

**UNIVERSITATEA DE STAT DIN MOLDOVA
ȘCOALA DOCTORALĂ ȘTIINȚE ALE NATURII**

**Cu titlu de manuscris
C.Z.U: 535.42:535.317.2:621.385.833.2(043)**

CAZAC VERONICA

**DEZVOLTAREA MICROSCOPULUI HOLOGRAFIC DIGITAL
PENTRU CERCETAREA ELEMENTELOR OPTICE DE
DIFRAȚIE ÎNREGISTRATE PE STRATURI SUBȚIRI DE
STICLE CALCOGENICE ȘI AZOPOLIMERI**

134.01 – Fizica și tehnologia materialelor

Rezumatul tezei de doctor în științe fizice

CHIȘINĂU, 2023

Teza a fost elaborată în cadrul **Laboratorului de Materiale pentru Fotovoltaică și Fotonică, Institutul de Fizică Aplicată al Universității de Stat din Moldova**. Studiile de doctorat au fost efectuate în cadrul **Școlii Doctorale Științe ale Naturii a Universității de Stat din Moldova**.

Conducător științific:

ACHIMOVA Elena, doctor habilitat în științe fizice, conferențiar cercetător, IFA al Universității de Stat din Moldova

Componența comisiei de susținere publică a tezei de doctorat:

CULIUC Leonid, doctor habilitat în științe fizico-matematice, profesor universitar, academician al Academiei de Științe a Moldovei – Universitatea de Stat din Moldova – **președinte**

ACHIMOVA Elena, doctor habilitat în științe fizice, conferențiar cercetător, IFA al Universității de Stat din Moldova – **conducător de doctorat**

SIDORENCO Anatolie, doctor în științe fizico-matematice, profesor universitar, academician al Academiei de Științe a Moldovei, IEN „D. Ghițu” al Universității Tehnice din Moldova – **referent**

URSACHI Veaceslav, doctor habilitat în științe fizico-matematice, conferențiar cercetător, membru corespondent al Academiei de Științe a Moldovei – **referent**

CEBAN Victor, doctor în științe fizice, cercetător științific superior, IFA al Universității de Stat din Moldova – **referent**

Susținerea va avea loc la data de **21.12.2023, ora 15:00** în cadrul ședinței Comisiei de susținere publică a tezei de doctor din cadrul ȘDȘN, Sediul – Școala doctorală Științe ale Naturii, Universitatea de Stat din Moldova (<http://www.usm.md>), str. A. Mateevici 60, blocul 4, auditoriul 222, MD-2009, Chișinău, Moldova.

Teza de doctor și rezumatul pot fi consultate în Biblioteca Națională a Republicii Moldova, Biblioteca Centrală a Universității de Stat din Moldova (MD 2009, mun. Chișinău, str. Alexei Mateevici 60), pe pagina web a ANACEC (<http://www.cnaa.md>) și pe pagina web a USM (<http://www.usm.md>).

Rezumatul a fost expedit la "21 noiembrie" 2023

Președintele Comisiei de Doctorat

doctor habilitat în științe fizico-matematice, profesor universitar, academician



CULIUC Leonid

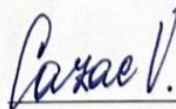
Conducători științifici:

doctor habilitat în științe fizice, conferențiar cercetător



ACHIMOVA Elena

Autor:



CAZAC Veronica

CUPRINS

REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII	4
CONȚINUTUL TEZEI	9
CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI	25
RECOMANDĂRI	27
BIBLIOGRAFIE	29
LISTA PUBLICAȚIILOR LA TEMA TEZEI DE DOCTOR	31
ADNOTATION.....	34
ADNOTARE	35
АННОТАЦИЯ.....	36

REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

Actualitatea și importanța temei abordate

În ultimul deceniu, multe soluții au fost propuse pentru a îmbunătăți performanța componentelor hardware și software a microscopului holografic digital (MHD), folosind dimensiunile actuale ale senzorilor digitali disponibili pe piață precum și în condiții neideale de înregistrare a hologramelor digitale [1-3]. În pofida cercetărilor intense, încă mai există necesitatea de a îmbunătăți MHD, în special pentru studierea tridimensională (3D) a elementelor optice de difracție (EOD) înregistrate pe materiale fotosensibile. Datorită capacității MHD de a efectua investigații minim invazive această tehnică a fost aplicată pentru imagistica 3D a celulelor canceroase [4], a deformării fotoinduse a suprafeței a straturilor subțiri [5] precum și în multe alte implementări fascinante [6].

Elementele optice de difracție reprezintă componente optice compacte capabile să moduleze lumina în diferite forme complexe prin intermediul fenomenului de difracție. Fotolitografia [7], înregistrare cu ajutorul fascicului ionic focalizat [8] și holografia [9] sunt metodele de creare a EOD pe materiale fotosensibile ce sunt utilizate pe larg în ultimile două decenii. Cu toate că aceste tehnici permit obținerea unor EOD calitative, acestea implică mai multe etape inclusiv tratarea chimică a materialului care complică procedeul de obținere a EOD și nu sunt eficiente în timp.

Metoda holografică cu lumină polarizată (HLP) de înregistrare a EOD presupune utilizarea diferitor stări de polarizare ale fasciculelor laser astfel declanșând mecanismul mass-transfer (transport în masa) care duce la formarea EOD cu un relief al suprafeței relativ înalt, fără necesitatea unor etape suplimentare de post-procesare și tratarea chimică a materialului. Dezvoltarea acestei tehnici de fabricare a EOD este importantă pentru a înțelege modul în care interferența luminii poate provoca mișcări macroscopice ale diferitelor tipuri de materiale optice fotosensibile precum și pentru utilizarea eficientă a acestei metode în aplicații fotonice. În acest scop, apare necesitatea de a dezvolta noi abordări analogice și digitale a înregistrării HLP. Designul schemei optice a înregistrării HLP permite integrarea modulatorului spațial de lumina (MSL). Acest dispozitiv este util pentru controlul geometriei și fazei EOD create prin intermediul hologramelor digitale ce sunt generate de computer.

Calitatea EOD este determinată nu doar de metoda de elaborare, ci și de proprietățile materialelor optice sensibile la lumină. Fotosensibilitatea ridicată, rezoluția înaltă, costurile reduse și gama spectrală și de frecvență largă sunt cerințele cheie față de materialele optice. În

plus, este foarte important ca mediul de înregistrare să mențină stabilitatea temporală a EOD creat. Nanomultistraturile (NMS) de sticla de calcogenică (SC) și straturile subțiri azopolimeri (AP) sunt materiale optice care posedă caracteristicile menționate mai sus, inclusiv sensibilitatea la polarizarea luminii. Aceste materiale se potrivesc înregistrării HLP ca metodă de obținere a EOD.

Din acest motiv, cu scopul de a cerceta comportamentul NMS de SC și a straturilor subțiri de AP la aplicarea luminii polarizate, o parte a acestei teze se concentrează pe proiectarea, fabricarea și investigarea EOD create pe aceste materiale. În plus, aplicarea MHD îmbunătățit pentru investigarea cantitativă a EOD obținute va permite obținerea informației esențiale despre proprietățile anizotropice și de birefrință ale acestor materiale.

Scopul cercetării

Scopul principal al acestei lucrări este de a îmbunătăți schema optică și performanța MHD, inclusiv componentele hardware și software, pentru o descriere cantitativă precisă a parametrilor cheie ai diferitelor tipuri de EOD, create pe nanomultistraturi de SC și straturi subțiri de AP prin intermediul înregistrării HLP.

Obiectivele cercetării

Pentru a atinge scopul lucrării, a fost necesară îndeplinirea următoarelor obiective:

- Dezvoltarea algoritmi numerici de reconstrucție a fazei EOD înregistrate pe NMS de SC și straturi subțiri de AP din holograme digitale. Calcularea ulterioară a topografiei reliefului precum și a mapei indicelui de refracție a EOD obținute.
- Modificarea MHD în configurațiile „off-axis” (din *engl.* în afara axei) și „phase-shifting” (din *engl.* cu deplasare de fază) prin introducerea de dispozitive cu cristale lichide în schema optică a microscopului. Calibrarea fazei și polarizării dispozitivelor cu cristale lichide implementate în configurațiile holografice digitale. Determinarea eficacității acestor abordări.
- Dezvoltarea metodelor analogice și digitale a înregistrării HLP pentru crearea diferitelor tipuri de EOD pe NMS de SC și straturi subțiri de AP pe bază de carbazol.
- Aplicarea sistemului imagistic a MHD dezvoltat cu toate instrumentele integrate pentru caracterizarea EOD create.

Metodologia cercetării științifice

Suportul teoretic al tezei a fost efectuat în baza analizei literaturii de specialitate accesată

din bibliotecile electronice ale Universității de Stat din Moldova, Universităților din Tampere și prin accesarea online a revistelor științifice și lucrărilor cu acces deschis.

Pentru realizarea obiectivelor tezei au fost utilizate următoarele metode:

1. Metodele analogice și digitale a înregistrării HLP au fost aplicate pentru a crea diferite tipuri de EOD pe NMS de SC și straturi subțiri AP.

2. MHD în configurația „off-axis” și „phase-shifting” a fost aplicat pentru studierea topografiei suprafeței și calcularea mapei indicelui de refracție a EOD înregistrate pe NML de SC și straturi subțiri de AP.

3. Tehnici de modelare a frontului de undă prin modularea digitală a luminii. Măsurarea și manipularea undelor electromagnetice au fost realizate prin utilizarea dispozitivelor cu cristale lichide.

4. Metoda bazată pe Sparse Phase and Amplitude Reconstruction (SPAR) descris în [10] precum și metoda bazată pe Transformarea Rapidă Fourier (TRF) au fost ajustate și aplicate în algoritmi numerici pentru reconstrucție a fazei din holograme digitale „off-axis”. Ambele metode au fost utilizate pentru calibrarea MSL.

Semnificație teoretică și valoare aplicativă a lucrării

Cercetarea prezentată prezintă un interes deosebit deoarece vizează un domeniu relativ nou și abordează probleme de cercetare care există la nivel internațional. În ultimii ani, se evidențiază necesitatea digitalizării echipamentelor și dispozitivelor științifice, în special a microscopului. Pentru ca MHD să devină competitiv cu microscopul cu forță atomică (AFM) sau cu microscopul electronic de scanare, rezultatele reconstrucției fazei optice din holograme digitale trebuie să fie viabile iar timpul de lucru cu acest dispozitiv trebuie redus. Avansarea microscopului ca instrument este esențială în scopul efectuării unor investigații eficiente în diferite domenii precum fotonica, știința materialelor, biomedicină etc. Prin urmare, această lucrare descrie sistemul optic al MHD, inclusiv componente hardware și software, care au fost dezvoltate pentru investigarea eficientă a EOD pe scară nanometrică.

EOD multifuncționale sunt atractive pentru o gamă largă de aplicații, inclusiv corectarea aberațiilor, microscopie sensibilă, realitate augmentată, sisteme de imagistică, energie solară și multe altele. Acest fapt se datorează capacității de a crea și de a caracteriza cantitativ EOD.

Rezultate științifice principale înaintate spre apărare:

1. Înregistrarea HLP analogică și digitală sunt metode directe ce permit crearea EOD multifuncționale pe suprafața NMS de SC și a straturilor subțiri de AP parcurgând doar o singură etapă.

2. Eroarea reconstrucției fazei din holograme digitale în afara axei poate fi minimizată prin integrarea unei rețele de difracție sinusoidale în sistemul optic al MHD în configurația „off-axis”.

În configurația „phase-shifting” al MHD eroarea reconstrucției fazei poate fi redusă prin aplicarea unei rețele de difracție cu blaze în sistemul optic.

3. Calibrare detaliată a fazei și a polarizării undei electromagnetice transmise de dispozitivele cu cristale lichide este o procedură importantă și obligatorie, în scopul integrării acestora în sisteme optice holografice digitale. Calibrare trebuie efectuată pentru fiecare configurație în parte.

4. Configurațiile MHD „off-axis” și „phase-shifting” dezvoltate sunt aplicabile pentru investigarea eficientă a mapei indicelui de refracție și a topografiei reliefului EOD multifuncționale înregistrate pe NMS-uri de SC și straturi subțiri de AP.

Noutatea și originalitatea științifică

Lucrarea include mai multe abordări care contribuie la avansarea tehnicilor holografiei digitale. În primul rând, versiunea îmbunătățită a configurației software și hardware a MHD a fost utilizată în premieră pentru investigarea EOD pe NMS de SC și straturi subțiri de AP. În al doilea rând, înregistrării HLP analogă și digitală sunt metode noi care au permis formarea fotoindusă a diferitelor EOD multifuncționale pe NMS de SC și straturi subțiri de AP.

Problema științifică soluționată constă în elaborarea și optimizarea tehnicilor holografiei digitale atât pentru înregistrarea HLP a EOD pe NMS de SC și straturi subțiri de AP cât și pentru , cât și pentru investigarea la scară nanometrică a parametrilor optici și fizici a acestora folosind MHD de performant.

