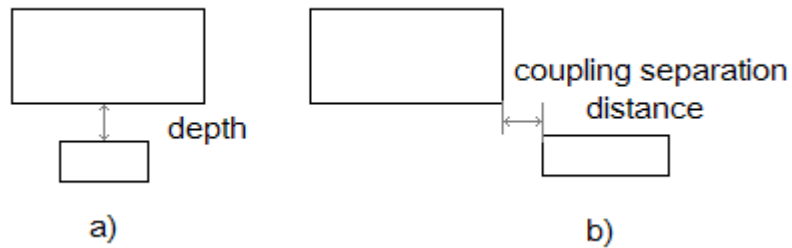


Fig. 10. Sectiune transversala pentru regiunea de cuplaj a) vertical K1; b) orizontal K2.

Urmatorul cuplaj a primului mod orizontal asimetric s-a obtinut prin cuplaj lateral folosind mode-matching cu modul fundamental TM de latime  $l=400$  nm si grosime  $g=200$  nm aflat la  $100$  nm de directia laterala. Ambele ghiduri de unda folosite pentru cuplaj sunt la acelasi nivel pe directia verticala asa cum se poate observa in 10 a) (pentru cuplaj vertical) si respectiv pentru cuplaj orizontal in fig. 10 b). Generarea vortexurilor optice folosind polarizarea TE este similara, dar latimea ghidurilor de cuplaj este diferita fata de cazul polarizarii TM deoarece variatia indicelui de refractie efectiv cu latimea ghidului de unda difera de cazul polarizarii TE. Latimea ghidului de unda pentru cuplarea modului vertical este  $200$  nm, pe cand latimea ghidului de unda pentru cuplajul lateral al modului orizontal este  $280$  nm. Ghidul de unda de cuplaj este plasat la  $130$  nm pe directia laterala in cazul polarizarii TE. Parametrii geometrici a ghidului vortex sunt aceiasi ca si in cazul polarizarii TM.

Puterea a doua moduri asimetrici trebuie sa fie aceeasi, de aceea, ambele ghiduri de unda de cuplaj sunt alimentate cu aceeasi putere prin jonctiunea simetrica Y. De asemenea, lungimea fiecarei regiuni de cuplaj a fost ajustata in asa fel incat puterea cuplata in ghidul de unda sa fie egala pentru ambele moduri. Layout-ul pentru simularea BPM este prezentat in fig. 11 atat pentru polarizarea TM.

