

INSTITUTUL DE FIZICĂ APLICATĂ

Cu titlu de manuscris

C.Z.U: 532.42:535.317.2(043.3)

ACHIMOVA ELENA

**OPTICA DIFRACTIVĂ PENTRU
HOLOGRAFIA OPTICĂ ȘI DIGITALĂ**

134.01 — Fizica și tehnologia materialelor

Autoreferatul tezei de doctor habilitat în științe fizice

CHIȘINĂU, 2019

Teza a fost elaborată în Laboratorul Materiale pentru Fotovoltaică și Fotonică
al Institutului de Fizică Aplicată

Consultant științific:

CULIUC Leonid, doctor habilitat în științe fizico-matematice, profesor universitar, membru titular al Academiei de Științe a Moldovei
134.01 — Fizica și tehnologia materialelor

Referenți oficiali:

SIDORENCO Anatolii, doctor habilitat în științe fizico-matematice. profesor universitar, membru titular al Academiei de Științe a Moldovei

ȚIULEANU Dumitru, doctor habilitat în științe fizico-matematice, profesor universitar, membru corespondent al Academiei de Științe a Moldovei

KOKENYESI Sandor, doctor habilitat în științe fizico-matematice, profesor universitar, Ungaria

Componența consiliului științific specializat:

URSACHI Veaceslav, doctor habilitat în științe fizico-matematice, conferențiar cercetător, *președinte*;

BUZDUGAN Artur, doctor habilitat în științe tehnice, profesor universitar, *secretar științific*;

IOVU Mihail, doctor habilitat în științe fizico-matematice, profesor cercetător, *membru al CȘS*;

SÂRBU Nicolai, doctor habilitat în științe fizico-matematice, profesor universitar, *membru al CȘS*;

POPESCU Aurelian, doctor habilitat în științe fizico-matematice, profesor universitar, România, *membru al CȘS*;

NICA Denis, doctor habilitat în științe fizico-matematice, profesor universitar, *membru al CȘS*;

Susținerea va avea loc la 22 februarie 2019, ora 15-00 în ședința Consiliului Științific Specializat DH 134.01-01 din cadrul Institutului de Fizică Aplicată, str. Academiei 5, Chișinău, MD – 2028

Teza de doctor habilitat și autoreferatul științific pot fi consultate la Biblioteca Centrală „A. Lupan”, Academia de Științe a Moldovei (str. Academiei 5a, MD-2028, Chișinău, Republica Moldova) și la pagina web a ANACEC (www.cnaa.md).

Autoreferatul a fost expediat la 24 ianuarie 2019.

Secretar științific al Consiliului științific specializat,
doctor habilitat în științe tehnice,
profesor universitar

_____ **BUZDUGAN Artur**

Consultant științific,
doctor habilitat în științe fizico-matematice,
profesor universitar, membru titular al AȘM

_____ **CULIUC Leonid**

Autor

_____ **ACHIMOVA Elena**

Actualitatea și importanța studiului științific abordat

Optica difractivă (optica ondulatorie) - denumită tradițional optică fizică – cuprinde așa fenomene importante ca interferența, difracția și polarizarea lumini. Studiul acestor fenomene, care stau la baza înțelegerii unor astfel de dispozitive și concepte ca hologramele, interferometrele, spectrometrele cu rezoluție înaltă, rețelele de difracție, polarizatoarele, a plăcilor de sferă de undă, sau a propagării fasciculului laser în câmpul apropiat și cel îndepărtat, ș.a.

Descoperirea holografiei de D. Gabor, urmată apoi de lucrările savanților E. Leith și a J.Upatnieks cu utilizarea unor microstructuri optice fabricate folosind interferența luminii, a făcut posibilă efectuarea unor transformări aproape arbitrare ale fronturilor de undă [1, 2]. Realizarea de către A. Lohmann a simulării hologramelor optice prin transparente binare generate digital [3, 4] a fost un alt pas important pe calea aplicării pe scară largă a difracției în optică. Această nouă abordare a fost numită holografie digitală (HD), sau, echivalent, holografie generată de calculator (HGC) [5].

Progresele tehnologice din ultimile decade, în special a microlitografiei optice [6] și tehnicile de modelare la calculator au dus la o explozie a aplicărilor difracției în optică, ceea ce a făcut ca optica difracțională să devină unul din cele mai actuale domenii în optică.

Elementele optice de difracție (EOD) au revoluționat industria fonică [7-11] însă actualmente, domeniile de aplicare sunt limitate de capacitatea noastră de a fabrica cu mare precizie profile complexe ale substraturilor optice.

Două tipuri de tehnici sunt în continuă dezvoltare spre a avansa holografia. Una din tehnici, denumită în mod obișnuit holografia digitală, captează franjurile de interferență folosind senzori digitali de imagine. Imaginile sunt reconstruite numeric prin procesarea digitală a câmpurilor captate.

Cealaltă tehnică ține de hologramele generate de calculator. Calculatorul generează numeric un tablou de franjuri și reconstruiește câmpul undelor de lumină, folosind difracția cu tabloul de franjuri imprimat.

Pe lângă crearea metodelor digitale de înregistrare a EOD, optimizarea proceselor de înregistrare are loc și în holografia optică. Un exemplu elocvent este holografia polarizată (HP), propusă de Sh. D.Kakicheshvili [12]. Utilizarea fasciculelor cu două polarizări diferite pentru înregistrarea informației asigură o calitate înaltă a imaginilor holografice 3D. Acest proces posedă câteva proprietăți unice [13]: 1) teoretic eficiența difracțională poate ajunge la 100% chiar și în filme subțiri; 2) fasciculele difractate au proprietăți de polarizare unice, în funcție de polarizarea fasciculelor de înregistrare și citire; 3) posibilitatea fabricării elementelor optice sensibile la polarizare; 4) modularea polarizării este obligatorie pentru hologramele vectoriale, dar modularea intensității, necesară în cazul înregistrării holografice scalare, poate să lipsească. Cu alte cuvinte, în material se obține o anizotropie fotoindusă (AF).

EOD vectoriale efectuează transformarea deplină a frontului de undă, inclusiv a polarizării luminii, astfel devenind un instrument puternic pentru cercetarea materialelor. Acest fapt a determinat motivarea noastră de a studia HP bazată pe înregistrarea optică și cea cu fascicul electronic în sticlele halcogenice și azopolimeri.

Problema creării EOD constă în dezvoltarea mediilor optice și metodelor de înregistrare, care pot reproduce suficient de bine forma sofisticată a EOD. În cazul opticii difractive în lumină polarizată devine inevitabilă cerința, ca transmisia EOD să fie dependentă de polarizare. În acest scop, adițional la metodele optice de înregistrare, se elaborează noi metode digitale. Metoda de înregistrare și mediul optic trebuie să se potrivească reciproc, adică mediul sa-și schimbe parametrii săi în concordanță cu metoda de înregistrare.

Sticlele calcogenice (SC) reprezintă o clasă importantă de semiconductori amorfi folosiți pentru dezvoltarea elementelor optice active și pasive în fonică. SC fiind compuse, în principal, din elementele S, Se și Te din grupa VIb, satisfac majoritatea criteriilor menționate mai sus. Cauza din care SC prezintă o varietate de fenomene fotoinduse [14] este determinată de structura electronică și atomică unică a acestor materiale. Posedând proprietăți de semiconductor cu banda energetică de 1 - 3 eV, SC pot fi excitate cu lumină din domeniul vizibil al spectrului. Purtătorii de sarcină excitați sunt localizați pe defectele de dezordine ale sticlei, fiind supuși unei interacțiuni puternice cu rețeaua. Structural, SC are o legătură atomică moderată, care este mai puțin rigidă decât în cazul sticlelor oxidice, dar nici așa de flexibilă ca la polimerii organici. Prin urmare, interacțiunea electron-rețea poate provoca unele modificări structurale, care sunt stabile la temperatura camerei și pot fi restabilite prin tratament termic. Mecanismele detaliate ale fiecărui fenomen fotoindus n-au fost elucidate până la capăt, principalul motiv fiind însăși structura sticlei, dificil de determinat în mod explicit.

Structurile multistrat sunt cele mai simple nanostructuri artificiale care pot fi fabricate relativ ușor cu parametri geometrice controlabili și investigate sub formă de filme subțiri. Sunt cunoscute câteva abordări în vederea extinderii cercetării straturilor de SC spre nanostructuri, în special spre structuri nanostratificate, de tipul suprarețelelor multistrat [15-17], însă problema dependenței transformărilor fotostructurale de nanostructurarea artificială rămâne nesoluționată. În plus toate aceste aplicări ale SC solicită elaborări chimice pentru a forma relieful suprafeței, adică ele nu pot fi fabricate direct prin înscrierea directă cu laserul printr-un singur pas (by one step).