Aprobarea rezultatelor științifice

Rezultatele științifice de bază ale tezei au fost prezentate și discutate la 11 conferințe naționale, inclusiv conferințe internaționale care au avut loc în Republica Moldova (5), România (1), Rusia (1), Elveția (1), Finlanda (1), Ucraina (1) și Statele Unite ale Americii (1).

În total, au fost elaborate și publicate 9 articole ca autor principal și 6 articole (inclusiv rezumate, publicate în lucrările conferinței) ca coautor, dintre care: 2 articole cu un singur autor; Au fost publicate 4 articole în reviste științifice de specialitate din străinătate. Toate cele 4 articole din reviste științifice sunt indexate în Scopus. Rezultatele științifice descrise în această teză au fost obținute și implementate în 5 proiecte, inclusiv un proiect internațional finanțat de UE.

CONȚINUTUL TEZEI

Teza este scrisă în limba engleză și constă din introducere, 5 capitole, concluzii generale și recomandări, și bibliografia din 214 titluri. Teza conține 128 pagini de text de bază, 74 figuri și 61 formule. Rezultatele prezentate în teză sunt publicate în 17 lucrări științifice și prezentate la 16 conferințe.

Capitolul 1 prezintă analiza literaturii privind situația curentă a cunoștințelor și cercetărilor asupra tehnologiei MHD. Sunt descrise principalele provocări întâlnite în timpul înregistrării și procesării numerice a hologramelor digitale. Sunt evidențiate avantajele și limitările importante ale MHD în configurațiile „off-axis” și „phase-shifting”. Totodată sunt descrise metodele disponibile pentru îmbunătățirea rezoluției și performanței MHD. Un alt compartiment descris în acest capitol constă în studiul literaturii în domeniul materialelor ce posedă proprietăți fotosensibile. În particular, sunt descrise NMS de SC și a straturilor subțiri de AP ca medii potrivite pentru înregistrarea eficientă a EOD. Primul capitol se încheie cu descrierea originalității și a contribuției tezei de doctorat în știință.

Capitolul 2 abordează cadrul teoretic pentru îmbunătățirea tehnologiei MHD prin simulări numerice a procesului experimental inclusiv și a procesării hologramelor digitale. Sunt descrise metodele de reconstrucție a fazelor bazată pe TRF și SPAR care sunt aplicate pentru prelucrarea hologramelor digitale „off-axis”. În același timp, pentru hologramele „phase-shifting” a fost dezvoltat și adaptat un algoritm bazat pe abordarea Yamaguchi, prezentat mai detaliat în articolul [11-13]. În vederea îmbunătățirii performanței MHD sunt investigate diferite măști de fază atât în configurația „off-axis” cât și în configurația „phase-shifting”. Măștile de fază au fost introduse în configurația MHD în scopul modulării frontului de undă al fascicolului laser ce trece prin obiectul studiat. Rezultatele experimentelor cu și fără aplicarea măștii de fază au fost evaluate prin calcularea eroarii medie pătratică relativă pentru ambele cazuri.

Rezultatele simulărilor numerice demonstrează că îmbunătățirea imagisticii de fază poate fi obținută prin adoptarea unei modulări sinusoidale a fascicolului ce trece prin obiectul de studiu. Modularea undei este obținută prin aplicarea unei măști de fază sau a unei rețele de difracție în configurația „off-axis” a MHD ce nu are lentile.

Au fost identificați următorii parametri optimi ai măștii de fază: perioada $\Lambda=44\text{ }\mu\text{m}$, valoarea fazei modulate a fost $\varphi=0.1\pi$ și trepte de rotație a rețelei la 0, 90, 180 de grade. Datorită parametrilor optimizați ai rețelei de difracție (perioada, fază și numărul de trepte de rotație) și a multiplelor ordine difractate mai multe informații despre frecvențele spațiale înalte ale spectrului obiectului sunt înregistrate de senzorul camerei video de tip *charge coupled device* (CCD).

Experimentele simulate numeric arată că atunci când este aplicată rețeaua de difracție sinusoidală valorile RMSE scad cu aproximativ 20%.

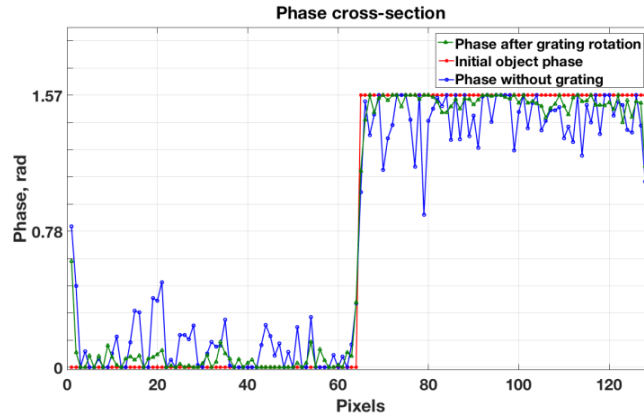


Fig. 1. Rezultatele simulării numerice ale experimentului cu un obiect fazic în formă de gaussiană. După rotirea măștii de fază, valoarea $RMSE_{\text{phase}}=0.0243$, în experimental fără aplicarea măștii de fază $RMSE_{\text{phase}}=0.0292$.

Rezultatele simulărilor numerice ale configurației „phase-shifting” a MHD demonstrează că prin introducerea unei rețele de difracție cu blaze. Precizia acestui experiment este evaluată cu ajutorul calculului erorii medii pătratice relative (RRMSE). În configurația dată, precizia reconstrucției de fază crește cu aproximativ 72%. Acest rezultat este obținut în cazul în care este aplicată rețeaua de difracție cu blaze cu următorii parametri optimi: perioadă egală cu 35 și 80 pixeli/franță și sub un unghi $\alpha=90^\circ$ față de axa optică a MHD. Rezultatele sunt demonstrate pentru două probe fazice și anume un fascicul descris de funcția Gauss și o treaptă fazică.

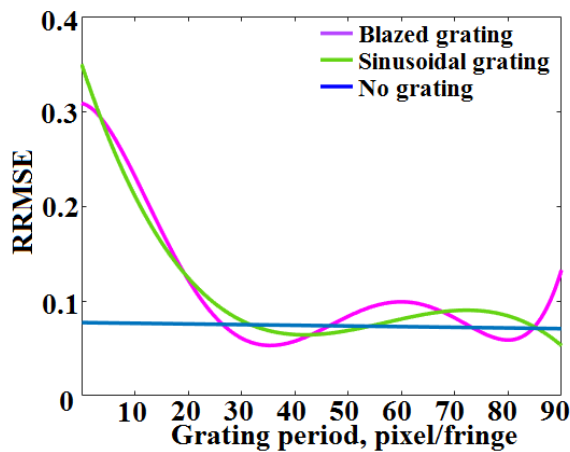


Fig. 2. Dependența RRMSE de perioada rețelei de difracție sinusoidale și a rețelei cu blaze.

Rezultatele obținute au fost comparate cu experimentul în care nu este aplicată masca de fază. S-a luat în considerare zgomotul gaussian care de obicei este prezent în condiții de laborator. Totodata este important de menționat faptul că unii factori care afectează procesul de înregistrare

a hologramelor nu au fost luați în considerare în simularea numerică. Factorii care nu pot fi controlați includ: stabilitatea coerenței spațiale a laserului, zgomotul camerei video, rigiditatea meselor de lucru și împrăștierea luminii de către microparticulele ce sunt prezente în aer.

În **capitolul 3** este descrisă implementarea dispozitivelor cu cristale lichide în holografia digitală. Primul compartiment reflectă calibrarea fazei unei electromagnetice transmise de MSL. Pentru reconstrucția fazei din holograme digitale au fost utilizați doi algoritmi diferiți, o metodă bazată pe TFR și a doua metodă bazată pe SPAR. În plus, a fost efectuată calibrarea polarizării MSL pentru a înțelege modul în care dispozitivul modifică polarizarea fasciculului transmis. Al doilea compartiment a acestui capitol descrie procedura de calibrarea a retarderului variabil cu cristale lichide (RVCL).

Algoritmul SPAR a fost utilizat pentru calibrarea mai detaliată a fazei MSL. A fost determinată modularea fazei în fiecare pixel inclusiv regiunea activă și regiunea dintre pixeli precum și modularea întregii matrici a MSL. Din rezultatele obținute se poate observa că în regiunea de modulație maximă a fazei, deviația standard a părții active a matricii MSL este cu 0,5 radiani mai mică în comparație cu faza întregii matrice SLM, așa cum este ilustrat în Fig. 3. Acest efect ar putea fi rezultatul prezenței „regiunii moarte” ale matricii MSL, regiune unde faza și polarizarea fasciculului laser incidente nu poate fi controlată.

Deși dependențele prezentate în Fig. 3 arată tendințe similare, diferențe specifice pot fi observate atunci când se compară curba de calibrare oferită de producător Fig. 3(c) cu curbele rezultante din algoritmul SPAR. În primul rând, răspunsul de modulare a fazei crește la rate mai mici ale valorilor scării de gri aplicate atunci când este utilizată schema optică de calibrare și algoritmul descrisă în acest capitol, după cum este ilustrat în Fig. 3(a), (b). În special, la valoarea 125 a nivelului de gri, modularea de fază a zonei de active a matricii MSL este π iar valoarea fazei modulate de către întreaga matrice a MSL este 0.9π , atunci când trece o undă electromagnetică cu $\lambda=532$ nm. De asemenea, modulația maximă a fazei regiunii active a matricii MSL este de 1.7π și iar a întregii matrici este valoarea maximă este 1.6π .

Al treilea compartiment al acestui capitol descrie procedeul de calibrarea cu schimbului de fază efecruat de către RVCL luând în considerare polarizarea fasciculului incident cu o lungime de undă de 532nm. Calibrarea LCVR este o procedură obligatorie, deoarece datele detaliate despre acest dispozitiv (pentru această lungime de undă) nu sunt oferite de către producător. Schimbarea de fază produsă de RVCL a fost realizată prin ajustare preliminară a axei cristalului lichid față de planul de polarizare al fasciculului incident. Pentru a produce schimbări

de fază, prin intermediul sistemului optic a MHD care conțin un RVCL, a fost construită o dependență liniară a defazajului de tensiunea aplicată în intervalul 2-3.2V.

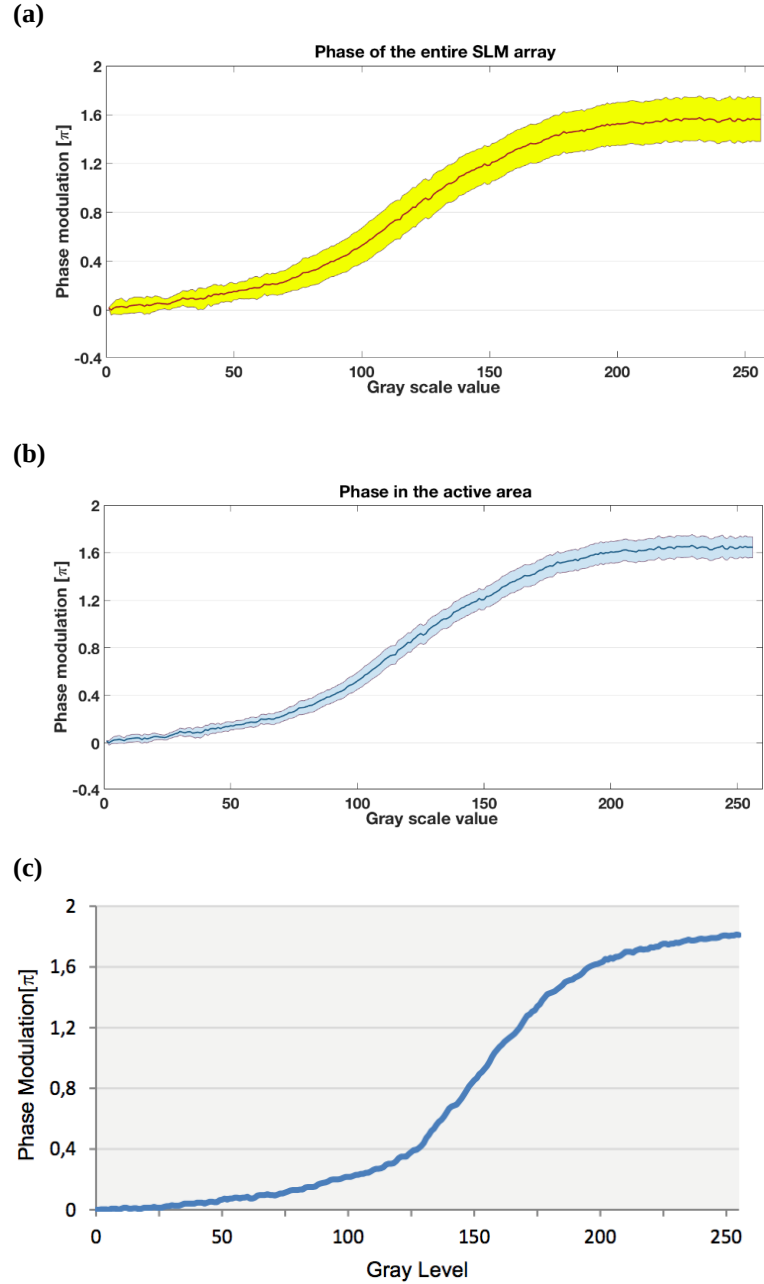


Fig. 3. Curba de calibrare obținută cu ajutorul algoritmului SPAR care reprezintă relația dintre modularea fazei unei electromagnetice transmise de MSL (curba albastră și roșie) și nivelul culorii gri aplicată pe matricea MSL (zona galbenă și albastră din jurul curbelor principale din grafice reprezintă deviația standard a fazei) (a) faza întregii matrici MSL pentru $\lambda=532$ nm; (a) faza zonei active a pixelului MSL pentru $\lambda=532$ nm; (c) curba de calibrare oferită de către producător pentru $\lambda=543$ nm.