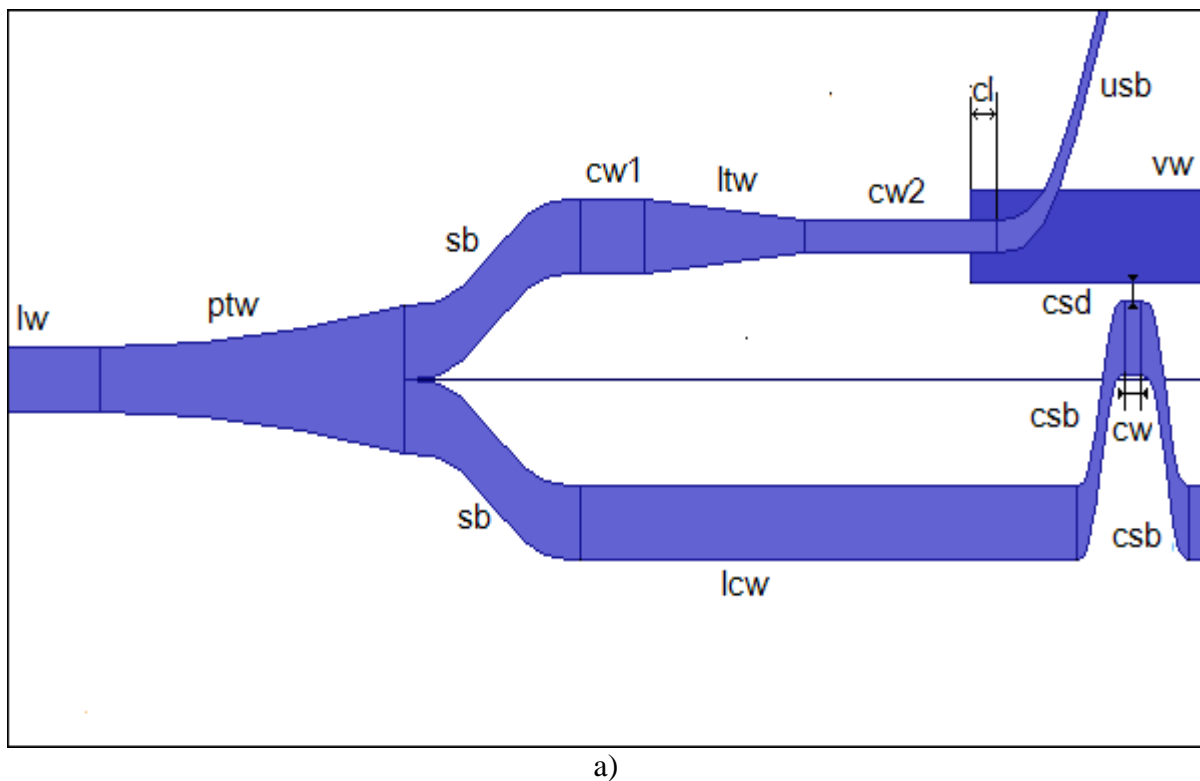


Fig 11. Layout pentru simularea BPM folosind polarizare TM;

Latimea ghidului de intrare este de 350 nm. Regiunea (tapered) parabolica si S-bent sunt legate printr-un ghid de lungime de 400 nm

## Rezultate simulari

Campul rezultat din superpozitia a doua moduri de ordin unu care se propaga in ghidul de unda vor avea profilul unui vortex optic cu sarcina topologica 1. Acest profil apare periodic datorita diferentelor de indice efectiv asociat modului vertical de ordin unu, respectiv modului orizontal de ordin unu. In aceste conditii, apare un defazaj de 90 de grade la anumite pozitii de-a lungul ghidului de unda. In figura 12 este ilustrata intensitatea campului electromagnetic care se propaga in ghidul de unda. Practic, se pot obtine vortexuri optice cu sarcini topologice de semn opus la capatul ghidului de unda prin introducerea unui defazaj in ghid astfel incat modul vertical si orizontal sa fie defazate cu  $\pm 90$  de grade. Acest lucru se poate realiza prin impunerea unui defazaj intr-unul dintre bratele jonctiunii Y prin efect

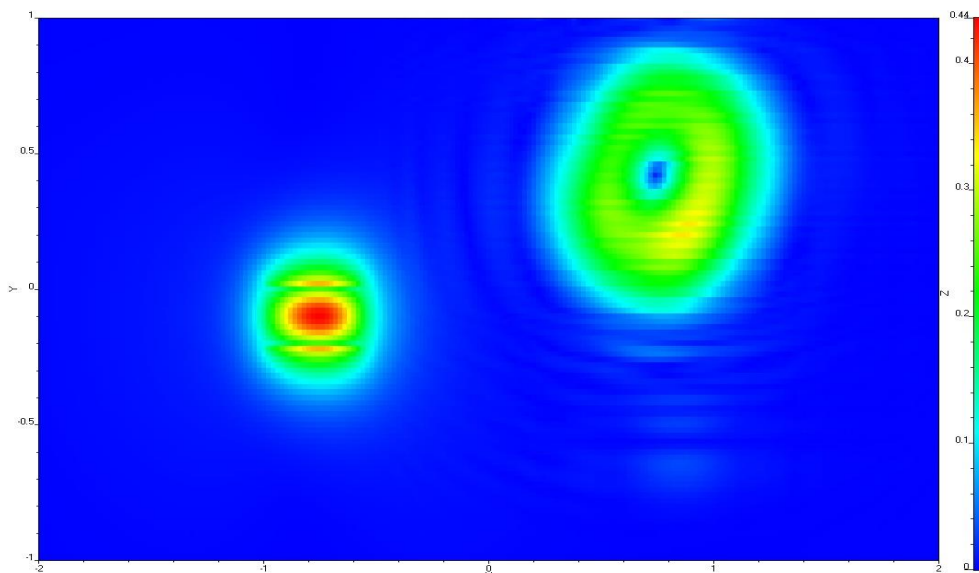


Fig. 12. Campul electromagnetic la iesirea din circuitul fonic

## Experimentarea modelului functional,verificarea transmiterii informatiei in conditii turbulente

Pentru a testa fezabilitatea sistemului realizat în proiect, din punct de vedere al caracterului securizat al informației transmise și al ratei de transmisie, au fost generate holograme (computer generated holograms CGH) prin simularea interferenței dintre o undă plană, ca fascicul de referință și o undă provenită de la obiecte de tipul fază în spirală. Scopul este de a forma în câmp îndepărtat fascicule laser care conțin diferite ordine de vortex-i optici, care se propagă și formează imagini separate.