Astfel, pentru îmbunătățirea performanțelor optice finale a dispozitivelor propuse, această lucrare a avut drept scop dezvoltarea nanostructurilor de SC, combinând avantajele diferitelor compoziții de SC cu proprietățile nanostructurilor finale.

O altă clasă de materiale utilizate pe scară largă pentru înregistrarea EOD sunt polimerii fotosensibili. Structura lor moleculară poate fi considerată drept cheie pentru înțelegerea științei și tehnologiei fotopolimerilor [18-21]. Structura de bază a unui polimer constă dintr-un lanț central și

grupuri laterale. Atomii, legați prin legături covalente, se întind de-a lungul întregului polimer, și formează lanțul central al polimerului (de obicei din carbon, dar poate conține și alți atomi cum ar fi N, O sau Si). Toți ceilalți atomi fac parte din grupurile laterale (hidrogenul fiind cel mai simplu caz, dar pot fi și grupări mai complexe, de exemplu grupările metil (CH₃) sau alcool (OH), astfel creându-se o mare varietate de materiale polimerice [18-21].

În cazul polimerilor funcționalizați cu derivați de azobenzen, ceea ce duce la fotoisomerizarea ciclică a grupărilor bazate pe azobenzenă, poate, de asemenea, provoca transportul de masă pe scară largă a lanțurilor de polimeri, care se observă ca o structură reliefată de rețea superficială (RRS).

Există o multitudine de similitudini în comportamentul fotostructural în calcogenizi și în sistemele de polimeri cu azo-coloranți (AP), cum ar fi modificările semnificative de volum, deformațiile anizotrope, fluiditatea și mișcările mecanice. În ambele sisteme schimbările induse dispar la temperaturile tranziției vitroase. Birefringența fotoindusă apare în SC, dar și în polimerii colorați sub acțiunea atât a luminii polarizate, cât și celei nepolarizate. Alte aspecte care unesc SC și AP sunt sensibilitatea la acțiunea fasciculelor laser și celor de electroni și abilitatea deformării directe a suprafeței sub acțiunea acestor iradierii. În această lucrare noi investigăm și comparăm posibilitățile formării directe, într-un singur pas (*one-step*), prin iradierea cu laserul, sau cu electroni a reliefului superficial pe nanomultistraturi (NMS) de SC și filme din AP în vederea estimării eficienței acestora și limitelor de rezoluție.

Problemele existente în cele două tehnologii holografice, optică și digitală – absența unei descrieri cantitative a holografiei optice și complexitatea computațională în cazul holografiei digitale, pot fi soluționate prin aplicări și cunoștințe aflate în zona de intersecție a ambelor tipuri de holografie. Această lucrare cuprinde studiul ambelor tehnici holografice – optice și digitale, luând în considerare contribuțiile ambelor domenii spre a înlătura blocajele și a da naștere unor noi aplicări și soluții.

Designul optim al sistemului optic reprezintă un hibrid cu funcții, selectate în mod corespunzător, între componentele analogice și digitale ale sistemului. Fenomenul fizic care determină aceste funcții este difracția luminii. În lucrare am abordat următoarele aspecte ale acestei probleme:

- Dezvoltarea metodelor holografice optice și digitale pentru elaborarea EOD de înaltă eficiență;
- Elaborarea mediilor de înregistrare pentru EOD pe baza structurilor nanomultistrat din SC și AP;
- Dezvoltarea metodelor holografiei digitale pentru caracterizarea EOD elaborate și testarea disponibilității acestora pentru diverse domenii de aplicare.

Scopul principal al lucrării este cercetarea și dezvoltarea tehnologiilor elementelor de optică difractivă, care combină elemente optice, dispozitive și algoritmi de operare pentru aplicarea lor în practică:

1. Dezvoltarea și designul mediilor de înregistrare bazate pe structuri nanomultistrat (NMS) din sticle calcogenice (SC) și polimeri conținând carbazol azo-dopat (azo-polimeri, AP) pentru înregistrarea elementelor optice de difracție;

2. Elaborarea tehnologiilor holografice digitale și optice pentru crearea EOD pe medii NMS fotosensibile din filme subțiri de SC și AP;
3. Simularea și înregistrarea directă (*one-step*) a EOD pe baza structurilor NMS de SC și AP ca medii de înregistrare;
4. Investigarea aplicabilității metodelor holografice elaborate în calitate de instrumente pentru studierea proprietăților optice ale materialelor din SC și AP la scară nanometrică;
5. Aplicarea EOD sub formă de componente optice în dispozitive optoelectronice, biomedicină și sisteme de protecție.

Designul EOD se va baza pe rezultatele studiilor sistematice ale abilității structurilor NMS din SC și a filmelor subțiri din AP de a fi structurate prin metodele scalară și vectorială la înregistrarea cu fascicule laser, expunere la radiații electronice și înregistrare holografică digitală. Vor fi studiate potențialul și limitele mediilor dezvoltate și a metodelor aplicate pentru micro- și nanostructurarea lor. Vor fi prezentate exemple practice de tehnologie optimizată pentru fabricarea elementelor microoptice funcționale.

Pentru a atinge obiectivul propus, au fost determinate următoarele **sarcini principale**:

- Dezvoltarea proceselor tehnologice de depunere termică în vid a filmelor nanomultistrat din sticle calcogenice și de obținere prin metoda *spin-coating* a filmelor subțiri din azo-polimeri noi, special sintetizați.
- Studiul parametrilor optici ai filmelor nanomultistrat SC-Se și ai straturilor subțiri din azo-polimerii sintetizați utilizând metodele spectroscopiilor optice, inclusiv împrăștierii Raman.
- Determinarea structurii componentelor constituente ale nanostructurilor SC-Se și a filmelor subțiri din AP sintetizați spre a analiza posibilitățile de a le utiliza pentru înregistrarea directă a EOD.
- Studiul modificărilor fotoinduse a parametrilor optici ai nanostructurilor din SC-Se și a filmelor subțiri din AP sintetizați, precum și a schimbărilor structurale fotoinduse apropiate. Corelarea lor cu metodele holografice de înregistrare a EOD – optică și digitală.
- Dezvoltarea tehnicii de înregistrare directă (*one-step*) a hologramelor de intensitate și în lumină polarizată aplicabile pentru procesul de imprimare superficială a EOD în nanomultistraturi de SC-Se și filme subțiri din AP sintetizați.
- Dezvoltarea metodelor holografice digitale pentru investigarea nedistructivă a EOD submicrometrice cu precizie nanometrică.
- Studiul proprietăților EOD înregistrate în filme nanomultistrat de SC-Se și filme subțiri din AP sintetizați utilizând interferometria holografică digitală (IHD), microscopia holografică digitală (MHD) și microscopia de forță atomică (AFM).
- Studiul aplicării practice a rezultatelor cercetărilor opticii difractive în holografia optică și digitală.

Din punctul de vedere al cercetării fundamentale, lucrarea va contribui la o mai bună înțelegere a fenomenelor induse în NMS din SC și filmele subțiri din AP la expunerea lor la radiații laser/fasculi de electroni de diferită energie/intensitate. În luptare, de asemenea, se i-a în considerare proiectarea sistemelor optice difracționale avansate bazate pe prelucrarea hibridă optică și digitală a imaginilor.

Noutatea științifică a rezultatelor cercetării:

- Elaborarea tehnologiei computerizate originale de depunere în vid a structurilor nanomultistrat dintr-un șir de compoziții de SC-Se pentru înregistrări directe (*one-step*) holografice și în fasciculi de electroni.
- Realizarea în premieră a procesului de sinteza chimică a unui nou AP și obținerea prin metoda spin-coating a filmelor subțiri din AP noi pentru înregistrarea holografică directă și în fasciculi de electroni.
- Efectuarea înregistrării reliefate prin metoda directă (*one-step*) EOD pe suprafață structurilor NMS din SC-Se și a filmelor subțiri din AP cu aplicarea holografiei de polarizare, care exclude orice etapă umedă și/sau a unei alte etape de corodare selectivă și, ca consecință, eliminarea distorsiunilor suprafeței EOD.
- Determinarea experimentală a variațiilor complexe ale parametrilor optici (indicele de refracție, coeficientul de absorbție) ai filmelor NMS din SC-Se și filmelor subțiri de AP, care au loc sub acțiunea atât a componentelor scalare, cât și celor vectoriale ale câmpului electric al luminii.
- Obținerea directă (*one-step*) a rețelelor de difracție reliefate de suprafață filmelor NMS de SC-Se și a filmelor subțiri de AP imprimate la intensități scăzute de iluminare laser ($\sim 1 \text{ W/cm}^2$, dacă nu se specifică altfel) guvernate de structurarea fotoindusă a materialului, care inițiază transferul de masă de suprafață
- Rezultatele diagnosticii prin Microscopia de Forță cu Gradient Magnetic (Gradient Magnetic Force Microscopy) în baza cărora a fost demonstrat, că rețelele periodice reliefate, obținute folosind înregistrarea holografică directă, duc la apariția unor fluctuații esențiale ale valorii câmpului magnetic deasupra suprafeței reliefate a filmelor NMS din $\text{As}_{40}\text{S}_{60}:\text{Mn-Se}$.
- Determinarea experimentală a faptului, că formarea rețelelor de relief prin metode de înregistrare holografică optică și digitală pe suprafața filmelor din NMS SC-Se și de AP este condiționată de răspunsul vectorial (spatial anizotrop) al mediului.
- Rețelele reliefate pe suprafața filmelor subțiri de AP, înregistrate direct (*one-step*), cu fascicule laser și de electroni sunt induse de transformările *trans-cis-trans*, care provoacă fenomene de transfer de masă.
- S-a constatat, că utilizarea înregistrării holografice directe (*one-step*) ameliorează semnificativ calitatea optică a reliefului de suprafață al EOD la scară nanometrică (\sim cu un factor de 10) în comparație cu suprafața filmului constituent.