Configurația optică a MHD descrisă în capitolul cinci al acestei teze necesită schimbări de fază specifice egale cu $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = \pi/2$, $\varphi_3 = \pi$, $\varphi_4 = 3\pi/2$. Rezultatele calibrării sunt prezentate în Fig. 4. Inițială a fost aplicată tensiunea egală cu 2.02 V unde defazajul este considerat nul. Conform formulei $\Delta\varphi_n = a + bV_n$, unde $a=-8.58$ și $b=4.25$ sunt constante, V_n este tensiunea aplicată, iar $n=1,2,3,4$. Diferența de fază dintre fiecare schim este egală cu $\pi/2$. În urma calculelor, s-a determinat că pentru a obține cele patru schimbări de fază menționate mai sus trebuie aplicate tensiunile $V_1 = 2.02$ V, $V_2 = 2.39$ V, $V_3 = 2.76$ V, $V_4 = 3.14$ V, corespunzător.

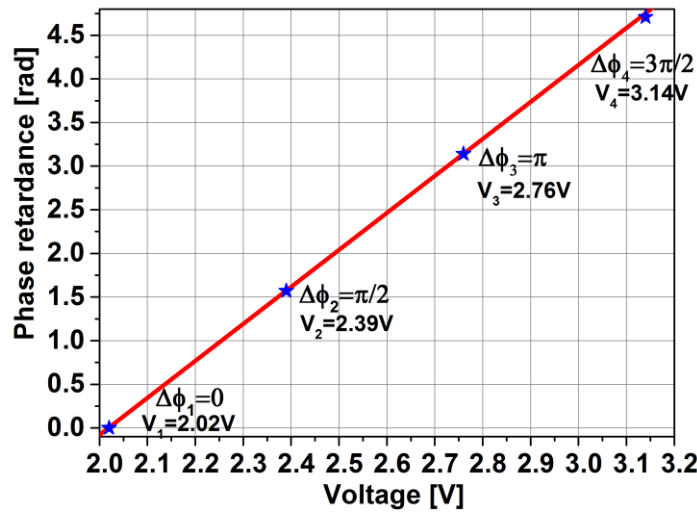


Fig. 4. Dependența liniară a defazajului produs de RVCL de tensiunea aplicată în intervalul 2-3.2V.

Rezultatele calibrării arată că pot exista erori considerabile atunci când faza și polarizarea luminii este modulată de dispozitive cu cristale lichid. Pentru aplicarea eficientă a acestor dispozitive în diverse configurații optice este importantă caracterizarea lor detaliată. Configurațiile interferometrice prezentate în acest capitol sunt compatibile pentru calibrarea in situ și pot fi adaptate la diferite sisteme optice. În plus, procedurile software incluse în algoritmul de calibrare SPAR compensează efectele zgomotului prezente în diverse condiții nefavorabile de laborator care influențează semnificativ stabilitatea interferometrului. Procedurile descrise pentru calibrarea detaliată a fazei în diferite regiuni a matricii MSL au o contribuție valoroasă în implementarea acestor dispozitive în MHD.

Capitolul 4 este dedicat înregistrării diferitor EOD pe nanomultistraturi de SC și straturi subțiri de AP. În primul compartiment, este descrisă tehnica de fabricare a NMS de SC și a straturilor subțiri de AP ce sunt fotosensibile. NMS de SC au fost preparate prin procedura ciclică și controlată de computer, a depunerii termice în vid a As_2S_3 și Se. Straturile subțiri de AP

au fost sintetizate prin polimerizarea poli-n-epoxipropilcarbazolului (PEPC) cu azocolorantul Solvent Yellow 3 (SY3). Pentru a înțelege profund fotosensibilitatea acestor materiale au fost efectuată înregistrarea HLP analogică și digitală. A fost monitorizată și analizată cinetica eficienței de difracție (DE) a EOD obținute prin diferite metode de înregistrare.

Înregistrarea HLP analogică cu polarizarea S:S, P:P, $\pm 45^\circ$ și polarizare circulară de dreapta(RCP) și creează polarizare circular de stânga(LCP), RCP:LCP a fasciculelor interferente au fost implementate pe NMS de SC. În rezultat au fost obținute o serie de EOD cu modularea reliefului de suprafață și precum și a indicelui de refracție. Schema optică de înregistrare a fost amplasat pe o masă izolată de vibrații pentru a proteja de perturbații externe. Pentru a investiga procesul de creare a rețelelor foto-induse, este măsurată eficiența de difracție în funcție de timpul de expunere folosind o diodă laser și două fotodiode. Astfel sunt măsurate intensitățile în ordinul de difracție zero I_0 și unu I_1 . Cea mai mare eficiență de difracție aparține EOD înregistrate cu polarizarea $\pm 45^\circ$ fasciculelor interferente. Pentru As_2S_3 -Se NML eficiența de difracție atinge 31% iar pentru As_2S_3 NML eficiența de difracție ajunge la 13.5%. În Fig. 5(a) este prezentată schema optică experimentală utilizată pentru a înregistra EOD sinusoidale pe NMS de As_2S_3 și As_2S_3 -Se.

Înregistrarea HLP digitală cu două unde pe NMS de As_2S_3 -Se produce un element optic de difracție complex cu formă sinusoidală care generează maxime de difracție în două dimensiuni, atât pe axa X cât și pe axa Y. Pentru realizarea înregistrării HLP a EOD de tip vortex a fost integrat MSL în schema optică. Esența implementării MSL pentru înregistrarea HLP constă în utilizarea hologramei generată de computer care implică calculul numeric al fazei undei electromagnetice ce iluminează materialul fotosensibil. Matrice MSL de fază funcționează ca o rețea de difracție sofisticată care transformă faza fasciculului de lumină transmis într-o formă specifică. Modulatorul de fază, spre deosebire de un MSL de amplitudinea, acționează mai eficient, deoarece redirecționează în totalitate lumina incidentă pentru obținerea imaginii rezultante. Diapazonul fazei modulate de MSL (LC2002 HOLOEYE) ce a fost utilizat în acest experiment depinde de lungimea de undă a luminii incidente și este mai mic de 2π pentru $\lambda=532$ nm.

Se poate presupune că EOD înregistrat constă din două rețele de difracție ortogonale în direcțiile X și Y ale planului probei. Perioada de rețelei pe axa X care rezultă din primul mod a sistemului de înregistrare depinde de perioada franjelor de interferență afișate pe MSL. Perioada rețelei pe axa Y care rezultă din cel de-al doilea mod de înregistrare și este determinată de interferența produsă de fasciculele de referință și undele obiect ale configurației optice. Valoarea

eficienței de difracție obținută este de aproximativ 0.4%, și este o valoare relativă, deoarece este estimată dintr-un singur maxim de difracție. Eficiența reală absolută este mai mare dacă luăm în considerare toate maximele de difracție.

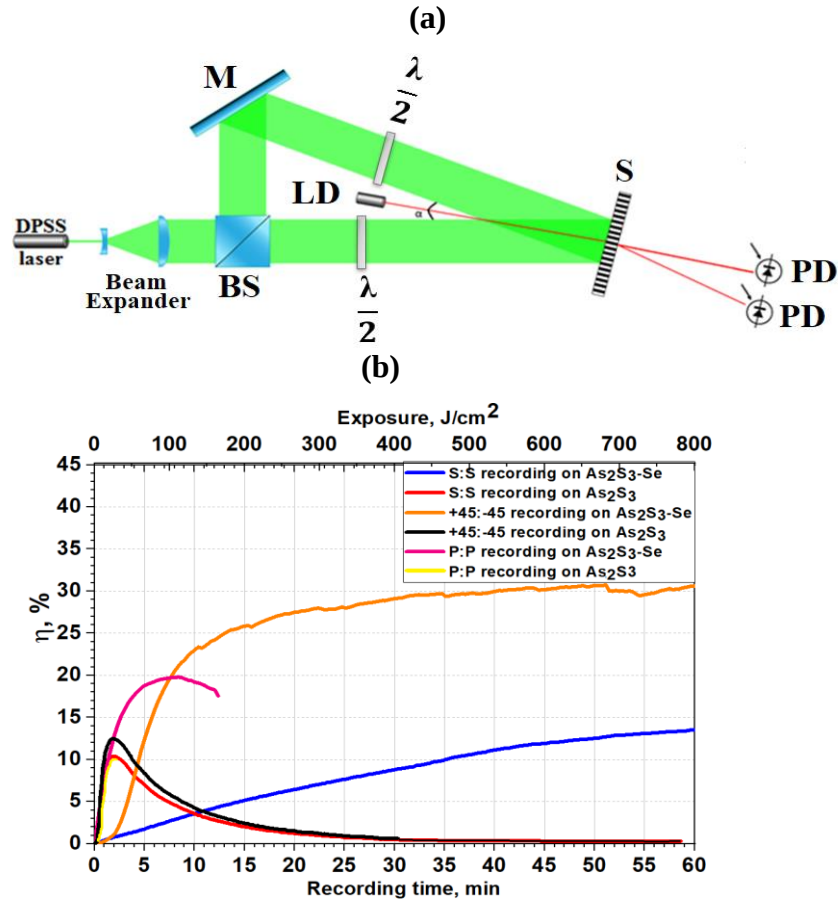


Fig. 5. (a) Schema optică a înregistrării HLP analogice pe NMS de SC: laser DPSS ($\lambda=532\text{nm}$, 100 mW), Beam expander-expansor de fascicul, BS-separator de fascicul 50/50, PD-fotodiodă, M-oglină, LD-diodă laser ($\lambda=650\text{ nm}$, 1 mW), S-proma sample of As_2S_3 film or $\text{As}_2\text{S}_3\text{-Se}$ NML, α -angle between incident beams, $\lambda/2$ - placă pentru jumătate de undă; (b) Cinetica eficienței de difracție a primului ordin a imaginii de difracție a EOD înregistrate cu diferite polarizări ale fasciculelor.

EOD de tip vortex pe straturi subțiri de AP pe bază de carbazol este efectuată cu ajutorul înregistrarea HLP analogice și digitale. EOD de tip vortex sunt capabile să genereze singularități de fază distribuite spațial în 2D și 3D. În schema optică a înregistrării HLP analogice frontul de undă în formă de spirală este generat de retarder de fază vortex (RFV). Această schema sa permis obținerea EOD de tip vortex cu o eficiență de difracție mai ridicată, cu toate acestea, variabilitatea distribuției spațiale a maximelor de difracție este limitată la 2D. În schimb, abordarea digitală pentru modularea frontului de undă în formă de spirală prin intermediul MSL

ce este introdus în schema optică a înregistrării HLP reprezintă o modalitate mai flexibilă care permite înregistrarea EOD care generează distribuția spațială 2D și 3D a maximelor de difracție.