Aceste CGH se generează în MATLAB, iar rezultatul îl reprezintă a matrice de fază care este convertită într-o imagine cu nivele de gri. Aceasta poate fi adresată pe modulatorul spațial de lumină (ca un control al corectitudinii proiectării), apoi poate fi fabricată o mască de amplitudine

sau fază pe o plăcuță de sticlă. Avantajul acestor măști fabricate pe plăcuțele de sticlă constă în faptul că sunt mai ușor de integrat în sisteme pentru aplicații practice..

Pentru obținerea unor fascicule care conțin un singur vortex optic, CGH corespunzătoare arată ca în Fig. 13a. Dacă se dorește obținerea mai multor fascicule de tip vortex optic pornind de la unul singur incident de tip gaussian, atunci se poate simula interferența dintre o undă plană de referință și suprapunerea mai multor distribuții de fază de tipul helical Fig. 13b.

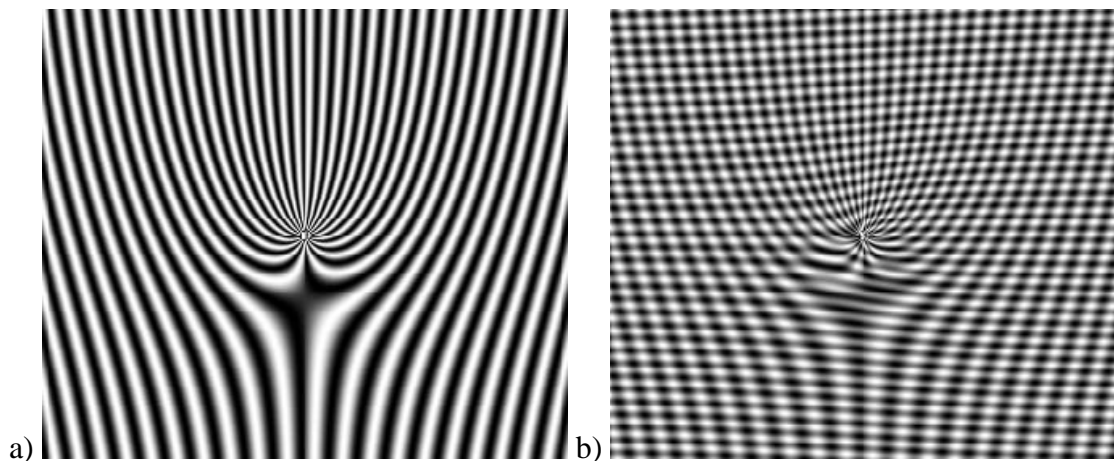


Fig.13. CGH for  $m=20$  (a), CGH for  $m_1=20, m_2=8$  (b).

De-a lungul unei propagări în spațiul liber, intervin zgomote datorate turbulențelor atmosferice. Acestea introduc diferite modificări în distribuția de intensitate de tip vortex optic, cât și în distribuția de fază. Am generat două tipuri de turbulențe prin implementarea în MATLAB a ecuațiilor specifice.

1. TIPUL I: o distribuție a turbulenței atmosferice proporțională cu o putere fracționară a razei din fiecare punct. Aceasta a fost implementată în MATLAB ca o distribuție de fază, într-un subprogram iterativ care scanează toți cei 600x800 pixeli ai hologramei, generând simultan și CGH pentru vortex-i optici. Acestea se vor adresa împreună pe modulatorul spațial de lumină (Fig. 14).
2. TIPUL II: o distribuție a turbulenței atmosferice de tipul phasescreen implementată ca transformată Fourier a unor coeficienți generați random. Aceasta se generează separat, rezultând o matrice cu valori ale fazei în fiecare punct, care poate fi adresată pe modulatorul spațial de lumină separat față de CGH pentru vortex-ii optici.

```
sz=nx/2;
cx=(-sz:sz);
mx=(ones(2*sz+1,1)*cx).^2;
mr=sqrt(mx+transpose(mx));
psd=0.023*mr.^(-7/6);
psd(sz+1,sz+1)=0;
randomcoeffs=randn(2*sz+1)+i*randn(2*sz+1);
```

```

phasescreen=real(fft2(fftshift(sqrt
(psd).*randomcoefs)));
figure,imagesc(phasescreen),colormap(gray),colorbar,titl
e('m10 100000 -5pe4')