Problema principală, soluționată în concordanță cu obiectivele tezei constă în cercetarea aspectelor teoretice și aplicative ale proceselor de nanostructurare induse în materiale amorfе prin iradiere cu lumină și flux de electroni, care conduc la formarea în aceste medii sensibile structurilor de difracție și aplicarea acestora în holografia optică și digitală.

Teze înaintate spre susținere:

1. Tehnologia computerizată, elaborată pentru depunerea termică în vid de straturi succesive pe un substrat de sticlă în mișcare ciclică, permite obținerea nanomultistraturilor amorfе de SC-Se (cu grosimi de la 5 nm până la 3000 nm cu?? un număr total de 100-200 nanostraturi) cu păstrarea proprietăților structurale ale nanostraturilor constituențe.

2. Prin metoda de polimerizare cu radicali liberi a fost sintetizat un nou fotopolimer azo-dopat (AP) Poly-*n*-Epoxipropyl Carbazol cu Dispers Orange (polyPEPC-co-DO). Filmele subțiri de AP depuse prin metoda spin-coating sunt sensibile la radiația laserului la înregistrarea holografică polarizată și la iradierea cu fasciculi de electroni datorită transformărilor *trans-cis-trans*.

3. Banda de transmisie spectrală ChG-Se NML este dominată de nanomultistraturile de Se și parametrii optici ale acestora sunt condiționați de structurarea ale nanostraturilor constituențe. Ordinea la raza scurtă de acțiune a materialelor constituențe este păstrată în NML; ordinea la rază medie – este menținută de grosimile optime ale nanostraturilor constituențe. Procesele fotoinduce în NML ChG-Se sunt guvernate de fotoexcitarea purtătorilor de sarcină în volumul multistraturilor de Se și de injecția eficientă a golurilor la interfețele Se / ChG.

4. Valorile eficienței de difracție a rețelelor de suprafață înregistrate prin metoda holografică polarizată (vectorială) crește de 8-10 ori pentru polarizări circulare dreapta-stânga și stările de polarizare orthogonal orientate $\pm 45^\circ$ a fasciculelor de înscriere în comparație cu rețelele înregistrate prin metoda holografică de intensitate (scalară). Valorile eficienței difracției în modul de transmisie pentru rețelele ChG-Se NML au o valoare maximă de 45%.

5. Prin tehnologii holografice optice și digitale a fost realizată metoda directă (*one-step*) de formare a reliefului pe suprafața filmelor NMS din SC-Se și celor de AP, care este rezultatul transferului de masă indus de caracterul vectorial al holografiei în lumină polarizată (vectorială); adâncimile relieful de suprafață are valori cuprinse între 100 și 400 nm.

6. La înregistrarea hologramelor de polarizare în NMS din $As_{40}S_{60}:Mn$ are loc formarea directă a unui relief magnetic, cauzat de schimbările periodice ale grosimii straturilor, care a fost demonstrat prin tehnica Gradient Magnetic Force Microscopy.

7. Abordarea de inginerie, aplicată pentru designul și analiza unei configurații MHD pentru determinarea calității finale a imaginilor, a fost demonstrată utilizând codul optic ZEMAX. Au fost elaborate criterii cantitative pentru determinarea punctelor slabe ale sistemului, rolul lor în limitarea calității imaginii și modalitățile de depășire ale acestora.

8. Configurație a MHD off-axis de înaltă rezoluție este aplicabilă pentru măsurători cantitative ale topografiei de suprafață și indicelui de refracție al structurilor de difracție formate în nanostructuri din SC-Se și filme subțiri de AP, la scară nanometrică. A fost dezvoltat și aplicat un algoritm variațional pentru configurația holografică digitală off-axis, capabil să producă imagini din date cu mult zgomot la un raport semnal-zgomot înalt.

9. S-a demonstrat aplicabilitatea practică a filmelor NMS din SC-Se și filmelor subțiri de AP pentru realizarea componentelor optice difractive: măști de fază pentru prelucrarea optică în MHD, elemente de securitate sporită și semne de protecție pentru diferite tipuri de produse.

Valoarea practică a lucrării

➤ Studiile sistematice ale abilității filmelor NMS din SC și AP de a fi structurate prin metode de înscriere laser, expunere la radiații electronice și înregistrare holografică digitală deschid perspective de dezvoltare și/sau optimizare a unei game largi de aplicații în diverse domenii tehnice (optica difractivă, medicină, elemente anti-contrafacere, holografie imagistică, etc.).

➤ Elaborarea unei noi tehnologii computerizate de depunere nanomultistrat în vid poate fi aplicată pentru obținerea structurilor nanomultistrat din SC de diferită compoziție. Au fost relevate o serie de noi proprietăți structurale și optice ale structurilor nanomultistrat de perspectivă pentru noi aplicații practice de optica difractivă.

➤ Tehnologia holografică digitală, dezvoltată pentru marcarea laser directă a articolelor din aur, a fost implementată cu succes în cadrul a două contracte cu Ministerul Finanțelor a Republicii Moldova, Camera de Stat pentru Supravegherea Mărcii. Tema acestor contracte a fost dezvoltarea hologramelor digitale computerizate, proiectarea sistemului optic pentru setarea markerului laser și a dispozitivelor pentru verificarea hologramelor. Tehnologia poate fi aplicată și asupra altor produse autentice pentru a proteja piața internă a Moldovei de mărfuri contrafăcute.

➤ Aplicarea metodei holografiei în lumină polarizată exclude necesitatea oricăror etape de corodare chimică în procesul de producere a EOD, micșorează timpul de imprimare reliefate a hologramelor și îmbunătățește calitatea lor.

➤ Au fost elaborate și înregistrate EOD de fază în structuri nanomultistrat de SC-Se și filme subțiri AP cu perioade variate ale rețelelor în dependență de spectrul de aplicare practică ale EOD.

➤ Holografia digitală și optică, precum și numeroasele lor variații (interferometria holografică, microscopia holografică, topografia holografică, holografia digitală cu mai multe lungimi de undă, holografia de schimbare a fazelor, holografia coerentă, etc.) au devenit metode la alegere pentru diferite aplicații metrologice în imagistica tridimensională (3D). Progresul în cercetarea dispozitivelor holografice stimulează tehnologiile legate direct de viața umană, precum biomedicina, securitatea și testarea nedistructivă.

➤ A fost elaborat și testat un interferometru portabil pe bază de fibre optice pentru înregistrarea electronică a imaginii speckle (Electronic Speckle Pattern Interferometer) pentru investigarea operelor de artă din lemn, instrument cu potențiale aplicații pentru restauratori.

Rezultatele lucrării au fost aplicate în practică la implementarea cu succes a următoarelor proiecte, dintre care 7 proiecte cu finanțare din partea Uniunii Europene, 2 proiecte de transfer tehnologic și 2 proiecte de vouchere:

1. Proiect al Uniunii Europene H2020-TWINN-2015 Twinning HOLO (N 687328) “Stimularea excelenței științifice și a capacității de inovare în microscopia holografică digitală a Institutului de Fizică Aplicată al Academiei de Științe a Moldovei” (2016-2018). În cadrul acestui proiect au fost proiectate și optimizate EOD pentru dezvoltarea microscopiei optice digitale. Au fost elaborați algoritmi avansați de procesare a imaginii bazați pe conceptul SPAR.

2. Proiect STCU (Nr 6098) „Proiectarea și dezvoltarea elementelor optice difracționale bazate pe azo-polimeri pentru aplicații în biofonică și optoelectronică” (2016-2018).