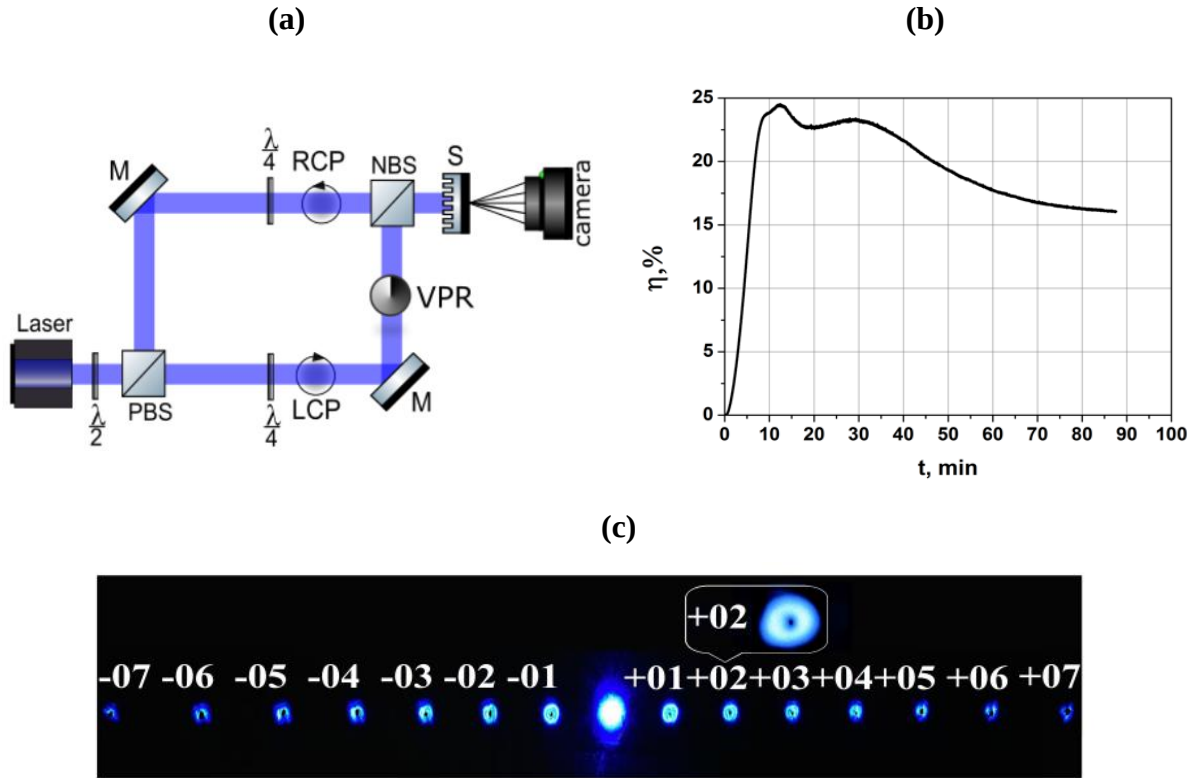


Fig.6. (a) Schema interferometrică analitică pentru înregistrarea EOD cu ajutorul RFV pe straturi subțiri de AP. Componentele schemei optice: laser CW DPSS ($\lambda=473$ nm, power =100 mW), M – oglindă, PBS – separator de fascicul polarizat, NBS- separator de fascicul nepolarizat, VPR-retarder de fază vortex, S – probă; $\lambda/4$ - placă pentru un sfert de undă, $\lambda/2$ - placă pentru jumătate de undă, camera video- 12MPxs; (b) Cinetica eficienței de difracție a primului ordin a imaginii de difracție a EOD de tip vortex înregistrat prin metoda analogică; (c) imaginea de difracție obținută a singularităților de fază.

Schema configurației pentru înregistrarea HLP analogică bazată pe un RFV este ilustrată în Fig. 6 (a). Starea de polarizare a fascicului laser este înclinată la 45° de o placă cu jumătate de undă. Două plăci cu un sfert de undă cu axe optice sunt înclinate sub unghiuri reciproce la 90° ($+45^\circ$ and -45° față de axa verticală) creează polarizare circulară de dreapta și de stânga. EOD este produs prin interferența dintre un front de undă în formă de spirală format după ce fasciculul laser trece prin RFV și un front de undă plan al fascicului de referință. RFV generează un moment unghiular orbital cu sarcina topologică egală cu 1. Ambele fascicule interferente trec prin plăci cu sfert de undă pentru a obține un EOD polarizat. Unghiul dintre fasciculele interferente este de aproximativ $\theta \approx 3.6^\circ$. Acest unghi determină perioada rețelei pe axa

X de aproximativ $7.5\mu\text{m}$. Se poate sublinia faptul că EOD-urile care sunt utilizate pentru a crea un vortex optic sunt fabricate într-un procedură de înregistrare într-o singură etapă. Cinetica eficienței de difracție rezultată ce este proiectat pe cameră este ilustrat în Fig.4.13 (b). Singularitățile de fază aliniate coliniar pot fi observate pe imaginea de difracție, prezentată în Fig. 6 (c).

Înregistrarea HLP a EOD de tip vortex pe straturi subțiri de azopolimer a fost realizat folosind scheme optice cu un singur fascicul și cu două fascicule. O rețea de difracție în formă de furcă este afișată pe matricea MSL în loc de o mască de fază vortex. Aceasta este o altă metodă de generare a fasciculelor în formă de spirală cu o distribuție de fază singulară dorită și sarcini topologice $TC=1$ și $TC=2$.

Elementul optic de difracție de tip vortex multifuncțional a fost imprimat simultan prin intermediul a două moduri diferite de înregistrare, care funcționează în regim paralel. Primul mod de înregistrare funcționează ca înregistrare HLP cu un singur fascicul descris anterior, cu MSL situat în brațul obiect al configurației optice, așa cum este ilustrat în Fig. 7 (a). Al doilea mod de înregistrare funcționează ca o configurație de înregistrare interferometrică Mach-Zehnder datorită adăugării fasciculului de referință la schema optică. Configurația înregistrării HLP cu două fascicule este prezentată în Fig. 7 (a). EOD de tip vortexul se formează atunci când fasciculul obiect care trece prin MSL și posedă polarizare -45^0 și fasciculul de referință plan descries de funcția Gauss care posedă polarizare $+45^0$ (față de planul fasciculelor interferente) interferează. În acest fel, unghiul dintre stările de polarizare ale fasciculelor interferente este de 90^0 . Ca urmare, doar faza undelor interferente a fost înregistrată pe stratul subțire de AP, iar amplitudinea nu a fost înregistrată.

Așa cum sa arătat în investigațiile anterioare [14] privind înregistrarea HLP digitală pe straturi subțiri de AP, stările de polarizare încrucișată ale fasciculelor de lumină controlate de plăci cu jumătate de lungime de undă facilitează modularea maximă a reliefului de suprafață. Placa cu jumătate de lungime de undă care este plasată imediat după laser controlează direcția de polarizare a fasciculului incident în raport cu separatorul de fascicul. Separatorul de fascicul polarizat oferă un raport de intensitate de 30:70 cu o dependență minimă de starea de polarizare a luminii incidente. Pentru acoperirea întregii matrici MSL, fasciculele incidente au fost extinse. Pentru ca holograma transmisă prin MSL să corespundă cu punctul de înregistrare de pe film, s-au folosit două lentile cu distanțe focale diferite. Singularitățile de fază multiplexate spațial obținute de la EOD înregistrate prin HLP cu două fascicule sunt prezentate în Fig. 7 (c).

Avantajul specific al rezultatelor prezentate este aplicarea înregistrării HLP digitale pe un

AP nou care sa dovedit a fi sensibil la polarizare și care permite obținerea EOD cu un relief de suprafață adânc de aproximativ 40% față de grosimea totală a stratului subțire.

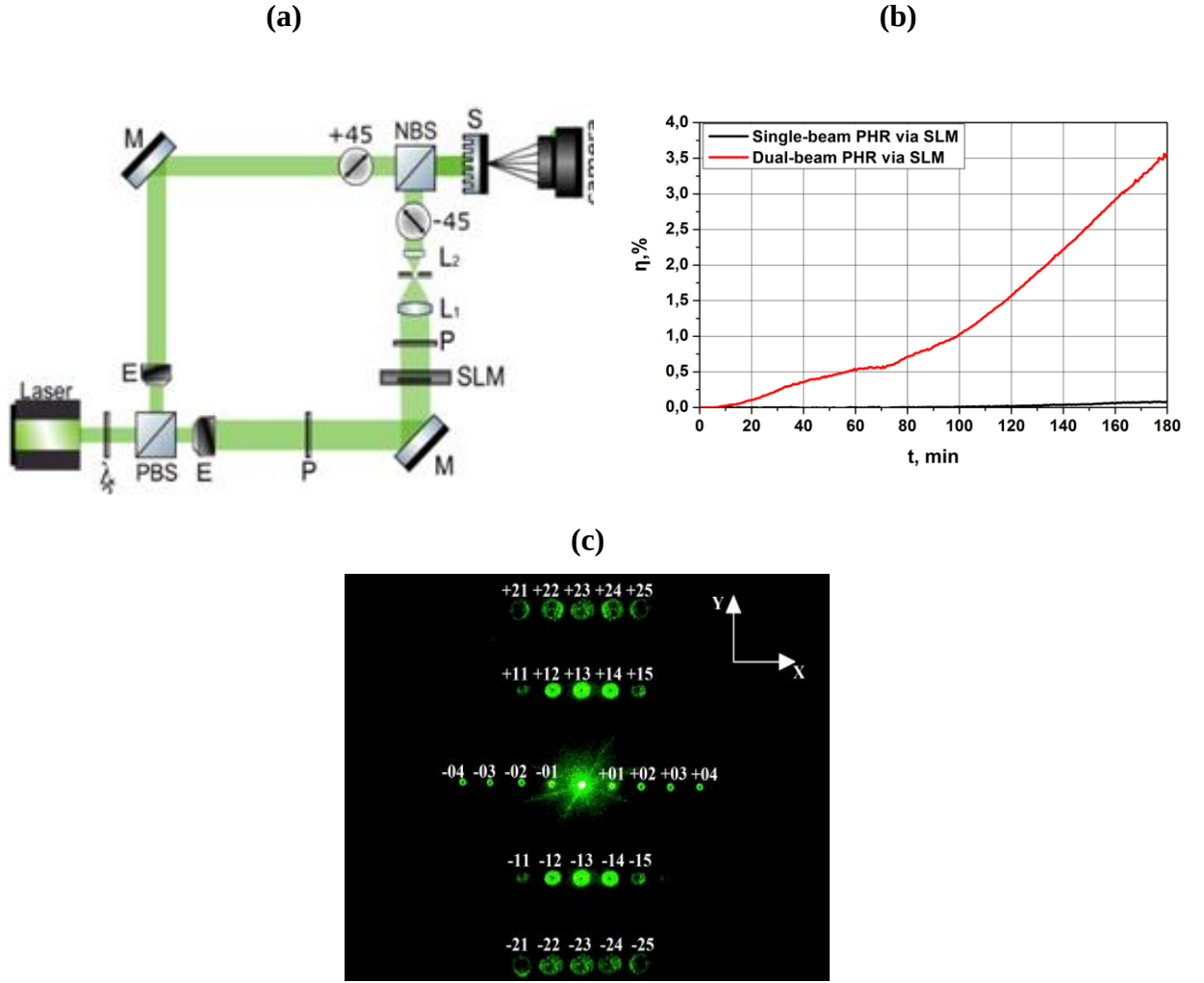


Fig. 7. (a) Schema optică a înregistrării HLP digitală cu două fascicule pentru crearea EOD de tip vortex pe straturi subțiri de AP. CW DPSS laser ($\lambda=532$ nm, power = 2W, TEM00 mode), M – oglindă, PBS – separator de fascicul polarizat, NBS- separator de fascicul nepolarizat, E- expander de fascicul, SLM-modulator spațial de lumină LC-2002 cu rezoluția de 800×600 pixeli și dimensiunea pixelului de $32 \mu\text{m}$, S – probă; $\lambda/2$ - half wave plate, P-polarizator, L1, L2-lentilă, (b) Cinetica eficienței de difracție obținută din primul ordin de difracție +01 a EOD de tip vortex create prin înregistrarea HLP digitală folosind un MSL; (c) Imaginea de difracție a singularităților de fază obținute prin înregistrarea HLP digital cu două fascicule.

Înregistrarea HLP analogică și digitală implementate în diferite configurații optice s-au dovedit fi o metode aplicabile folosind doar un singur pas pentru crearea EOD de tip vortex care ceste capabil să genereze singularități de fază. Deși se pare că ambele abordări permit fabricarea

EOD care produc câmpuri a undelor electromagnetice similare, trebuie luată în considerare variația parametrilor fasciculelor vortex. Cea mai mare eficiență de difracție de 24% este obținută pentru EOD create prin înregistrarea HLP cu ajutorul RFV analog, în timp ce elemental optic de difracție obținut prin configurația interferometrică digitală cu un singur fascicul cu un MSL produce singularități de fază cu o eficiență scăzută de difracție de doar 0,1%. Trebuie luat în considerare faptul că în primul caz numărul maximelor de difracție observate este de 12, în timp ce în al doilea caz sunt 28 de maxime.

Capitolul 5 prezintă configurațiile experimentale a MHD ce au fost dezvoltate pentru investigarea EOD obținute pe NMS de SC și straturi subțiri de AP. În primul compartiment al capitolului este descrisă configurația „off-axis” a MHD utilizată pentru imagistica tridimensională și caracterizarea parametrilor reliefului suprafeței și a indicelui de refracție a EOD formate pe NMS de SC. Al doilea compartiment a acestui capitol descrie configurația „phase-shifting” a MHD implementată pentru studiul EOD create pe straturi subțiri de AP.

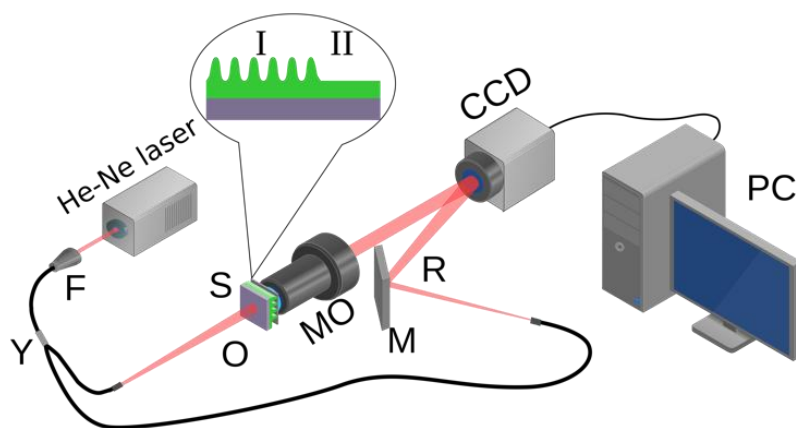


Fig. 8. Schema optică a MHD în configurația „off-axis”: laser cu He-Ne ($\lambda = 632.8 \mu m$, $power = 10mW$) F- dispozitiv pentru captarea și transmiterea luminii în fibra optică ce funcționează monomod; Y-2x2 cuplator de fibre optice monomod, O- fascicolul obiect, R- fascicolul de referință, S-proba studiată, în acest experiment este studiat elemental optic de difracție create pe NMS de SC; MO- obiectivul microscopului, M- oglindă and camera video CCD, PC-computer.