```

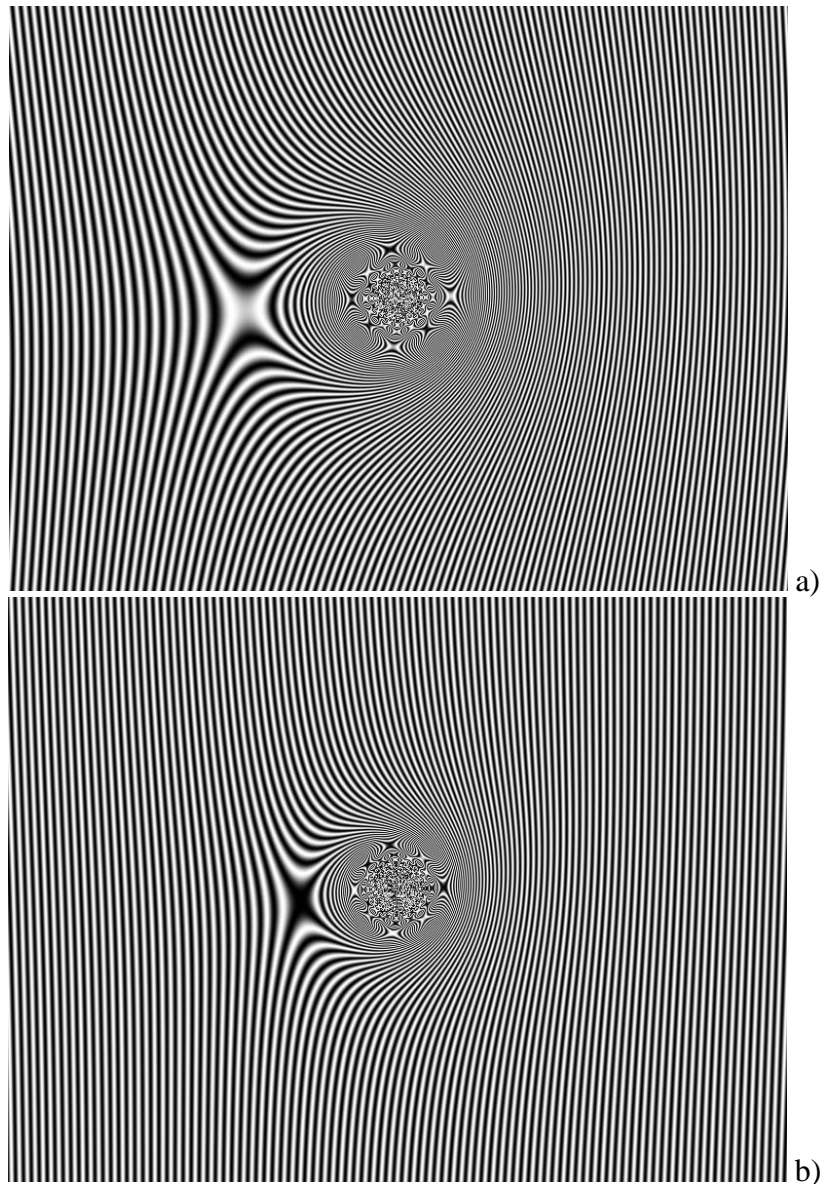


Fig.14. Distribuția de fază adresată pe modulatorul spațial de lumină dentru o combinație de turbulență de TIPUL I generată simultan cu un vortex optic de ordinul 10. Puterae fracționară a razei este a)  $5/6$ , și b)  $5/3$

Experimental, am considerat trei situații diferite

1. pe modulatorul spațial de lumină am adresat primul tip de turbulență simultan cu CGH corespunzătoare a doi sau trei vortex-i optici
2. pe modulatorul spațial de lumină am adresat al doilea tip de turbulență după ce am simulat interferența dintre aceasta și CGH al unui vortex optic
3. am considerat un montaj optic format dintr-un laser, al cărui fascicul este expandat cu un telescop, incident pe o mască de amplitudine realizată la IMT, urmat de modulatorul spațial de lumină pe care se adresează o matrice de fază generată ca pentru turbulența de TIPUL II.