3. Proiect bilateral Moldova- Ukraine (N 17.80013.5007.03/Ua) “New composite functional materials and structures on the base of chalcogenide glasses and photopolymers for optical and optoelectronic applications” (2017-2018).

4. Proiect al Uniunii Europene FP7-INCO.2013-9.1 SECURE-R2I (Nr 609534) “Consolidarea cooperării cu țările din Parteneriatul estic privind reducerea decalajului dintre cercetare și inovare pentru societățile incluzive și sigure” (2013-2016). Au fost proiectate și implementate holograme de securitate care utilizează EOD bazate pe sticle calcogenice și azo-polimeri.

5. Proiect bilateral Moldo-German (Nr 13.820.15.10/GA) „Microscop holografic digital pentru investigarea țesuturilor biologice cu programul LabVIEW” (2013-2015). A fost proiectat un microscop holografic digital care a fost aplicat pentru testarea semințelor *Orobanche Cumana*. A fost elaborat programul de procesare a imaginilor digitale bazat pe codul LabVIEW.

6. Proiect național de cercetări aplicative (Nr 15.817.02.04A) “Sintetizarea și caracterizarea materialelor semiconductoare calcogenice multicomponente noi pentru aplicații în fotovoltaică și fonică” (2015-2018).

7. Proiect al Uniunii Europene FoF-ICT-2013.7.2 I4MS-GATE (Nr 608899) “Ecosisteme europene de inovare ca o poartă pentru sprijinirea cercetării și experimentării FoF” (2013- 2015).

8. Proiect al Uniunii Europene FP7, Voucher-„ener2i” (Nr 2014/346-992) “Polimeri pentru îmbunătățirea eficienței energetice” (2015).

9. Proiect al Uniunii Europene FP7, Voucher-„ener2i” (Nr 2014/346-992) "Concentrator Fresnel din filme subțiri de polimer pentru creșterea eficienței celulelor fotovoltaice" (2015).

10. Proiect național de cercetări aplicative (Nr 11.817.05.03A) „Materiale semiconductoare halcogenice, compuși metaloorganici și magneți moleculari pentru medii de înregistrare, senzori, aplicații optoelectronice și fotovoltaice” (2011-2014).
11. Proiect național de transfer tehnologic “Imprimarea și identificarea etichetei cvasiholografice protectoare pe articole din metale prețioase”, Institutul de Fizică Aplicată - Camera de Stat pentru Supravegherea Mărcii a Republicii Moldova (2012).
12. Proiect național de stat ”Filme subțiri și fibre optice din materiale nanocompozite organice și anorganice pentru dispozitive optoelectronice noi” (2011-2012).
13. Proiect național de stat „Nanocompozite bazate pe materiale organice/anorganice pentru dispozitive luminescente și structuri de difracție” (2009-2010).
14. Proiect al Uniunii Europene “MEPOS” (Nr COOP-CT-2004-507747) “Instalație pe bază de senzori laser pentru măsurarea mostrelor din lemn” (2005-2006).
15. Proiect al Uniunii Europene “GLASSTECH” (Nr IPS-2001-42141) “Dezvoltarea metrologiei optice pentru controlul calității sticlei” (2003-2006).
16. Proiect CRDF (SUA) “Holograme suprapuse” (2002-2003).

Aprobarea lucrării

1. Rezultatele principale ale tezei au fost raportate la următoarele conferințe științifice:
2. The International Conference “Application Chalcogenide Glass Semiconductors on Optoelectronics”, 4-9 October, Chisinau, 1992.
3. The International Conference on Optoelectronics SIOEL’95, Bucharest, Romania, 1995.
4. The 2nd International Conference on Photo-Excited Processes and Applications ICPEPA, Jerusalem, 1995.
5. The International Workshop on Advanced Technologies of Multicomponent Films and Structures and Their Application in Photonics, Uzhgorod, Ukraine, 1996.
6. The International Semiconductor Conference CAS'96, Sinaia, Romania, 1996.
7. The 5th International Conference on Optics ROMOPTO'97, Bucharest, 1997.
8. 3rd General Conference of the Balkan Physical Union, 1997, Cluj-Napoca, Romania.
9. The International Conference “Laser Florence 2002, A Window on the Laser Medicine World”, 28-31 October 2002, Florence, Italy.
10. Sixth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications, 2004, Ancona, Italy.
11. 7th International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications, 2006, Ancona, Italy.
12. 8th International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advanced and Applications, 2008, Ancona, Italy.

13. Sixth International Conference “Holography. Science and Practice”, July 2009, Kiev, Ukraine.
14. The International Conference Micro- to Nano-Photonics - Romopto 2009, Aug. 31-Sept. 3, 2009, Sibiu, Romania.
15. The International Conference on Advanced Phase Measurement Methods in Optics and Imaging, 17-21 May 2010, Locarno, Switzerland.
16. 9th International Conference on Vibration Measurements by Laser and Non-contact Techniques & Short Course, 22-25 June 2010, Ancona, Italy.
17. Fourth International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications, August, 2010, Budapest, Hungary.
18. The 21st International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS21) and the International Meeting on Information Photonics (IP2011), May 16-18 2011, Ottawa, Canada.
19. The 1-st International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering with related German-Moldovan Workshop on Novel Nanomaterials for Electronic, Photonic and Biomedical Applications ICNBME – 2011, 7-8 July, 2011, Chisinau, Moldova.
20. VII International Conference “Electronics and Applied Physics”, Oct.19-22 2011, Kyiv, Ukraine.
21. The 8th EOS Topical Meeting on Diffractive Optics DO 2012, February 2012, Delft, Netherlands.
22. The 4-th International Conference on Telecommunications, Electronics and Informatics, May 17-20, 2012, Chisinau, Moldova.
23. The 6-th International Conference on Material Science and Condensed Matter Physics, MSCMP-2012, September, 2012, Chisinau, Moldova.
24. The International Conference “Sensor Electronics and Microsystems Technologies”, July 2012, Odessa, Ukraine.
25. The 2-nd International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, ICNBME – 2013, April 18-20, 2013, Chisinau, Moldova.
26. 10th International Conference “HoloExpo-2013”, September 2013, Moscow, Russia.
27. The 6-th International Conference on Amorphous and Nanostructured Chalcogenides, ANC-6, June 24-28, 2013, Brasov, Romania.
28. The International Scientific Symposium «Modern Agriculture-Achievements and Prospects » 80th Anniversary of State Agrarian University of Moldova, Oct. 09-11 2013, Chisinau, Moldova.
29. International Conference “Tbilisi-Spring 2014: Nuclear Radiation Nanosensors and Nanosensory Systems”, 5 - 10 March 2014, Tbilisi, Georgia.

30. III-rd International Conference “Semiconductor Materials, Information Technologies & Photovoltaic”, May 20-23 2014, Kremenchug, Ukraine.
31. VIII International Conference “Microelectronics and Computer Science”, May 2014, Chisinau, Moldova.
32. IX International Conference “Amorphous and microcrystalline semiconductors”, July 2014, St-Petersburg, Russia.
33. International Research Conference “Nanotechnologies and nanomaterials”, August 23-30 2014, Lvov, Ukraine.
34. Conference EMRS-2014, Fall Meeting in Warsaw, Poland.
35. The 7-th edition of the International Conference "Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies", August 21 – 24 2014, Constanta, Romania.
36. The 7-th International Conference “Materials Science and Condensed Matter Physics”, MSCMP-2014, September 16-19, 2014, Chisinau, Moldova.
37. 9-th Open German-Russian Workshop on Pattern Recognition and Image Understanding, December 2014, Koblenz, Germany.
38. 7-th International Conference Sviridov Readings on Chemistry and Chemical Education 7-11 April 2015, Minsk, Byelorussia.
39. NATO Advanced Research Workshop “Functional Nanomaterials and Devices for Electronics, Sensors, Energy Harvesting”, April 2015, Lvov, Ukraine.
40. 5th International Conference "Telecommunications, Electronics and Informatics ICTEI-2015”, May 2015, Chisinau, Moldova.
41. XV International Conference "Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems" May 11-16 2015, Ivano-Frankivsk, Ukraine.
42. The XVth International Young Scientists’ Conference on Applied Physics, June 10-13 2015, Kyiv, Ukraine.
43. The International Conference “Nanotechnology and nanomaterials”, NANO-2015, August 2015, Lvov, Ukraine.
44. 3rd International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering IFBME-2015, September 2015, Chisinau, Moldova.
45. International Meeting “Clusters and Nanostructures materials CNM’4”, 12-16 October 2015, Uzhgorod, Ukraine.
46. 16-th International conference “Optics and High Technology Material Science SPO-2015”, October 22-25 2015, Kiev, Ukraine.
47. IX International Conference on Topical problems of semiconductor physics, 16-20 May 2016, Tryskavets, Ukraine.