Investigarea EOD de NMS de SC cu ajutorul MHD în configurația „off-axis” în regim de transmisie. Schema optică a MHD este prezentată în Fig. 8. Proba este acoperită de o lamă de sticlă și lichid de imersie cu indicele de refracție, $n=1.51$. În figura 8 regiunile I, II denotă cele două regiuni pe probă în care au fost înregistrate holograme, I- regiunea obiect sau regiunea

elementului optic de difracție și II-regiunea în afara elementului optic de difracție, adică porțiunea NMS de SC care nu a fost prelucrată cu ajutorul înregistrării HLP. Pentru procesarea hologramelor digitale a fost utilizat algoritmul iterativ SPAR. Algoritmul pentru reconstrucția fazei frontului de undă a fost dezvoltat în software-ul MATLAB. O descriere mai detaliată a algoritmului SPAR este prezentată în Capitolul 2 a tezei. Au fost făcute mai multe ajustări în cod în funcție de caracteristicile experimentului și natura/proprietăților EOD investigate.

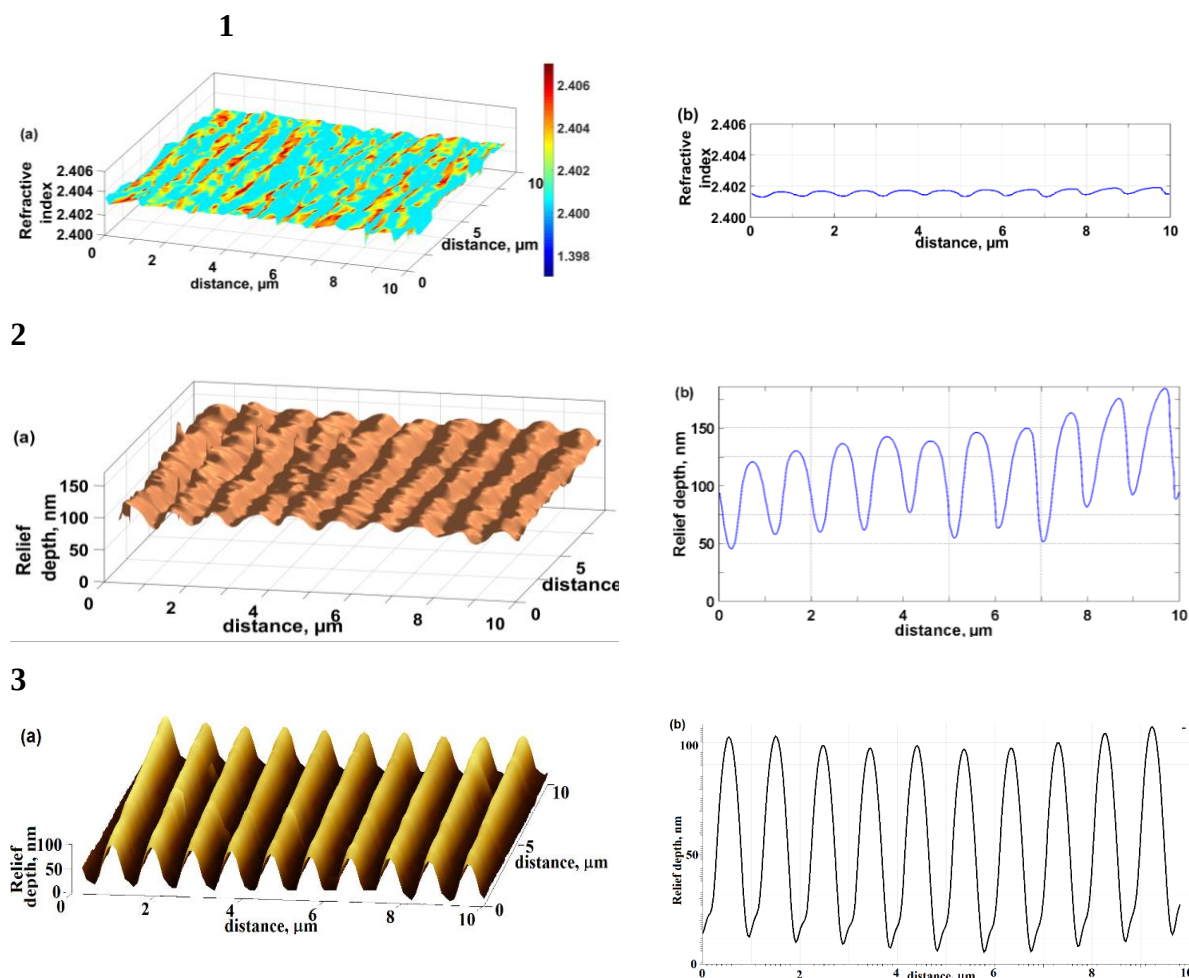


Fig. 9. 1(a) Harta indicelui de refracție obținută cu ajutor MHD în configurația „off-axis” obtained via off-axis; 1(b) Secțiunea transversal medie a mapei indicelui de refracție a EOD înregistrate pe NMS de SC; 2(b) Secțiunea transversal medie a topografiei EOD înregistrate pe $\text{As}_2\text{S}_3\text{-Se}$ calculată numeric din holograme digitale cu ajutorul algoritmului SPAR; 3(a) 3(b) Harta topografică și secțiunea transversală a EOD înregistrat pe NMS de SC măsurată cu microscopul cu forță atomică(MFA).

În primul rând, a fost încorporat în algoritm un front de undă sferic a fascicolului de referință, în comparație cu frontul de undă plan care este utilizat în articolul [10]. În al doilea rând, dimensiunile ferestrei de operare x_m sunt de 20/20 de pixeli, iar deviația Gaussiană

standard este 5. Aceste variabile au fost testate și pot oferi rezultate mai bune ale reconstrucției fazei.

Harta topografică a EOD a fost determinată în urma reconstrucției fazei $\Delta\varphi(x, y)$ frontului de undă utilizând următoarea ecuație

$$\Delta\varphi(x, y) = \varphi_{01}(x, y) - \varphi_{02}(x, y). \quad (1)$$

unde φ_{01} este faza reconstruită din holograma EOD și φ_{02} este faza reconstruită din holograma de referință a NMS de SC ce nu a fost prelucrată prin înregistrarea HLP.

Un avantaj al MHD cu algoritmul SPAR este capacitatea de a construi harta indicelui de refracție și studierea variațiilor mici indicelui de refracție, în timp ce elipsometria este o tehnică de scanare relativ lentă, efectuată în mod reflectiv și implică un proces greoi.

Figura 9, 1(a) reprezintă harta tridimensională a indicelui de refracție al EOD cu o eficiență de difracție de 13,4% creat pe NMS de $\text{As}_2\text{S}_3\text{-Se}$ și Fig. 9.1(b) reprezintă secțiunea transversală medie a hărții indicelui de refracție. Harta topografiei și secțiunea transversală a EOD obținută cu ajutorul MHD cu algoritmul SPAR sunt prezentate în Fig. 9.2(a), (b) au fost comparate cu măsurările efectuate cu MFA prezentate în Fig. 9.3(a) și Fig. 9.3(b). Valorile medii ale adâncimii reliefului din secțiunea transversală EOD obținute cu ajutorul MHD (Fig. 9.2(b)) în general coincid cu valorile medii ale adâncimii reliefului EOD măsurate de MFA (Fig. 9.3(b)). Diferențele sunt mai vizibile când sunt analizate hărțile topografice. Harta tridimensională mai zgomotoasă ce rezultă din măsurările MHD poate fi rezultatul zgomotului de timp impuls (în *engl.* speckle) și a abordări de prezentare spațială a datelor oferite de aceste metode. Diferența este cauzată de metoda de analiză, precizia MFA depinde de raza vârfului acului care scanează proba, în timp ce MHD este o metodă pur optică fără contact cu obiectul de studiu.

În urma analizei figurei 9 se poate concluziona faptul că MHD împreună cu algoritmul de reconstrucție SPAR poate fi utilizat cu succes ca alternativă pentru investigarea EOD. Rezultatele obținute arată doar mici diferențe comparativ cu măsurările efectuate de MFA.

Sistemul optic al MHD în configurația „phase-shifting” a fost modernizat prin integrarea RVCL în unda de referință. Microscopul a fost aplicat pentru investigarea EOD sinusoidale obținute folosind diferite doze de expunere și a EOD de tip vortex obținute prin înregistrarea HLP analogică și digitală pe straturi subțiri de AP. Avantajul microscopului dezvoltat este că RVCL execută cu mare precizie schimbul de fază prin aplicarea unei tensiuni de antrenare. Controlul automatizat al RVCL a fost adoptat în software-ul LabVIEW care efectuează simultan schimbul de fază și înregistrarea hologramelor digitale în decurs de 30 de milisecunde. Astfel,

achiziția rapidă a hologramelor minimizează zgomotul de fundal și variația temperaturii care influențează de obicei calitatea imaginii.

Microscopul holografic digital în configurația „phase-shifting” ce a fost asamblat în laborator este prezentat în Fig. 10. În sistemul optic, fasciculul laser monomod este împărțit de un separator de fascicule nepolarizat în unda de referință-Rw și unda ce trece prin obiectul de studio, în cazul nostrum EOD-Ow. Fasciculul laser este colimat de obiectivul microscopului și de lentila L_2 . Unda obiect colimată trece printr-o placă de jumătate de undă pentru a regla stările de polarizare ale undei obiect față de unda de referință.

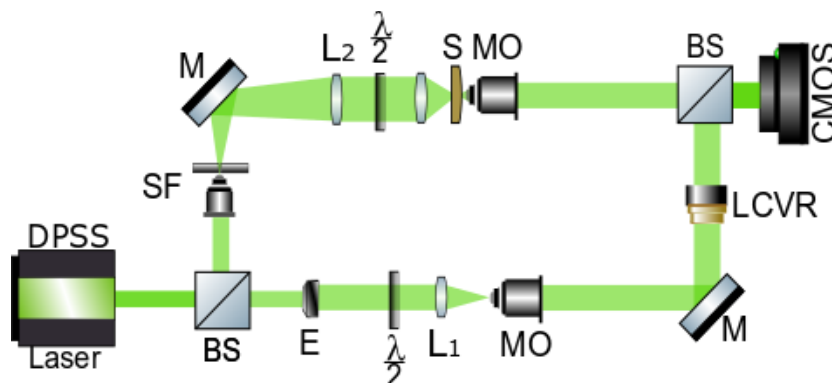


Fig. 10. Schema optică a MHD în configurația „phase-shifting”: Laser CW DPSS ($\lambda=532\text{nm}$, 100 mW, TEM00), BS-separator de fascicul nepolarizat, $\lambda/2$ - placa de jumătate de undă, M-oglină, MO-obiectivul microscopului (20x, NA=0.40), S-probă, L1, L2-lentilă, CMOS- cameră video “DMK33UX264”, cu rezoluția $2,448 \times 2,048$ (5 MPxs), LCVR-retarder variabil cu cristale lichide “Meadowlark optics” LCVR-100, SF-filtru spațial, E- expansor de fascicul.

A doua lentilă concentrează lumina asupra EOD investigat. Faza fasciculului de referință este schimbată secvențial de către RVCL. Cristalele lichide nematice care produc retardarea fazei prezintă proprietăți optice de birefrință. Prin urmare, plăcile cu jumătate de undă sunt introduse în fiecare braț al sistemului optic a MHD pentru a menține polarizarea similară a ambelor fascicule și pentru a obține franje de interferență cu un contrast ridicat. Unda obiect este suprapusă cu unda de referință folosind un separator de fascicul nepolarizat, iar apoi fasciculele combinate formează holograma digitală pe camera video de tip complementary metal–oxide–semiconductor (CMOS).

Mai întâi, sunt înregistrate hologramele digitale obiect, adică a regiunii unde este EOD iar ulterior are loc înregistrarea hologramelor digitale de referință, adică a regiunii straturilor subțiri de AP în care nu a avut loc înregistrarea HLP. Hologramele de referință poartă informații despre

faza sferică a fascicolului laser care trec prin obiectivul microscopului. Faza din hologramele obiectului este calculată folosind următoarea ecuație

$$\Phi_O(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_1(x, y) - I_3(x, y)}{I_2(x, y) - I_4(x, y)} \right], \quad (2)$$

unde, I_1, I_2, I_3, I_4 sunt cele patru intensități a hologramelor digitale ale obiectului studiat ce sunt înregistrate cu diferite faze ale unde de referință $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = \pi/2, \varphi_3 = \pi, \varphi_4 = 3\pi/2$.