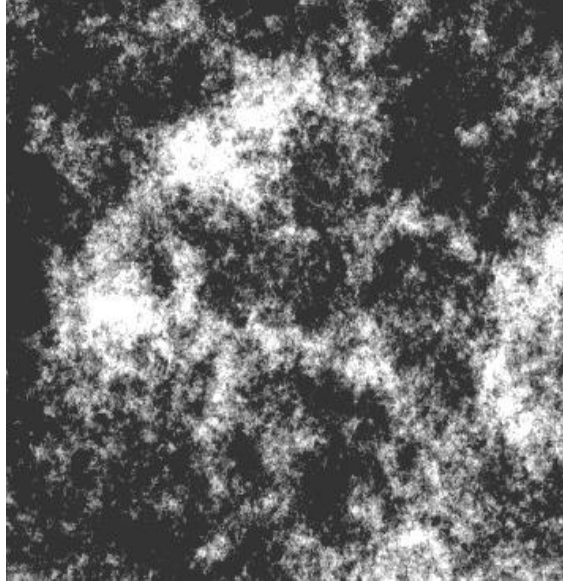


Fig.15. Distribuția de fază cu rol de turbulență de TIPUL II adresată pe modulatorul spațial de lumină a unei turbulențe de tipul non-Kolmogorov. Aceasta este adresată singură pe modulatorul spațial de lumină în cadrul experimentului cu masca de amplitudine

Imaginile experimentale obținute sunt vizibil modificate față de situația în care nu există turbulență. Pentru situația experimentală descrisă la punctul 1., imaginile sunt prezentate în Fig. 16. Este reprezentat doar maximul de ordinul I. Se observă că raportul semnal zgomot este cu atât mai mare cu cât puterea fracționară este mai mică, pentru factorul de fază de  $10^3$ . Situația este diferită pentru factorul de fază de  $10^4$ . De asemenea,

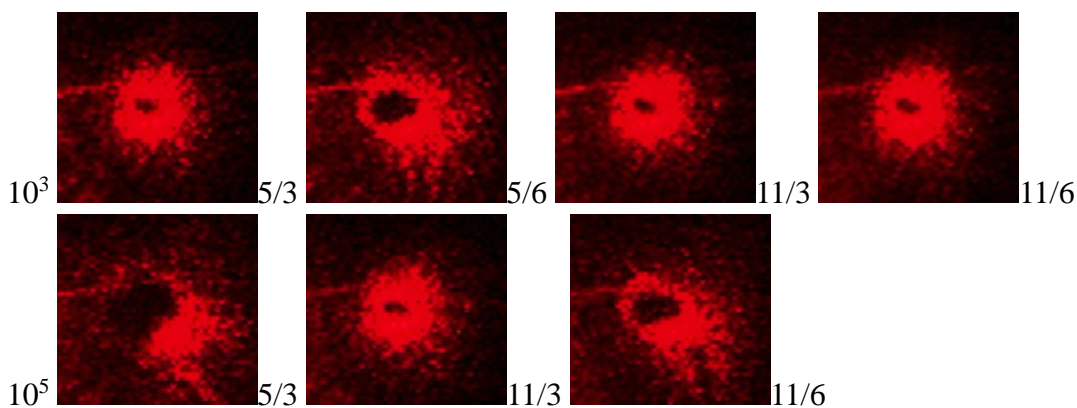


Fig. 16. Imagini experimentale ale fascicolului laser cu o distribuție de intensitate de tip vortex optic, modificată în funcție de âputerea turbulenței optice introdusă în drumul optic. Primul rând conține turbulențe proporționale cu  $10^3$ , iar pe rândul al doilea, turbulența este proporțională cu  $10^4$ . Puterile fracționare ale razei sunt specificate în fiecare caz.

În Fig. 17. sunt prezentate imagini experimentale obținute în configurația descrisă la punctul 3. Masca de amplitudine realizată la IMT conține suprapuși în configurația perpendiculară, CGH pentru două valori diferite ale OAM:  $m_1$  și  $m_2$ . Se observă imaginea din câmp îndepărtat ca fiind formată dintr-o reprezentare a două spoturi, corespunzătoare celor două valori ale OAM  $\pm m_1$ ,  $\pm m_2$ .