48. IV International Conference “Semiconductor materials, information technology and photovoltaics”, 26-28 May, 2016, Kremenchug, Ukraine.
49. 7-th International Scientific and Technical Conference «Sensors electronics and microsystem technologies», May 30- 3 June 2016, Odessa, Ukraine.
50. The International Conference “Imaging and Applied Optics”, 25 - 28 July 2016, Heidelberg, Germany.
51. International Research and Practice Conference «Nanotechnology and Nanomaterials NANO-2016”, 24-27 August 2016, Lvov, Ukraine.
52. 8th International Conference “Materials science and condensed matter physics”, September 12-16 2016, Chisinau, Moldova.
53. EMN Meeting on Photonics 2016, 19-23 September, Barcelona, Spain.
54. 3rd International Conference on Health Technology Management, October 6-7 2016, Chisinau, Moldova.
55. The International Conference “Optics and high technology material science/ Devoted to 100th Anniversary of the Optical Society of America”, 27-30 October 2016, Kyiv, Ukraine.
56. 3rd International Conference on Information Technology and Nanotechnology – 2017, April 25-27, 2017, Samara, Russia.
57. International Conference “Frontiers in Polymer Science”, 17-19 May 2017, Seville, Spain.
58. 4th International Conference on Information Technology and Nanotechnology – 2018, April 24-27, 2018, Samara, Russia.
59. NATO Advanced Research Workshop - Functional Nanostructures and Sensors for CBRN Defence and Environmental Safety and Security “*FNS-CBRN Defence – 2018*”, 14-17 May-2018, Chisinau, Moldova.
60. The 6-th International Conference "Telecommunications, Electronics and Informatics"-ICTEI 2018, 24-27 May 2018, Chisinau, Moldova.
61. 9th International Conference “Materials science and condensed matter physics”, September 24-28, 2018, Chisinau, Moldova.

Cuvinte-cheie: nanotehnologie, nanostructuri, elemente optice difractive, holografia optică și digitală, sticle calcogenice, azo-polimeri, rețele de relief de suprafață, interferometrie și microscopie holografică digitale, metode holografice vectoriale și scalare.

Conținutul lucrării

Structura tezei este după cum urmează:

Capitolul 1 reflectă cele mai recente informații despre crearea elementelor optice de difracție, avantajele și dezavantajele acestora în comparație cu optica de refracție. Sunt revizuite materialele amorfe din punct de vedere al utilizării lor ca medii de înregistrare. Metodele holografice optice și digitale sunt

descrise în contextul aplicării acestora pentru înregistrarea informațiilor. Capitolul mai conține o prezentare generală a diferitelor metode optice pentru controlul și studiul EOD. Capitolul 1 se încheie cu obiectivele și noutatea științifică a lucrării pentru dezvoltarea unor tehnologii competitive.

În **Capitolul 2** sunt prezentate metodele de fabricare a nanomultistraturilor din SC și a filmelor subțiri de polimeri. Filmele nanomultistrat (NMS) din sticle calcogenice de Se, As_2S_3 , $As_{37}S_{58}Ge_5$, $As_2S_3Mn_{2\%}$, $As_2S_3Cr_{4\%}$ și din straturi succesive SC-Se au fost obținute prin depunere termică alternativă prin mască a două materiale din două creuzete separate pe un substrat de sticlă rotit continuu, aflat la temperatura camerei, într-o singur ciclu de depunere în vid. A fost elaborată tehnica de control a întregului ciclu de depunere termică în vid a structurilor din SC asistată de calculator. Accesul direct atât la filmele multistrat SC-Se, cât și la cele obținute din materialele constitutive din SC și Se oferă posibilitatea studiului procesului de înregistrare și cercetarea proprietățile optice separat pe nanostructurile SC-Se și elemente constitutive. Tehnologia permite depunerea de straturi subțiri cu grosimea unui strat de la 0,005 μm până la grosimea totală a probei de 3,0 μm . Muchia de absorbție a NMS SC-Se este aproape de muchia de absorbție a fulmului multistrat din Se, obținut în același proces de depunere, astfel straturile din Se domină în transmisia filmelor NMS SC-Se.

Printr-un procedeu modificat, polimerul azobenzenic a fost obținut prin reacția de poli-n-epoxipropil-carbazol (PEPC) cu dispersor azo-colorant Dispers Orange (DO) în toluen fierbinte. Soluția rezultantă de azopolimer marcat cu 4-[(4'-nitrofenil) azo]anilină, numită poli(PEPC-co-DO) a fost filtrată, determinată regiunea de absorbție prin spectroscopia UV-Vis și utilizată pentru depunerea filmelor subțiri prin metoda spin-coating. S-a investigat procesul de depunere a filmelor subțiri polimerice cu grosimea dorită la centrifugare. Schimbarea concentrației soluției conduce la o modificare a grosimii filmelor obținute, iar această dependență este cvasiliniară, care poate fi utilizată pentru a produce filme submicronice de grosimea dorită. S-au sintetizat o serie de compuși conținând carbazol, și anume poli-epoxipropilcarbazol (PEPC), poli-epitiopirolcarbazol (PETPC) și copolimeri ai PETPC: glicid butirat (PETPC: GB).

A fost studiată dependența spectrală a indicelui de refracție n a probelor proaspăt obținute și determinate grosimile filmelor prin metoda Swanepoel. Au fost obținute trei tipuri de probe NMS As_2S_3 -Se cu trei perioade de modulare. Perioada de modulare a fost aleasă în așa mod, că să acopere una, două și trei dimensiuni ale moleculelor și clusterilor din As_2S_3 și Se - mărime caracteristică așa-numitei ordini la distanță medie în sticle. O astfel de abordare pentru configurarea straturilor în probe ne permite să investigăm restricțiile asupra mărimilor straturilor SC constitutive, ce determină comportamentul nanostructurii în ansamblu.

Parametrii optici ai filmurilor NMS integrale și constitutive au fost calculați în baza modelului oscilatorului singular. Muchia de absorbție optică E_g a fost determinată din reprezentarea grafică Tauc $(ah\nu)^{1/2} = f(E)$. Indicele de refracție n ca funcție a lungimii de undă a fost analizat în baza modelului de

dispersie Wemple-DiDomenico, care se bazează pe abordarea modelului oscilatorului singular. Parametrii optici ai NMS sunt analizați în afara modelului oscilatorului singular. Explicația sugerată este de a observa diferența dintre valorile experimentale ale energiei de dispersie E_d și cea teoretică bazată pe diferențele în structura compactă. În cazul Se în forma amorfă, legarea în lanț mărește numărul efectiv de coordonare deasupra valorii celei mai apropiate din vecinătate și aceste interacțiuni sunt efectiv pierdute sau cel puțin reduse. Următorul efect optic este reducerea puterii oscilatorului E_0 a perechii singulare în banda de conducție. S-a constatat, că nanostraturile constituente sunt bine descrise de acest model independent de compoziția lor.

Acțiunea luminii UV și vizibile ($E = 80\ 000\ \text{lx}$) asupra straturile fotopolimerice obținute din copolimerii PEPC sau CAM cu triiodometan induce efectul de fotocrosslinking, care se caracterizează prin apariția unei noi benzi de absorbție la $\lambda = 640 - 650\ \text{nm}$ în spectrul electronic. Intensitatea benzii de absorbție $\lambda = 640\ \text{nm}$ corelează cu intensitatea modificărilor structurale fotoinduse în stratul de fotopolimer. Iradierea filmelor poli(PEPC-co-DO) cu un singur fascicul la $473\ \text{nm}$ duce la izomerizarea *trans-cis* în banda izomerului *trans*- centrată la lungimea de undă $\sim 450\ \text{nm}$. Rezultatul acestei izomerizări este tranziția structurală la izomerul *cis*- și o reducere concomitentă a coeficientului de absorbție în banda izomerului *trans*-.

Au fost studiate spectrele Raman ale nanostraturilor SC constituente și NMS SC-Se. S-a stabilit că spectrele Raman ale filmelor separate din SC și Se sunt similare cu cele raportate în literatură. Pentru probele proaspăt depuse, zonele de interfață între straturi, care reprezintă o mare parte din volumul total al probei, nu afectează pozițiile vârfurilor pentru ambele materiale. Aceasta indică faptul că filmele din SC obținute nu conțin legături noi în comparație cu filmele preparate prin metode convenționale de depunere în vid. Spectrele Raman ale filmelor separate din Se, componente ale filmelor NMS, denotă că ele se caracterizează cu o bandă puternică la $251,1\ \text{cm}^{-1}$, corespunzătoare vibrațiilor de întindere a legăturilor, precum și benzi mai slabe la $110\ \text{cm}^{-1}$ și $131,5\ \text{cm}^{-1}$, specifice pentru inelele Se_8 și fragmentele de inele Se_8 . Este cunoscut că Se este un material instabil și se cristalizează la temperatura camerei. Dar, în cazul nostru stratul amorf de Se cu grosimea de $5 - 15\ \text{nm}$, plasat între două straturi de SC amorfe, își menține starea amorfă. Schimbarea structurii filmului de Se în timpul expunerii arată că procesele din Se (valoarea T_g pentru Se este de $\sim 35\ ^\circ\text{C}$) declanșează procese de transfer de masă în NMS SC-Se datorită neuniformității structurale care se produce în funcție de distribuția intensității luminoase în timpul înregistrării. Modificarea intensității vârfurilor neuniformităților pentru NMS cu grosimi diferite ale nanostraturilor constituente, mai pronunțate în straturile de Se, este cauzată de o ordonare superioară a structurii.