Faza din hologramele de referință este calculată folosind următoarea ecuație

$$\Phi_R(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{R_1(x, y) - R_3(x, y)}{R_2(x, y) - R_4(x, y)} \right], \quad (3)$$

unde, R_1, R_2, R_3, R_4 sunt cele patru intensități de referință captate în regiunea fără EOD ce corespund schimbărilor de fază corespunzătoare. Faza obiectului este reconstruită cantitativ prin scăderea termenului suplimentar din faza de referință și este calculată folosind formula

$$\Delta\Phi_O(x, y) = \Phi_O(x, y) - \Phi_R(x, y). \quad (4)$$

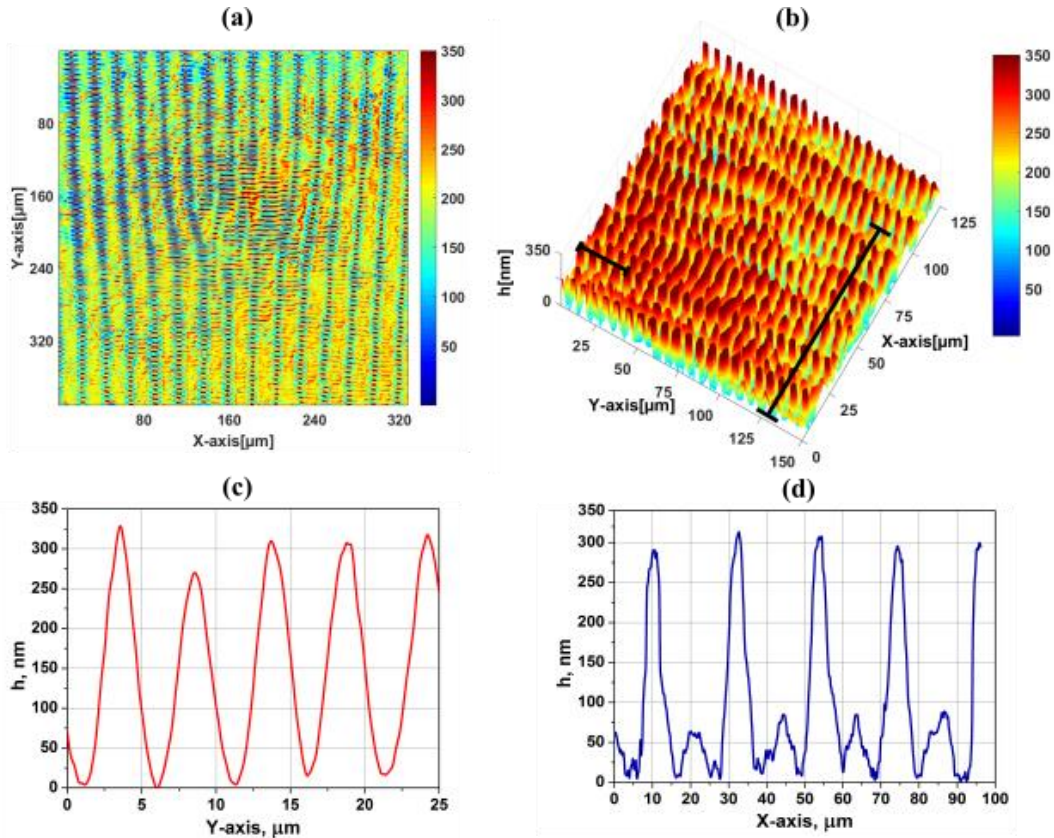


Fig. 11. Rezultatele investigării cu ajutorul MHD în configurația „phase-shifting”. (a) Imaginea bidimensională a EOD de tip vortex cu sarcina topologică $TC=2$; (b) Harta topografică în reprezentare tridimensională; (c) Secțiunea transversală de-a lungul axei Y; (d) Secțiunea transversală de-a lungul axei X a EOD de tip vortex create prin înregistrarea HLP cu două unde.

Imaginea și harta topografică a reliefului suprafeței elementului optic de difracție de tip vortex ce a fost obținut prin înregistrare HLP digitală cu două fascicule este ilustrată în Fig. 11. Se observă două rețele de difracție de-a lungul axelor X și Y datorită celor două regimuri ortogonale de înregistrare. Secțiunea transversală a rețelei de difracție construită de-a lungul axei Y, este prezentată în Fig. 11 (c), și dezvăluie o înălțime de relief de 300 nm și o perioadă de 5,0 μm . Această rețea de difracție este creată de interferența fasciculului modulat de MSL cu stări de polarizare de $+45^\circ$ și unda de referință cu stări de polarizare -45° în schema de înregistrare HLP. Profilul de suprafață extras din rețeaua de difracție de-a lungul axei X este prezentat în Fig. 11 (d). EOD de difracție obținut are forma unei rețele de difracție furcă și este rezultatul fazei unei rețele de difracție furcă ce a fost proiectat pe matricea MSL în unda obiect a schemei de înregistrare HLP. Pe axa X a fost observată o rețea cu două vârfuri: vârful mai mare având o înălțime de aproximativ 300 nm și vârful mai mic cu o înălțime de 50 nm. Perioada EOD investigate de 20,0 μm și corespunde rețelei de difracție în formă de furcă afișat pe matricea MSL. Originea vârfurilor mai mici ar putea fi rezultatul modulării indicelui de refracție a straturilor subțiri de azopolimer.

Teza se încheie cu formularea concluziilor generale și a recomandărilor formulate în urma cercetării.

CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

Dezvoltarea microscopiei holografice digitale ca instrument optic are un rol important în explorarea, înțelegerea și avansarea nanotehnologiei și a materialelor optice inovative. În prezent, îmbunătățirea continuă a microscopului ca instrument de investigare este obligatorie pentru a susține necesitățile micro- și nanotehnologiei. În acest sens, obiectivul principal al acestei teze a fost îmbunătățirea microscopului holografic digital, inclusiv a componentelor hardware și software, pentru investigații cantitative ale elementelor optice difractive la scară de nanometrică.

Un alt accent a fost pus pe înregistrarea EOD complexe folosind metode analogice și digitale pentru înregistrarea HLP pe nanomultistraturi de sticlă calcogenică și straturi subțiri de azopolimeri. În ambele scopuri, au fost introduse noi dispozitive digitale în configurațiile optice. Astfel, a fost necesară o calibrare detaliată a dispozitivelor cu cristale lichide ce sunt controlate digital. Înregistrarea directă într-un singur pas a EOD face posibilă păstrarea în timp a elementului original obținut, spre deosebire de procedurile de înregistrare care necesită tratarea chimică a probei.

Metodele de gravare cu plasmă și umedă, folosite adesea pentru a crea EOD pe materiale fotosensibile, distorsionează, într-un fel sau altul, atât modelul elementului calculat, forma franjelor, cât și adâncimea reliefului înregistrat. Puterea laserului și timpul de înregistrare directă sunt parametri variabili în cazul abordării holografice pentru înregistrarea EOD și sunt mai ușor controlate decât o serie de parametri de gravare. Proprietatea remarcabilă a EOD înregistrate prin HLP este eficiența lor de difracție care este mai mare comparativ cu eficiența EOD înregistrate prin holografie scalară. În plus, aceste EOD sunt deja gata de utilizare într-o configurație optică.

Ca o alternativă a componentelor optice tradiționale, EOD ar putea fi aplicate cu succes în dispozitivele optice moderne, prezentând funcționalități optice inovatoare, ce până acumnu au fost necunoscute. (Concluziile extrase din analiza literaturii prezentată în Capitolul 1 al tezei) În următoarele paragrafe sunt prezentate concluziile generale formulate în urma cercetărilor științifice prezentate în teză:

1. Rezultatele simulărilor computaționale ale MHD în configurația „off-axis” fără lentile au demonstrat că îmbunătățirea imagisticii de fază poate fi obținută prin introducerea unei măști de fază sinusoidală în schema optică a MHD. Datorită parametrilor optimizați ai rețelei de difracție (perioada, faza și numărul de rotații), mai multe informații despre frecvențele spațiale înalte ale spectrului obiectului sunt înregistrate pe senzorul camerei video. Valorile erorii medii

pătrărice a fazei reconstituite se reduc aproximativ cu 20%. În același timp, rezultatele simulărilor computaționale ale configurației MHD în configurația „phase-shifting” arată că prin introducerea unei rețele de difracție cu blaze în configurația optică a microscopului, eroarea de reconstrucție a fazei reconstituite scade aproximativ cu 72%. Această informație și instrumentele numerice dezvoltate pot fi apoi aplicate pentru înregistrarea, reconstrucția și procesarea hologramelor digitale. (Concluziile extrase din experimentele descrise în Capitolul 2 al tezei)

2. Aplicarea eficientă a dispozitivelor cu cristale lichide în sistemele holografice digitale presupune procedura obligatorie și importantă de calibrare detaliată a fazei și polarizării acestor dispozitive pentru fiecare configurație specifică. Calibrarea dispozitivelor cu cristale lichide arată că există erori semnificative atunci când acestea modulează faza și polarizarea unei electromagnetice incidente. În acest sent, procedurile software incluse în algoritmul de calibrare SPAR aplicat în această teză demonstrează o compensare a zgomotului extern, ceea ce reduce semnificativ cerințele față de stabilitatea interferometrului. (Concluziile extrase din experimentele descrise în Capitolul 3 al tezei)

a. Devierea standard a fazei în regiunea activă a pixelilor matricii MSL precum și a fazei în întreaga matrice demonstrează faptul că MSL prezintă variații spațiale; deviația standard a părții active a pixelului MSL este cu 0,5 radiani mai mică în comparație cu faza întregii matrici a MSL. Acest lucru se datorează spațiului dintre pixeli („regionilor moarte”) prezente pe matricea MSL, unde fasciculul laser incident nu poate controla modulația de fază. Procedura de calibrare ad-hoc a modulației de polarizare a MSL a fost implementată pentru evaluarea elipticității și a unghiului de rotație azimutal al fasciculului de ieșire în funcție de nivelul de gri adresat MSL-ului. Rezultatele indică faptul că starea de polarizare a fasciculului transmis de MSL este în mod tipic eliptică. Doar atunci când pe matricea MSL este încărcat niveluri de gri 125, se menține polarizarea liniară a luminii de intrare. De asemenea, se arată că cu cât este mai mare tensiunea aplicată pe MSL, cu atât devine mai mică modulația polarizării luminii.

b. Calibrarea RVCL indică faptul că schimbarea de fază produsă de RVCL a fost posibilă prin ajustarea fină a axei optice a cristalului lichid față de planul de polarizare al fasciculului incident. Dependența schimbării de fază în funcție de tensiunea aplicată a RVCL-ului este neliniară. În scopul obținerii unor schimbări de fază precise în sistemele MHD care conțin un RVCL, a fost construită o aproximare liniară a schimbării de fază în intervalul 2-3.2V al tensiunilor aplicate. MHD dezvoltat cu un RVCL incorporat, a implementat pentru investigarea fără contact și pur optică a transformărilor de fază și relief de suprafață straturilor subțiri de AP și a NMS de SC.

3. Metodele directe de înregistrarea HLP analogică și digitală au permis formarea EOD a multifuncționale pe suprafața NMS de Sc și a straturilor subțiri de AP, fiind rezultatul fenomenului transfer de masă ce este indus de caracterul vectorial al HLP. Înregistrarea HLP analogică a format EOD pe straturi subțiri de AP cu o eficiență de difracție relativ înaltă de aproximativ 33%, în timp ce înregistrarea HLP digitală a permis crearea unor EOD cu geometrii complexe precum EOD de tip vortex capabile să genereze fascicule cu singularități de fază distribuite spațial în mai multe dimensiuni, dar eficiența de difracție a acestor elemente în primul maxim de difracție nu depășește 1%. (Concluzii extrase din experimentele descrise în Capitolul 4 al tezei)

4. MHD în configurațiile „off-axis” și „phase-shifting” sunt aplicabile pentru investigarea hărților indicelui de refracție și topografiei suprafeței diferitor EOD înregistrate pe straturi subțiri de AP și NMS de SC. Algoritmul de procesare a hologramelor digitale „off-axis” cu SPAR a fost ajustat și aplicat. Acest algoritm permite reconstruirea fazei și suprimarea zgomotelor din hologramele digitale. Un RVCL a fost integrat în sistemul de imagistică al MHD în configurația „phase-shifting” pentru îmbunătățirea performanței și stabilității microscopului. (Concluzie extrasă din experimentele descrise în Capitolul 5 al tezei)

5. Schema optică propusă a MHD în configurația „phase-shifting” s-a dovedit a fi utilă ca un instrument metrologic versatil pentru măsurători cantitative tridimensionale ale structurilor complexe ale EOD, inclusiv deformări transparente ale reliefului de suprafață la scară nanometrică. Pe baza acestor rezultate s-au făcut două asumări. În primul rând, se asumă că variația rezultatelor poate fi cauzată și de modularea indicelui de refracție care apar și în volumul straturilor subțiri de AP în timpul expunerii. În al doilea rând, se asumă că modulările neuniforme ale adâncimii reliefului EOD cauzate de distribuția fasciculului Gaussian fac dificilă investigarea acestora în zona cu modulare maximă a adâncimii. Prin urmare, investigațiile ulterioare în acest domeniu ar spori cunoștințele despre mecanismele fenomenelor fotoinduse în straturile subțiri de AP, precum și aplicațiile lor în fonică. (Concluzie extrasă din experimentele descrise în Capitolul 5 al tezei)

RECOMANDĂRI

Luând în considerare concluziile de mai sus, sunt evidențiate următoarele recomandări pentru cercetări ulterioare:

1) Automatizarea procesului de reconstrucție a fazei, prin eliminarea introducerii manuale/individuale a hologramelor digitale în software-ul MATLAB și ajustarea parametrilor

algoritmului. Se recomandă implementarea algoritmilor de inteligență artificială pentru aceste proceduri.