$m_2$ , dispuse pe verticală și orizontală, cât și suma și diferența acestor valori, dispusă în colțuri.

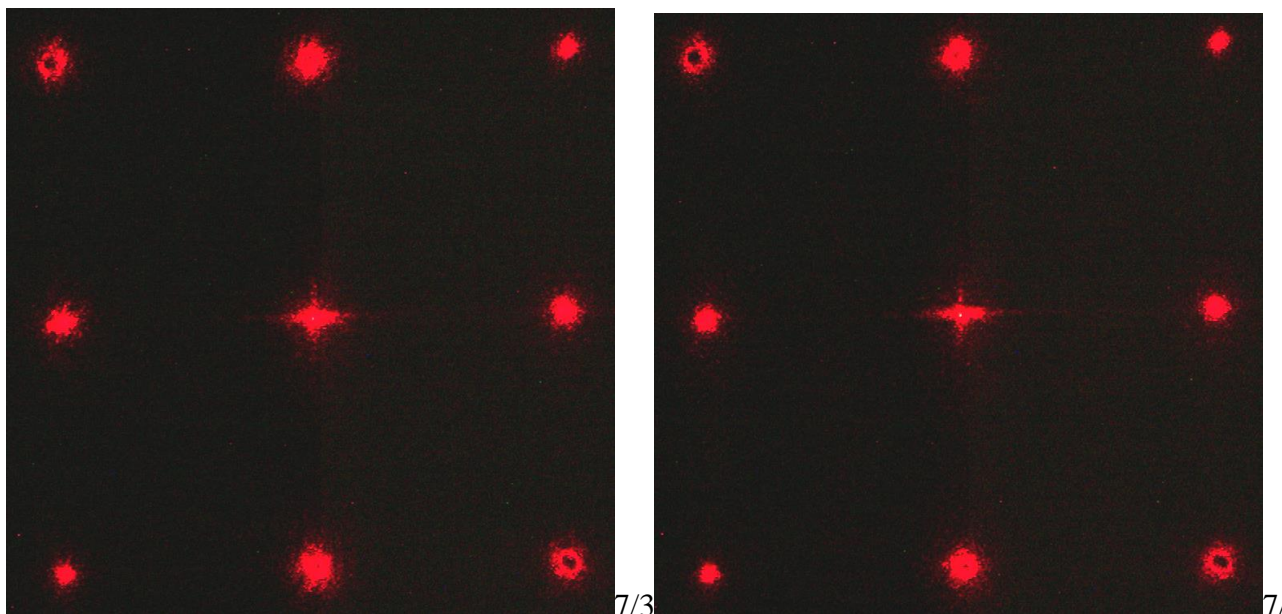


Fig. 17. Imagini experimentale ale vortexurilor optice sortate de o holograma de tip furca

#### References

- [1]. J. Wang, et. al, Nat. Phot.6, 488-496, 2012.
- [2]. JD. Schmidt, Numerical simulation of optical wave propagation with examples in MATLAB, SPIE book.
- [3]. W. Cheng, JW. Haus, Q. Zhan, Opt. Express 17, 17829-17836, 2009.
- [4]. G. Gbur, RK Tyson, JOSA 25 (1), pp 225-229, 2008.

### Experimentarea modelului functional, pentru rata de transmisie; Studii de fezabilitate tehnica pentru sistemul propus; Brevetare

Pentru realizarea experimentului de comunicație au fost realizate următoarele module (figura 1):

1. Un modul de emisie laser programabil (figura 18), capabil de a modula intensitatea unei diode laser DL1 în domeniul vizibil la lungimea de undă de 650 nm prin utilizarea unui microcontrolor tip ATMEL ATtiny25. Utilizarea microcontrolorului permite stabilirea precisă a duratei impulsurilor de curent modulatorie și, prin programare adecvata, asigură transmiterea unor secvențe de date pre-programate în vederea efectuării a diverse experimente de comunicații optice. Modulul este dotat cu un obiectiv pentru colimarea fascicului laser care asigură o divergență de aproximativ 1 mrad.



Fig. 18. Modul de emisie

2. Un modul de recepție optoelectronic (figura 2) cu fotodiodă cu siliciu tip PIN, FD1, care transformă fasciculul modulat emis de către dioda laser DL1 în impulsuri cu nivele logice compatibile TTL.