Pentru investigarea modificărilor fotoinduse în SC și AP este utilizată microscopia holografică digitală off-axis. Rețelele înregistrate reprezintă obiecte microscopice de fază/amplitudine cu o modulare fotoindusă a parametrilor la scară nanometrică. Modularea indicelui de refracție și a grosimii determină

variația de fază. Pentru investigarea obiectelor de fază menționate s-a aplicat tehnica imagisticii cantitative de fază (ICF), foarte utilă pentru studiul obiectelor care nu absorb sau nu dispersează semnificativ lumina. În holografia digitală frontul de undă al obiectului poate fi reconstruit dintr-un singur cadru. Informația cantitativă despre faza și amplitudinea a frontului de undă al obiectului poate fi obținută digital pe toată adâncimea obiectului din holograma înregistrată, ceea ce face posibilă focalizarea digitală pe diferite straturi ale probei și reconstruirea profilului 3D al ei. Prin urmare MHD off-axis reprezintă tehnica adecvată ICF pentru investigarea modificărilor parametrilor fizici (indicele de refracție și grosimea) care stau la originea proprietăților SC.

Trei tipuri principale de rețele de difracție pot fi diferențiate în funcție de schimbările care apar în timpul înregistrării holografice:

1. Rețele de difracție refractive (RDR), datorate modificării indicelui de refracție Δn ;
2. Rețele de difracție de suprafață (RDS), care rezultă din modificarea grosimii Δd ;
3. Rețele de difracție de amplitudine (RDA), provocate de modificările coeficientului de absorbție $\Delta \alpha$.

Eficiența difracției (ED) a rețelilor holografice este principalul parametru care determină calitatea rețelilor, parametru important pentru aplicațiile practice. Din moment ce ED a rețelilor de fază este definită atât de modificarea indicelui de refracție, cât și de modificarea grosimii, este foarte important să se determine cu precizie aportul ambelor tipuri de modificări.

A fost estimată contribuția separată în eficiența de difracție a topografiei suprafeței și a hărții indicelui de refracție a rețelilor înregistrate. Prin intermediul MHD a fost efectuată diagnosticarea imagistică cantitativă a fazei pentru calculul parametrilor rețelilor de difracție. Alegerea metodei de reconstrucție este determinată de condițiile de înregistrare a hologramelor. Pentru scopurile noastre a fost utilizată tehnica iterativă Sparse Phase and Amplitude Reconstruction (SPAR), dezvoltată recent pentru reconstrucția fronturilor de undă cu suprimarea eficientă a zgomotului.

Acest algoritm nou se bazează pe modelarea amplitudinii și fazei obiectului ca funcții ale coordonatelor (x, y) . Ipoteza de sparsitate presupune că există funcții (atomi) astfel încât atât faza, cât și amplitudinea să poată fi bine aproximată de serii de numere mici ale acestor funcții. Conceptual, sparsitatea este o consecință a auto-asemănării imaginilor, ceea ce înseamnă că este destul de posibil să găsim în ele multe patch-uri similare în locații diferite. Pentru modelarea fazei și amplitudinii, în SPAR este implementată tehnica non-local block-matching.

Algoritmul SPAR combină două idei diferite: soluția locală de pătrat minim pentru zgomotul Gaussian în observații și modelarea insuficientă a fazei și amplitudinii. Algoritmul SPAR derivă din formularea variațională a reconstrucției de fază/amplitudine și astfel oferă estimări optime de fază/amplitudine pentru observația cu zgomot.

A fost demonstrată aplicabilitatea MHD combinată cu algoritmul de reconstrucție SPAR la studiul rețelelor de difracție de fază. Algoritmul variațional dezvoltat este capabil să reproducă imagini de fază de înaltă calitate din date MHD cu mult zgomot. A fost posibilă determinarea tipului de rețea înregistrată, pe NMS din As_2S_3 -Se au fost obținute rețele de relief de suprafață, determinate în principal din amplitudinea modulației suprafeței de circa 90 nm. În filmele subțiri din As_2S_3 au fost obținute rețele de refracție, determinate în mare parte din modularea indicelui de refracție. Compararea hărților topografice recuperate de MHD și SPAR cu măsurători la microscopul de forță atomică (AFM) arată o bună potrivire, atât calitativă, cât și cantitativă.

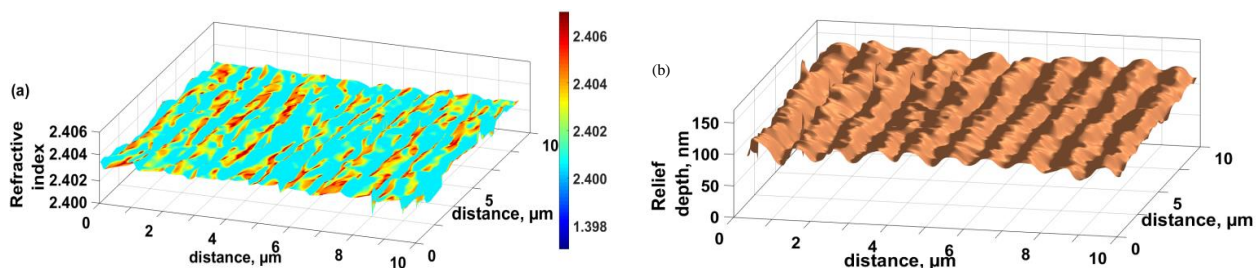


Fig. 1. Indicelui de refracție (a) și topografică (b) a rețea formată pe NMS din As_2S_3 -Se și obținută prin MHD cu SPAR.

Într-o singură achiziție, DHM poate înregistra o zonă de milimetri pătrați cu o adâncime a câmpului de milimetri (aceste dimensiuni depind, în general, de obiectivul microscopului și de parametrii acestuia), în timp ce suprafața maximă de scanare a AFM este în intervale micrometrice. În plus, MHD permite vizualizarea în timp real a imaginilor și chiar dacă adăugăm timpul de reconstrucție a hologramei, tot procesul va fi mai rapid decât scanarea AFM.

A fost elaborată o configurare optică pentru tehnica ESPI (electron speckle pattern interferometry) cu fibră optică și dezvoltat un program în baza codului LabVIEW. ESPI se bazează pe corelația dintre două imagini speckle. Fiecare dintre ele este creată de interferența dintre un fascicul de referință și imaginea unui obiect iluminat laser. De obicei, prima imagine este creată într-un anumit moment, iar a doua după perturbația obiectului (deplasări în plan sau în afara planului).

Activitatea constă din două obiective principale: proiectarea optică a sistemului ESPI cu fibră optică și elaborarea unui program LabVIEW satisfăcător pentru măsurarea indicelui de refracție al probelor subțiri. Procesul de măsurare prin intermediul instalației ESPI consta din achiziția a două capturi a imaginii speckle a obiectului în starea inițială și după aplicarea sarcinii, timpul încărcării poate fi variat. Capturile instantanee vor fi înregistrate utilizând sensorul de imagine. Din prelucrarea ulterioară a imaginilor speckle cu ajutorul programului LabVIEW, pot fi extrase harta de fază și, în final, putem calcula parametrii optici necesari.

Capitolul 3 este dedicat metodelor de înregistrare și modelare a structurilor de difracție. Înregistrările holografice sunt de o importanță deosebită pentru realizarea funcțiilor optice numerice, cum ar fi dispozitivele de memorie optică, sistemele optice integrate și dispozitive optice cu funcționalitate ridicată.

Pentru explicarea dependențelor ED au fost exploatate atât metode holografice vectoriale, cât și scalare. Studiul ED în dependență de doza de expunere a demonstrat o creștere semnificativă a eficienței de difracției a NMS SC-Se în comparație cu nanostraturile componente de SC.