2) Implementarea MHD cu mai multe lungimi de undă pentru extinderea aplicării sistemului optic MHD. O astfel de configurație avansată va mări precizia măsurărilor absolute a fazei și va diversifica probele studiate. În plus, MHD cu mai multe lungimi de undă permite schimbarea rezoluției microscopului.

3) Dezvoltarea unui sistem optic complex (o combinație de MHD cu o configurație de înregistrare HLP) capabil să înregistreze în timp real EOD și să investigheze faza, formarea hărții topografice a EOD și a eficienței de difracție. Acest sistem ar facilita o înțelegere mai profundă a fenomenelor fotoinduse și ar mări precizia investigațiilor. Dezvoltarea MHD în regim de reflexie ar permite examinarea mai completă a straturilor subțiri și a obiectelor opace.

4) Cercetări extinse privind contribuția schimbărilor reliefului de suprafață și a indicelui de refracție în modulației fazei a straturilor subțiri de AP și a NMS de SC ar facilita în continuare înțelegerea completă a interacțiunilor lumină-materie, precum și a aplicațiilor fotonice ale acestor materiale.

5) Dezvoltarea unui sistem compact MHD pentru o transportare mai ușoară capabil să se adapteze la diverse sarcini și condiții de măsurare. Acest lucru poate fi realizat prin implementarea unor dispozitive digitale avansate precum MSL și RVCL (sugerate în această teză) care sunt capabile să execute eficient sarcini și să înlocuiască componente optice analogice.

BIBLIOGRAFIE

1. SOMKUWAR, A. S., DAS, B., VINU, R. V., PARK, Y., SINGH, R. K. Holographic imaging through a scattering layer using speckle interferometry. In: Journal of Optical Society of America A. 2017, vol. 34, nr 8, pp. 1392-1399. ISSN 1520-8532 (online). Disponibile: DOI: 10.1364/JOSAA.34.001392
2. JESACHER, A., RITSCH-MARTE, M. Synthetic holography in microscopy: opportunities arising from advanced wavefront shaping. In: Contemporary Physics. 2016, vol. 57, nr. 1, pp. 46–59. ISSN 1366-5812 (online). Disponibile: DOI: 10.1080/00107514.2015.1120007
3. MUFFOLETTO, R. P., TYLER, J. M. AND TOHLIN, J. E. Shifted Fresnel diffraction for computational holography. In: Optics Express. 2007, vol. 15, nr. 9, pp. 5631-5640. ISSN 1094-4087 (online). Disponibile: DOI: 10.1364/OE.15.005631
4. EL-SCHICH, Z., LEIDA MÖLDER, A., GJÖRLOFF WINGREN, A. Quantitative Phase Imaging for Label-Free Analysis of Cancer Cells-Focus on Digital Holographic Microscopy. In: Applied Sciences. 2018, vol. 8, pp.1027-1043. ISSN 2076-3417 (online). Disponibile: DOI: 10.3390/app8071027
5. REKOLA, H., BERDIN, A., FEDELE, C. et al. Digital holographic microscopy for real-time observation of surface-relief grating formation on azobenzene-containing films. In: Scientific Reports. 2020, vol. 10, paper nr. 19642. ISSN 2045-2322 (online). Disponibile: DOI: 10.1038/s41598-020-76573-6
6. CAZAC V., MESHALKIN, A. ACHIMOVA, E. ABASHKIN, V. KATKOVNIK, V. SHEVKUNOV, I. CLAUS, D. PEDRINI, G. Surface relief and refractive index gratings patterned in chalcogenide glasses and studied by off-axis digital holography. In: Applied Optics. 2018, vol.57, nr 3, pp. 507-513. ISSN 2155-3165 (online). Disponibile: DOI:10.1364/AO.57.000507
7. SHEN, Y., WANG, X., XIE, Z., MIN, C., FU, X., LIU Q., GONG, M., YUAN, X. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities. In: Light: Sci. and Appl. 2019, vol. 8, nr. 90. ISSN 2047-7538 (online). Disponibile: DOI: 10.1038/s41377-019-0194-2
8. VAYALAMKUZHI, P. et. al. Direct patterning of vortex generators on a fiber tip using a focused ion beam. In: Optics Letters. 2016, vol.41, pp.2133-2136. ISSN 1539-4794 (online). Disponibile: DOI: 10.1364/OL.41.002133

9. FERNANDEZ, R., GALLEGO, S., MARQUES, A., NEIPP, C., CALZADO, E. M., FRANCES, J., MORALES-VIDAL, M., BELENDEZ, A. Complex Diffractive Optical Elements Stored in Photopolymers. In: *Polymers*. 2019, vol. 11, nr. 1920. ISSN 2073-4360 (online). Disponibile: DOI: 10.3390/polym11121920
10. KATKOVNIK, V., SHEVKUNOV, I.A., PETROV, N.V., AND EGIAZARIAN, K. Wavefront reconstruction in digital off-axis holography via sparse coding of amplitude and absolute phase. In: *Optics Letters*. 2015, vol.40, nr.10, pp. 2417-2420 (2015). ISSN 1539-4794 (online). Disponibile: DOI: 10.1364/OL.40.002417
11. YAMAGUCHI, I., ZHANG, T., Phase-shifting digital holography. In: *Optics Letters*. 1997, vol. 22, nr. 16, pp. 1268-1270. ISSN 1539-4794 (online). Disponibile: DOI: 10.1364/OL.22.001268
12. GAO, P., YAO, B., HARDER, I., MIN, J., GUO, R., ZHENG, J., YE, T. Parallel two-step phase-shifting digital holograph microscopy based on a grating pair. In: *Journal of Optical Society of America A*. 2011, vol. 28, pp. 434-440. ISSN 1520-8532 (online). Disponibile: DOI: 10.1364/JOSAA.28.000434
13. YAMAGUCHI, Ichirou. Phase-Shifting Digital Holography. In: Poon T.-C., eds. *Digital Holography and Three-Dimensional Display* [online]. Boston; Massachusetts: Springer New York, 2006. ISBN 978-0-387-31397-9. Disponibile: <https://link.springer.com/book/10.1007/0-387-31397-4>
14. MESHALKIN, A., ROBU, S., ACHIMOVA, E., PRISACAR, A., SHEPEL, D., ABASHKIN, V., TRIDUH G. Direct photoinduced surface relief formation in carbazole-based azopolymer using polarization holographic recording. In: *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2016, vol. 18, nr. 9-10, pp. 763–768. ISSN 1841-7132 (online). Disponibile: <https://old.joam.inoe.ro/index.php?option=magazine&op=view&idu=4016&catid=98>

LISTA PUBLICAȚIILOR LA TEMA TEZEI DE DOCTOR

Articole în reviste din bazele de date Web of Science și SCOPUS cu factor de impact:

1. **CAZAC, V.**, ACHIMOVA, E., ABASHKIN, V., MESHALKIN, A., LOSMANSCHII C., EGIAZARIAN, K. Polarization holographic recording of vortex diffractive optical elements on azopolymer thin films and 3D analysis via phase-shifting digital holographic microscopy. În: *Optics Express*, 2021, Vol. 29, Nr. 6, pp. 9217–9230. ONLINE: ISSN 1094-4087. <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-29-6-9217&id=449090>. **IF=3.833.**
2. **CAZAC, V.** Improved 3D imaging of phase shifting digital holographic microscope by compensation for wavefront distortion. În: *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, Vol. 1745, Nr. 1, (pp.6). ONLINE: ISSN 1742-6596. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1745/1/012020/pdf>. **IF 0.21**
3. **CAZAC, V.**, LOSMANSCHII, C., ACHIMOVA, E., MESHALKIN, A., ABASHKIN, V., PODLIPNOV, V. Characterization of Polarization Holographic Gratings Obtained on Azopolymer Thin Films by Digital Holographic Microscopy. În: *J. of Biomedical Photonics & Engineering*, 2021, Vol. 7, Nr. 3, (5pp). ONLINE: ISSN 2411-2844. <http://jbpe.ssau.ru/index.php/JBPE/article/view/3433>. **IF=1.02.**
4. **CAZAC, V.**, MESHALKIN, A., ACHIMOVA, E., ABASHKIN, V., KATKOVNIK, V., SHEVKUNOV, I., CLAUS, D., PEDRINI, G. Surface relief and refractive index gratings patterned in chalcogenide glasses and studied by off-axis digital holography. 2018, În: *Applied Optics*, Vol. 57, NR. 3, pp. 507-513. ONLINE: ISSN 2155-3165. <https://doi.org/10.1364/AO.57.000507>. **IF=1.905**

Articole în lucrările conferințelor și altor manifestări incluse în bazele de date Web of Science și SCOPUS

5. ACHIMOVA, E., ABASKIN, V., **CAZAC, V.**, MESHALKIN, A., LOSHMANSCHII, C. The Anisotropy of Light Propagation in Biological Tissues. The 5th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, Chișinău, Moldova, November 3 – 5, 2021. În: *IFMBE Proceedings – Springer Nature Switzerland AG*, 2022, Vol. 87, pp. 149-156. ISSN 1680-0737. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-92328-0_20
6. **CAZAC, V.**, ACHIMOVA, E., KATKOVNIK, V., SHEVKUNOV, I., EGIAZARIAN, K. Pixel-Wise Calibration of the Spatial Light Modulator. *Frontiers in Optics and Laser Science*, Washington, DC, United States, September 14–17, 2020, În: *Proceedings Frontiers in Optics and Laser Science (OSA Technical Digest)*, 2020, Nr. JTu1B.31. ISBN 978-1-943580-80-4. <https://doi.org/10.1364/FIO.2020.JTu1B.31>
7. MESHALKIN, A., ACHIMOVA, E., LOSMANSCHII, C., PODLIPNOV, V., **CAZAC, V.** Analysis of diffraction efficiency of the phase gratings in dependance of grooves number. The VI International Conference on Information Technology and Nanotechnology, Samara, Russia, May 26-29, 2020. În: *IEEE Proceedings of VI International Conference on Information Technology and Nanotechnology*, 2020, pp. 143-146. ISBN: 978-1-7281-7042-8. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9253317>
8. **CAZAC, V.**, ACHIMOVA, E., ABASHKIN, V., MESHALKIN, A., KATKOVNIK, V., SHEVKUNOV I. Noise minimizing by harmonic phase diffraction gratings in off-axis lensless digital holography. The 9th edition of the International Conference

"Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies", Constanța, România, 2018, August 23-26. În: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, December 31, 2018 Vol. 10977, Nr. 109771Z, (pp.6). ISSN 0277786X. <https://doi.org/10.1117/12.2323560>

9. ACHIMOVA, E., ABASKIN, V., CAZAC, V., MESHALKIN, A., PEDRINI, G., CLAUS, D., SHEVKUNOV, I., KATKOVNIK, V. Surface topography studied by off-axis digital holography, , OSA Advanced Photonics Congress, Zurich, Switzerland. July, 2-5, 2018, În: *OSA Technical Digest*, Nr. NoW1J. 7. ISBN: 978-1-943580-43-9. <https://doi.org/10.1364/NOMA.2018.NoW1J.7>

Articole în lucrările conferințelor și altor manifestări științifice în alte baze de date acceptate de către ANACEC