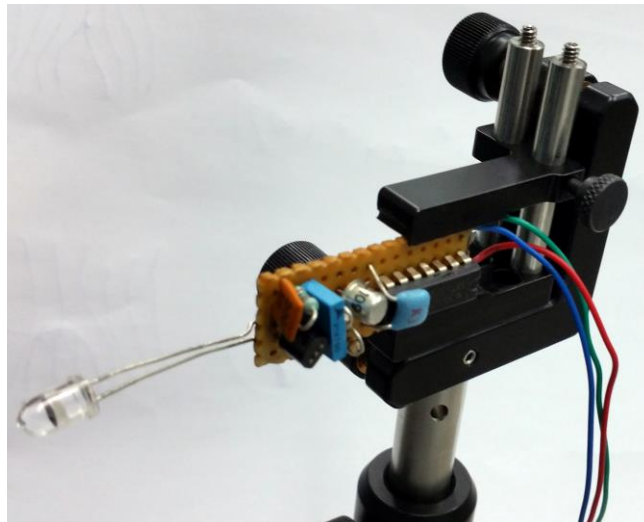


Fig. 19. Modul de recepție

3. Un modul de interfață de comunicație, care realizează interfațarea unui port serial al unui calculator PC cu nivelele TTL necesare modulului de emisie laser și modulului de recepție pentru modularea, respectiv demodularea datelor transmise pe purtătoare laser în domeniul vizibil (650 nm)

Schema electronică a modulelor și conexiunile între acestea sunt descrise de figura 20:

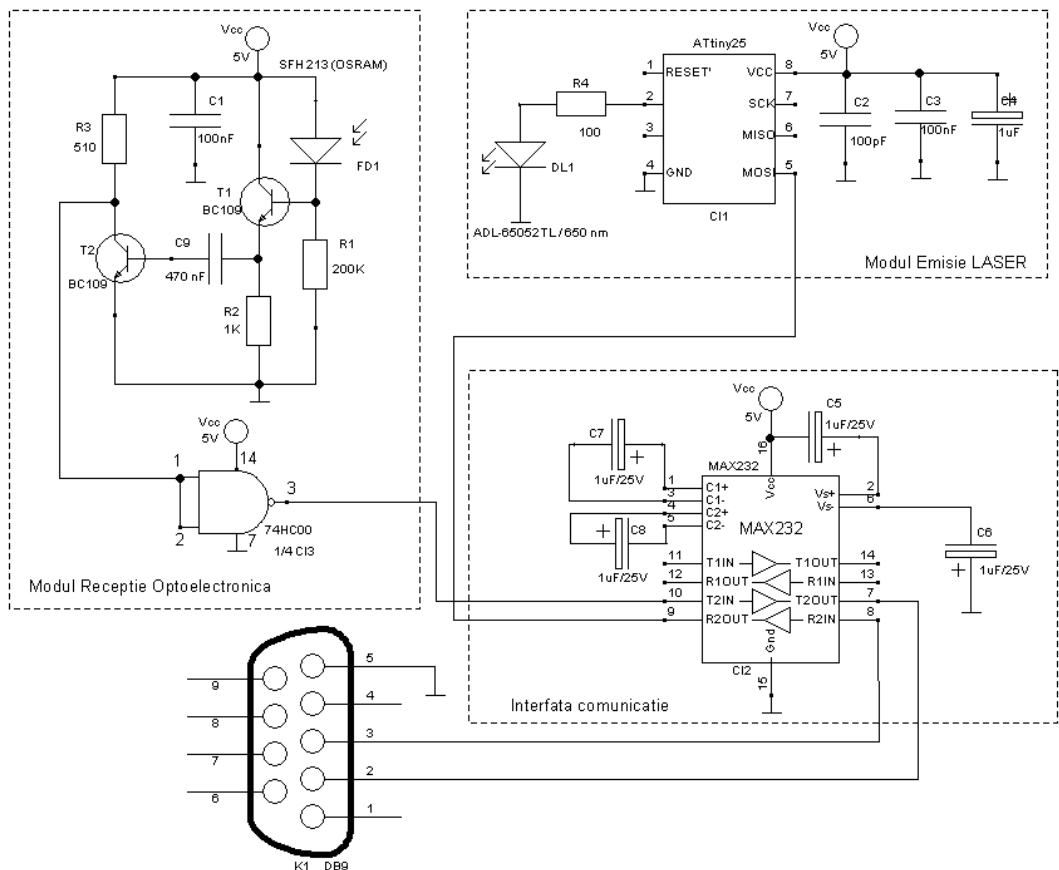


Figura 20 schema electronica a modulelor de emisie si receptie

Pentru transmisia datelor pe port serial a fost folosita aplicatia HyperTerminal (figura 21), in care se pot configura parametrii portului serial pentru comunicatii, continutul secventei de caractere transmise si secventa de date receptionata. Este de asemenea disponibil un istoric al secventelor de date transmise.