Sticlele calcogenice și fotopolimerii sunt cunoscute ca materiale în care se manifestă mai multe fenomene fotoinduse nu numai scalare (fotoîntunecare, fotorefracția, fotodoparea), dar și vectoriale (anizotropia fotoindusă, girotropia fotoindusă, fotodispersia luminii), legate de transformări structurale fotoinduse, crearea de defecte și difuzia atomilor. Din punct de vedere general, efectele de bază ce apar la iradierea acestor materiale sunt similare cu bine cunoscutele transformări induse la iradiere: la etapa inițială are loc excitarea electronilor și golurilor, urmată de transformarea structurii materialului, provocând schimbări fizice și/sau chimice, inclusiv optice (întunecare și anizotropie optică), mecanică (înmuiere), efecte geometrice (expansiune sau contracție), etc. Pentru a genera structuri de difracție în materialele din SC și fotopolimeri au fost antrenate tehnicile holografiei de intensitate și a celei în lumină polarizată. Au fost analizate proprietățile scalare și vectoriale de înregistrare directă, one-step, pentru trei tipuri de filme nanomultistrat: As_2S_3 -Se, $As_{37}S_{58}Ge_5$ -Se și $As_2S_3Mn_{2\%}$.

Muchia de absorbție a filmelor NMS SC-Se este aproape de muchia de absorbție a multistraturilor din Se, obținute în același proces de depunere, astfel Se domină în transmisia filmelor NMS SC-Se. Indicele de refracție calculat crește odată cu descreșterea perioadei de modulație, iar creșterea lui este cauzată de polarizabilitatea mai mare a mediului. Cu toate acestea, parametrul de dispersie E_d nu urmează modificările indicelui de refracție și are valoare maximală pentru $D = 20$ nm. Comportamentul parametrului energiei oscilatorului E_0 este la fel, deși lărgimea benzii optice E_g , care, conform modelului $E_g \approx 2E_0$, menține o valoare constantă. Din compararea dependențelor eficienței de difracție η a rețelei vs. doza de iradiere pentru diferite perioade de modulare, putem concluziona că pentru NMS cu $D = 25$ nm obținem proprietăți optime de înregistrare, adică maximul atât a mărimii, cât și a ratei eficienței de difracție. Pe straturi de Se pur nu pot fi înregistrate rețele de difracție datorită absorbției puternice a materialului (toată energia este absorbită într-un strat foarte subțire mai mic de 10 nm) la lungimea de undă de înregistrare $\lambda_{rec} = 532$ nm. Pentru această lungime de undă coeficientul de absorbție al Se $\alpha > 10^5$ cm^{-1} , ce corespunde regiunii de absorbție puternică. Este important de menționat, că proprietățile de înregistrare în filmele multistrat și monostrat din SC de aceeași compoziție și grosime sunt diferite.

A fost comparat procesul de formare a rețelelor de relief pe suprafețele filmelor NMS SC-Se și filmelor multistrat din materialele constituente pentru diferite stări ale polarizării fasciculului de înregistrare. A fost demonstrat, că rețelele înregistrate cu un fascicul polarizat circular (+45°: -45°) în filmele NMS SC-Se au o eficiență de difracție mai mare decât cele înregistrate pe filmele nanomultistrat din SC fără Se. În acest caz a fost obținută o creștere dublă a eficienței de difracție pentru filme NMS cu As_2S_3 . Dependența eficienței de difracție η vs. doza iradierii pentru NMS SC-Se nu atinge nivelul de saturație până la doze de 1000 J/cm^2 , iar valoarea $\eta = 25\%$ pentru 800 J/cm^2 nu este o valoare maximală. Un

comportamen contrar a fost observat pentru multistraturile de SC, de exemplu pentru As_2S_3 , unde dependența η de doza de iradiere are un maxim de 12% pentru $40 J/cm^2$.

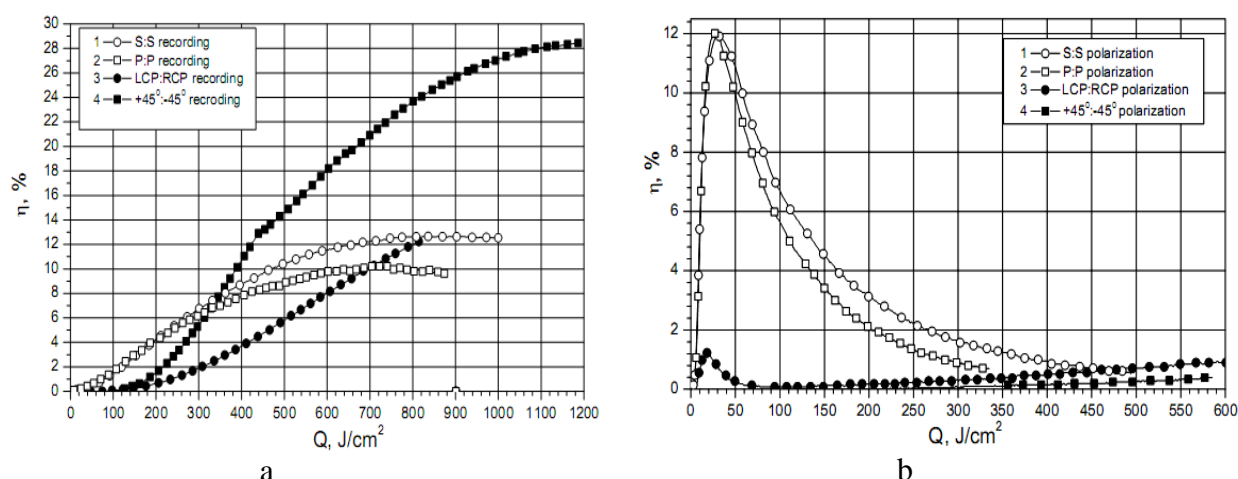


Fig. 2. Cinetica înregistrării rețea holografică (perioadă de rețea 1 μm) pe filmele NMS As_2S_3 -Se (a) și As_2S_3 (b) pentru polarizări diferite ale fasciculului de lumină.

În filmele NMS $As_2S_3Mn_{2\%}$ -Se a fost demonstrată posibilitatea unei formări directe, one-step, a unui relief magnetic la suprafață. Studiul holografiei de intensitate în sistemele realizate din PEPC sau CAM : copolimeri OMA cu iodoform a arătat aplicabilitatea lor pentru înregistrarea rețelelor holografice cu o eficiență de difracție $\eta \approx 20\%$ și o rezoluție de $2000 mm^{-1}$, rezoluție realizabilă numai după un tratament chimic. Interacțiunea radiației laser și fasciculului de electroni cu fotopolimerii carbazolici duce la formarea între carbazol și iodoform a unor complecși de transfer de sarcină, provocând apariția unei noi benzi de absorbție la lungimea de undă 0, 65 μm . Introducerea unui plastifcator minimizează fracturarea filmelor subțiri și creează condițiile pentru înregistrarea rețelelor de difracție. Obținerea rețelelor de difracție de relief în acest caz poate fi realizată numai prin developare prin corodare chimică, iar relieful are un profil nesinusoidal.

Înregistrarea holografică vectorială în filmele poli(PEPC-co-DO) la diferite configurații de polarizare a arătat că polarizarea P:P a fasciculelor de înregistrare asigură un maximum al eficienței de difracție de circa 33%. Investigarea rețelelor obținute a arătat, că această valoare este cauzată de modularea reliefului de suprafață în timpul înregistrării holografice. Coincidența bună a valorilor experimentale și teoretice ale ED în funcție de adâncimea profilului suprafeței poate servi ca dovadă că principala contribuție la mărirea eficienței de difracție este adusă de rețeaua de relief de suprafață. Abordarea menționată mai sus este valabilă numai pentru înregistrarea holografică în lumină polarizată.

Este bine cunoscut faptul că fabricarea EOD cu un profil nesinusoidal îmbunătățește semnificativ eficiența și permite controlul unghiurilor de difracție pentru o eficiență maximală. Înregistrarea HD bazată pe modulatori spațiale de lumină (MSL) sau cu fascicul de electroni asistat de calculator, permite înscrierea diferitor tipuri de structuri de difracție. Ca urmare a îmbunătățirii platformei reconfigurabile a calculatorului pentru rezolvarea diferitor sarcini dificile de control și monitorizare și avansarea tehnicilor

de micro/nano-fabricare din ultimii ani, au fost studiate așa tipuri de EOD, cum ar fi structuri pentru optica binară și rețele de difracție generate de calculator.