10. CAZAC, V. Spiral illumination applied for extended performance of the digital holographic microscope. *Conferința Internațională - Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători ediția IX*, 2020, USDC, 15 iunie, Chișinău, pp. 55-60. ISBN 978-9975-108-66-9. https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/112740
11. CAZAC, V., ACHIMOVA, E. Application of bessel beam for digital holographic microscopy. În tezele conferinței: *Conferința Internațională - Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători ediția VII*, 2018, USDC, 15 iunie, Chișinău, pp. 27-31. ISBN 978-9975-108-44-7. https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/63929
12. LOSHMANSCHII, C., MESHALKIN, A., ACHIMOVA, E., ABASHKIN, V., PRISACAR, A., CAZAC, V., POGREBNOI, S., MACAEV, F. Influence of thickness and polarization on diffraction efficiency of direct patterned diffraction gratings in carbazole-based azopolymer films. În tezele conferinței: *Microelectronics and Computer Science Conference*, 2017, 19 octombrie, Chisinau, pp. 84-87, ISBN 978-9975-4264-8-0. https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/55287
13. MESHALKIN, A., CAZAC, V., ACHIMOVA, E., ABASHKIN, V., A., KATKOVNIK, V., SHEVKUNOV, I. Phase grating application for digital holographic imaging. În tezele conferinței: *The 9th International Conference on Microelectronics and Computer Science & the 8th Conference of Physicists of Moldova*, 2017, 19-21 octombrie, Chisinau, pp. 302-305. ISBN 978-9975-4264-8-0. https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/55391
14. LOSHMANSKY, C., MESHALKIN, A., ACHIMOVA, E., ABASHKIN, V., PRISAKAR, A., CAZAC, V., POGREBNOI, S., MAKAEV, F. Influence of thickness and polarization on diffraction efficiency of direct patterned diffraction gratings in carbazole-based azopolymer films. În tezele conferinței: *The 9th International Conference on Microelectronics and Computer Science & the 8th Conference of Physicists of Moldova*, 2017, 19-21 octombrie, Chisinau, pp. 84-87. ISBN 978-9975-4264-8-0. https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/55287
15. CAZAC, V., MESHALKIN, A., ACHIMOVA, E., ABASHKIN, V., A., KATKOVNIK, V., SHEVKUNOV, I. Phase retrieval of diffractive optical elements from off-axis digital holograms using SPAR technique. In: *17th International Young conference: Optics and high technology Material Science SPO 2016*, 2016, 27-30 octombrie, Kiev, Ukraina, pp.144-145

- 16.** MESHALKIN, A., **CAZAC, V.**, ACHIMOVA, E., ABASHKIN, V., A., KATKOVNIK, V., SHEVKUNOV, I Application of diffraction gratings for phase imaging enhancement in digital holographic microscopy. In: *3rd International Conference: Health Technology Management HTM-2016*, 2016, October 6-7, Chişinau, pp. 65. https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/74965

ADNOTATION

to the thesis „Development of digital holographic microscope for the investigation of diffractive optical elements recorded on chalcogenide glasses and azopolymer thin films”, presented by Veronica Cazac for conferring the scientific degree of Ph.D. in Physics, Specialty 134.01 Physics and technology of materials, Chişinau, 2023.

The thesis has been written in English language and consists of the introduction, 5 chapters, general conclusions and recommendations, and the list of 214 references. The thesis contains 128 pages of basic text, 74 figures and 61 formulas. The results presented in the thesis are published in 17 scientific publications and presented at 16 international conferences.

Key words: digital holographic microscope, diffractive optical elements (DOEs), chalcogenide glasses (ChGs), azopolymers (APs), liquid crystal spatial light modulator and variable retarder, phase mask.

The goal: Quantitative analysis of key parameters of different types of diffractive optical elements, patterned on ChGs nanomultilayers and AP thin films by polarization holographic recording via improved hardware and software configuration of digital holographic microscope (DHM).

Research objectives: The development of numerical algorithms for phase reconstruction from acquired digital holograms of DOEs recorded on photosensitive ChGs nanomultilayers and AP thin films and subsequent mapping of their surface relief and refractive index; the modification of the optical part of the DHM in the off-axis and phase-shifting configurations and integration of liquid crystal devices; the calibration of phase and polarization of the liquid crystal devices implemented in digital holographic setups; the development of analog and digital holographic techniques for one-step polarization holographic recording (PHR) of different types of DOEs on nanomultilayers structures from ChGs and carbazole-based APs; the application of the developed DHM with the integrated tools for characterization of the created DOEs.

Scientific novelty and originality of the results: the improved version of the DHM software and hardware configuration has been demonstrated as a versatile instrument for the investigation of DOEs on ChG nanomultilayers and AP thin films; analog and digital PHR are new methods that allowed the photo-induced formation of complex DOEs on ChG nanomultilayers and azopolymer thin films.

The main scientific problem solved consists in elaborating of multifunctional DOEs patterned on ChGs nanomultilayers and azopolymer thin films via analog and digital PHR, and nanoscale investigation of their optical and physical parameters by high performance digital holographic microscope.

Theoretical significance and applicative value: of the work is that continuous enhancement of microscopic tools is mandatory in order to support efficient investigations in different fields as photonics, material science, biomedicine, etc. Therefore, the optical system of DHM including hardware and software components was improved for efficient investigation of the diffractive optical elements on a nanometer scale. The capability to create and perform quantitative analysis of multifunctional DOEs make them attractive in a variety of applications, including aberration correction, sensitive microscopy, augmented reality, imaging systems, solar energy and more.

The implementation of the scientific results: the research presented in this thesis has been successfully implemented in the framework of the EU project nr. 687328 (2016-2018), bilateral moldo-belarus project ANCD 19.80013.50.07.04A/BL (2020-2021), national project ANCD 20.70086.16/COV (2020-2021), national project 20.80009.5007.03 (2020-2023) and international project ANCD 21.80013.5007.1M (2021-2023), and may be further used for educational purposes.

ADNOTARE

la teza „Dezvoltarea microscopului holographic digital pentru investigarea elementelor optice de difracție înregistrate pe straturi subțiri de sticle calcogenice și azopolimeri”, elaborată de Veronica Cazac pentru conferirea gradului științific de doctor în științe fizice la specialitatea 134.01 Fizica și tehnologia materialelor, Chișinău, 2023.

Teza este scrisă în limba engleză și constă din introducere, 5 capitole, concluzii generale și recomandări, și bibliografia din 214 titluri. Teza conține 128 pagini de text de bază, 74 figuri și 61 formule. Rezultatele prezentate în teză sunt publicate în 17 lucrări științifice și prezentate la 16 conferințe.

Cuvinte cheie: microscop holografic digital (MHD), elemente optice de difracție (EOD), sticle calcogenice (SC), azopolimeri (AP), modulator spațial de lumină (MSL) cu cristale lichide, retarder variabil cu cristale lichide (RVCL), mască de fază.

Scopul tezei: Analiza cantitativă a parametrilor cheie a diferitor tipuri de EOD, înregistrate pe nanomultistraturi (NMS) de SC și straturi subțiri de AP utilizând metoda holografică cu lumina polarizată (HLP) cu ajutorul configurației hardware și software îmbunătățite a MHD.

Obiectivele tezei: Dezvoltarea algoritmilor de reconstrucție numerică pentru reconstrucția fazei din holograme digitale ale EOD înregistrate pe nanomultistraturi fotosensibile de SC și straturi subțiri de AP și măsurarea topografică a suprafeței precum și a indicelui de refracție a acestora; modificarea schemei optice a MHD în configurația „off-axis” și în configurația „phase-shifting” și integrarea dispozitivelor cu cristale lichide; calibrarea fazei și polarizării dispozitivelor cu cristale lichide implementate în configurații holografice digitale; dezvoltarea tehnicilor analogice și digitale pentru înregistrarea HLP printr-o singură etapă a diferitelor tipuri de EOD pe nanomultistraturi din SC și AP pe bază de carbazol; aplicarea MHD dezvoltat cu instrumentele integrate pentru caracterizarea EOD create.

Noutatea științifică și originalitatea rezultatelor: versiunea îmbunătățită a configurației software și hardware a MHD a fost demonstrată ca un instrument versatil pentru investigarea EOD pe nanomultistraturi de SC și a straturilor subțiri de AP; Înregistrarea HLP analog și digitală sunt metode noi care au permis formarea foto-indusă a EOD complexe pe nanomultistraturi de SC și straturilor subțiri de AP.

Problema științifică soluționată constă în elaborarea EOD multifuncționale înregistrate pe nanomultistraturi de SC și straturi subțiri de AP prin înregistrarea HLP analog și digitală precum și investigarea la scară nanometrică a parametrilor optici și fizici a acestora folosind MHD de înaltă performanță.

Semnificația teoretică și valoarea aplicativă: a tezei de doctor constă în îmbunătățirea continuă a microscopului ca instrument pentru efectuarea cercetărilor eficiente în diferite domenii precum fotonica, știința materialelor, biomedicină etc. În acest scop, sistemul optic al MHD, inclusiv componentele hardware și software, au fost îmbunătățite pentru investigarea eficientă a EOD la scară nanometrică. Posibilitatea de a crea și de a efectua analize cantitative a EOD multifuncționale le face atractive pentru o gamă largă de aplicații, inclusiv corectarea aberațiilor (erorilor), microscopia sensibilă, realitate augmentată, sisteme de imagistică, energie solară și multe altele.

Implementarea rezultatelor științifice: studiile prezentate în această teză au fost cu succes implementate în cadrul proiectului European nr. 687328 (2016-2018), proiectului bilateral moldo-belorus ANCD 19.80013.50.07.04A/BL (2020-2021), proiectului național ANCD 20.70086.16/COV (2020-2021), proiectului național 20.80009.5007.03 (2020-2023) și proiectului internațional ANCD 21.80013.5007.1M (2021-2023), și pot fi utilizate cu scop didactic pentru studenții ciclului universitar și post-universitar.

АННОТАЦИЯ

к диссертации «Разработка цифрового голографического микроскопа для исследования дифракционных оптических элементов на тонких пленках халькогенидных стекол и азополимеров», представленной Вероникой Казак на соискание ученой степени доктора физических наук по специальности 134.01 Физика и технология материалов, Кишинев, 2023

Диссертация написана на английском языке и состоит из введения, пяти глав, общих заключений и рекомендаций, и списка цитируемой литературы из 214 источников. Диссертация содержит 128 страниц базового текста, 74 графиков и 61 формул. Результаты диссертационной работы опубликованы в 17 научных публикациях и представлены на 16 конференциях.

Ключевые слова: цифровой голографический микроскоп (ЦГМ), оптические дифракционные элементы (ДОЭ), халькогенидные стекла (ХС), азополимеры (АП), жидкокристаллический пространственный модулятор света и фазовая пластинка, фазовая маска, цифровая обработка изображений.

Цель диссертации: Количественный анализ ключевых параметров различных типов дифракционных оптических элементов, нанесенных на многослойные наноструктуры ХС и тонкие пленки АП, методом поляризационной голографической записи (ПГЗ) с использованием усовершенствованной аппаратной и программной конфигураций ЦГМ.

Задачи диссертации: Разработка алгоритмов для реконструкции фазы из цифровых голограмм ДОЭ записанных на ХС и тонких пленках АП, и последующего картографирования их поверхностного рельефа и показателя преломления; модификация ЦГС во внеосевой и со сдвигом фазы конфигурациях и интеграция жидкокристаллических устройств; калибровка фазы и поляризации жидкокристаллических устройств; разработка аналоговых и цифровых методов одноэтапной ПГЗ; применение разработанного ЦГС с интегрированными инструментами для исследования характеристик созданных ДОЭ.

Научная новизна и оригинальность результатов: усовершенствованная версия программного и аппаратного обеспечения ЦГС была продемонстрирована как универсальный инструмент для исследования ДОЭ, записанных на наномногослойных ХС и тонких пленках АП; аналоговая и цифровая ПГЗ - это новые методы, которые позволили фотоиндуцированное формирование сложных ДОЭ.

Основная научная задача, решаемая диссертацией, заключается в разработке многофункциональных ДОЭ, нанесенных на наномногослойные ХС и тонкие пленки АП с помощью аналоговых и цифровых ПГЗ, и в исследовании их оптических и физических параметров в наномасштабе с помощью высокоэффективного ЦГС.

Теоретическая значимость и прикладная ценность: заключается в том, что постоянное совершенствование микроскопических инструментов является обязательным для поддержки исследований в различных областях, как например фотоника, материаловедение, биомедицина и т. д. Оптическая система ЦГС была усовершенствована для эффективного исследования ДОЭ. Возможность создания и проведения количественного анализа многофункциональных ДОЭ делает их привлекательными для различных применений, включая микроскопию, системы визуализации, солнечную энергетику и многое другое.

Внедрение научных результатов: представленные в настоящей диссертации результаты были успешно применены в рамках Европейского проекта нр. 687328 (2016-2018), в молдавско-белорусском двустороннем проекте ANCD 19.80013.50.07.04A/BL (2020-2021), в национальном проекте ANCD 20.70086.16/COV (2020-2021) и 20.80009.5007.03 (2020-2023) и международном проекте ANCD 21.80013.5007.1M (2021-2023).

CAZAC VERONICA

**DEZVOLTAREA MICROSCOPULUI HOLOGRAFIC DIGITAL
PENTRU CERCETAREA ELEMENTELOR OPTICE DE
DIFRACTIE ÎNREGISTRATE PE STRATURI SUBȚIRI DE
STICLE CALCOGENICE ȘI AZOPOLIMERI**

134.01 – Fizica și tehnologia materialelor

Rezumatul tezei de doctor în științe fizice

Aprobat spre tipar: 21.11.2023

Hârtie offset. Tipar Offset.

Coli de tipar: 2,0

Formatul hârtiei: 60x84 1/16

Tiraj: 35 ex

Comanda nr. 117/23

**Centrul Editorial – Poligrafic al USM
Str. A. Mateevici 60, MD - 2009, Chișinău**