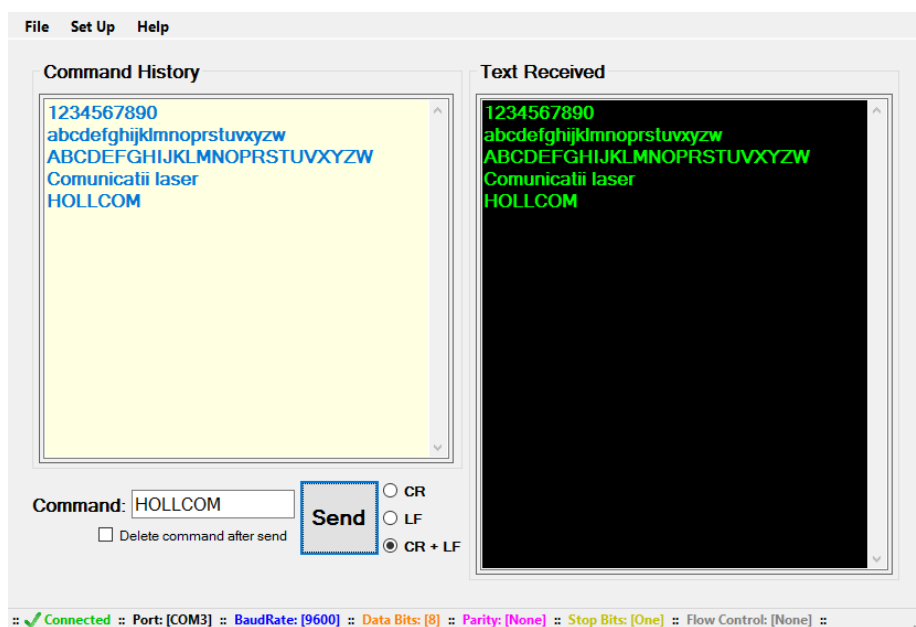


Figura 21. Ilustrarea secventelor de informatie transmise prin comunicatorul optic

La apăsarea butonului “Send”, mesajul tastat în prealabil în câmpul de editare “Command” este transmis prin pinul 2 al interfeței seriale ale PC-ului către interfața de comunicație conectată prin intermediul conectorului K1 (model DB9). Interfața de comunicație transmite semnalul electric de modulație prin conexiunea CI2/pin 9 la CII1/pin 5 către modulul de emisie laser care efectuează modulația optică a fasciculului laser. Puterea optică pentru realizarea experimentului a fost limitată la 1 mW. După efectuarea transmisiei, mesajul transmis rămâne afișat în fereastra “Command history”.

Semnalul optic modulat este recepționat și convertit în semnal electric prin intermediul fotodiodei FD1, este amplificat și formatat la nivel TTL printr-o poartă logică NAND și transmis prin interfața de comunicație către pinul 3 al interfeței seriale a PC-ului. Aplicația HyperTerminal preia acest semnal, îl decodifică și afișează secvența de caractere recepționată în fereastra “Text received”.

## **Anexa 1**

### Publicatii si conferinte

Simultaneous spatially separated detection of multiple orbital angular momentum states, R. Tudor, M. Mihailescu, C. Kusko, I. A. Paun, A. E. Nan, M. Kusko, Optics Communication, 368, 141 (2016)

**97-IBWAP2016-** 5. Engineering and Industrial Physics, The propagation of multiple optical vortices through atmospheric turbulences Eugen SCARLAT, Mona MIHAILESCU, Rebeca TUDOR, Irina Alexandra PAUN, Cristian KUSKO, Mihai KUSKO

Optical Vortex in Asymmetric Arcs of Rotating Intensity, Mona Mihailescu, Rebeca Tudor, Irina A. Paun, Cristian Kusko, Eugen I. Scarlat, Mihai Kusko, 18th International Conference on Optics and Photonics, 13-15 iulie 2016, Stockholm, Sweden