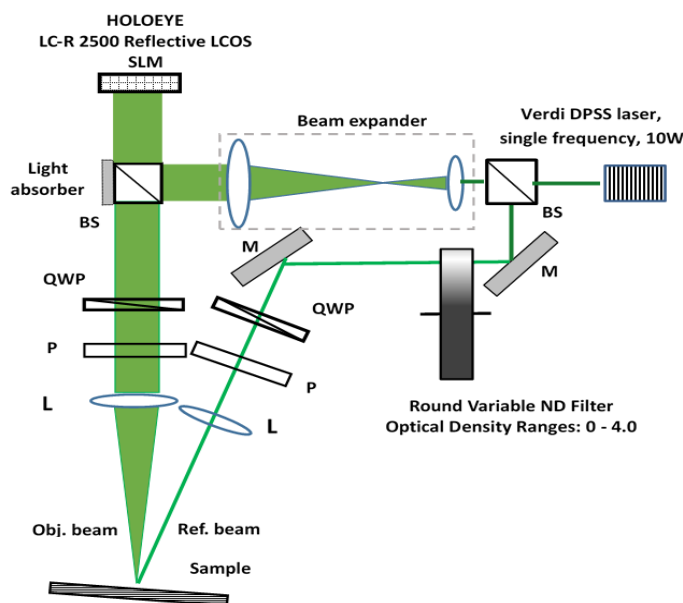


Fig. 3. Schemă interferometrului cu MSL pentru înregistrarea EOD.

Interesul crescând asupra micro- și nanostructurilor cu profiluri 3D în trepte sau netede a impulsionat studiarea posibilității înregistrării computerizate a rețelelor de difracție directe, one-step, cu ajutorul fasciculului de electroni, prezentate în acest capitol. Rezultatele experimentelor confirmă faptul că filmele NMS din sticle calcogenice și AP reprezintă materiale promițătoare pentru utilizarea ca medii de înaltă rezoluție la înscrierea cu fascicule de electroni, iar hologramele digitale pot fi fabricate într-un proces direct, într-o singură etapă (one-step). Cu ajutorul unui microscop electronic cu baleaj, asistat de calculator, s-a realizat înregistrarea cu fasciculul de electroni a unor structuri de difracție și microimagini, concepute digital, în filme subțiri NMS și As_2S_3 . Pentru înregistrarea hologramelor digitale cu fasciculul de electroni a fost elaborat un program special, numit HoloMake, de utilizare a microscopului electronic cu baleaj. Structurile de relief de suprafață au fost fabricate prin înregistrarea cu fascicul de electroni și în structurile nanomultistrat $Ge_5As_{37}S_{58}-Se$.

În **Capitolul 4** sunt analizate metodele de investigare a structurilor de difracție utilizate în lucrare. Metodele optice non-contact sunt instrumente implicite pentru controlul calității produselor în practica de laborator și în industrie. Testele nedistructive optice (TNO) au o sensibilitate sporită și permit o analiză completă a obiectului inspectat, fără contact fizic cu suprafața lui.

A fost studiată cinetica eficienței de difracție a rețelelor de relief de suprafață înregistrate one-step în filme NMS As_2S_3-Se în lumină polarizată în dependență de perioada rețelei. Rezultatele obținute au fost comparate cu cinetica eficienței de difracție la înregistrarea holografică de amplitudine. A fost observată o dependență puternică a eficienței de difracție la formarea rețelelor de relief de suprafață de perioada rețelei și grosimea probei. S-a constatat că cea mai mare eficiență posibilă a înregistrării holografice de relief

one-step poate fi realizată utilizând polarizarea circulară stânga-dreapta și $\pm 45^\circ$ ($\sim 45\%$). Aceste combinații de polarizări ies în evidență din calculele teoretice ale figurii de interferență. Contrastul luminos al interferogramelor este aproape nul, iar gradientul de intensitate a câmpului electric joacă rolul principal pentru modelarea directă a reliefului suprafeței. Estimarea parametrului Klein Q pentru NMS $\text{As}_2\text{S}_3\text{-Se}$ a arătat că rețelele holografice cu perioada Λ mai mare de $1,4 \mu\text{m}$ pot fi considerate ca rețele subțiri cu difracție Raman-Nath.

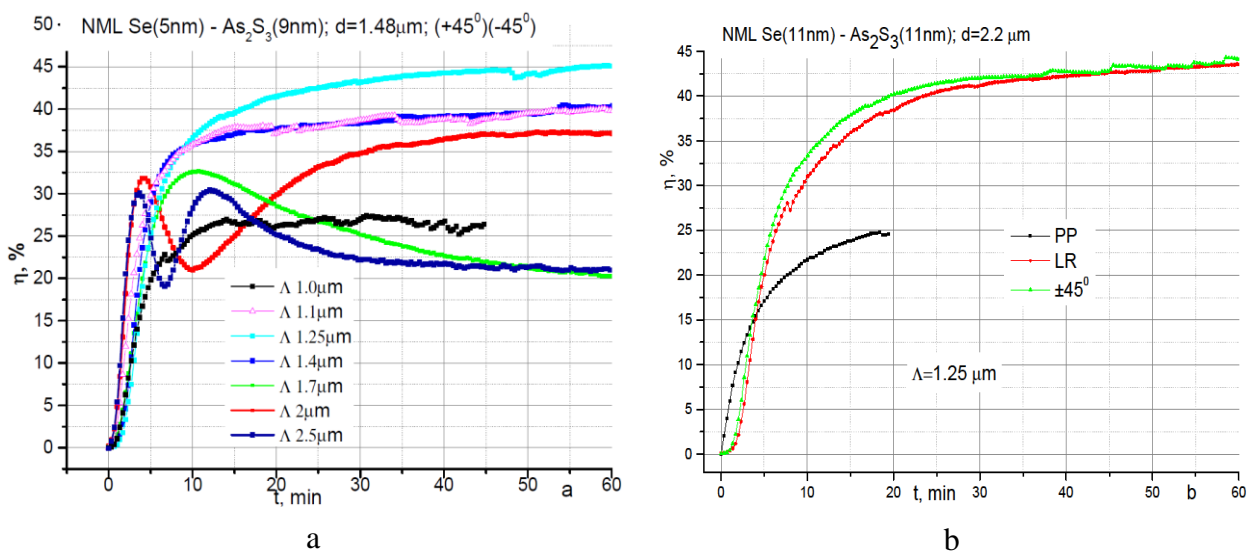


Fig. 4. Cinetica eficienței de difracție în prima ordine de difracție pentru diferite perioade de rețele (a) și stările de polarizare (b).

Comportamentul transferului de masă poate fi corelat cu interacțiunea dintre anizotropia fotoindusă în nanostraturi cu polarizabilitatea sporită sau scăzută a moleculelor și deriva lor sub acțiunea gradientului de intensitate a câmpului electric.

Interferometria holografică digitală (IHD) oferă avantaje distincte față de tehnicile de măsurare a punctelor, cum ar fi velocimetria laser și vibrometria interferometrică, și oferă din aceste tehnici date indisponibile. O zonă determinată de aplicare a IHD se referă la examinarea nedistructivă a obiectelor tehnice pentru depistarea anomaliilor structurale localizate, de exemplu examinarea pneurilor auto și avia pentru defecte ascunse.

În ciuda multor trăsături pozitive ale interferometriei holografice, există și unele dezavantaje, care limitează răspândirea acestei tehnici. Principalele dintre ele sunt:

- Echipamentele optice complicate pentru obținerea unei interferograme holografice de înaltă calitate.
- Evaluarea calității hologramei individuale se realizează în principal vizual.
- Necesitatea dezvoltării umede a purtătorilor holografici.

Asemănările dintre interferometria holografică digitală și interferometria holografică clasică constau în faptul, că rezultatul ambelor tehnici reprezintă o figură din frange, care reprezintă o schimbare de fază dintre unda obiect și cea de referință. Principalul avantaj al IHD în comparație cu interferometria

holografică este faptul că permite afișarea în mod direct pe un monitor de calculator a fringelor de corelare în timp real, fără nici o formă de prelucrare fotografică sau de transfer de plăci. Această ușurință comparativă de operare poate fi extinsă pentru rezolvarea unor probleme mai complexe, de exemplu în domeniul analizei deformării. De asemenea, IHD permite măsurarea separată a deplasării în diferite planuri. Mai mult, IHD nu necesită medii de înregistrare de înaltă rezoluție și impune condiții mai puțin stricte pentru izolarea vibrațiilor și pentru fondul luminos ambiental. Lucrarea prezintă vizează dezvoltarea unui IHD ușor de operat, automatizat, full-field, portabil și la costuri reduse pentru vizualizarea și monitorizarea stărilor diferitelor tipuri de probe supuse testării.

După studierea mai multor variante de configurații IHD, s-a decis separarea componentelor de iluminare și de monitorizare și utilizarea cablurilor cu fibră optică pentru ghidarea fasciculelor laser. Conform obiectivelor propuse, instalația IHD a fost divizată în două unități separate pentru iluminare și monitorizare, legătura făcându-se prin cabluri optice, schema construită fiind flexibilă în diferite condiții. IHD este o tehnică interferometrică care combină metoda holografică de înregistrare a imaginilor cu procesarea digitală a imaginii achiziționate. Ca mijloc de calcul a fost ales programul LabVIEW™ (National Instruments).

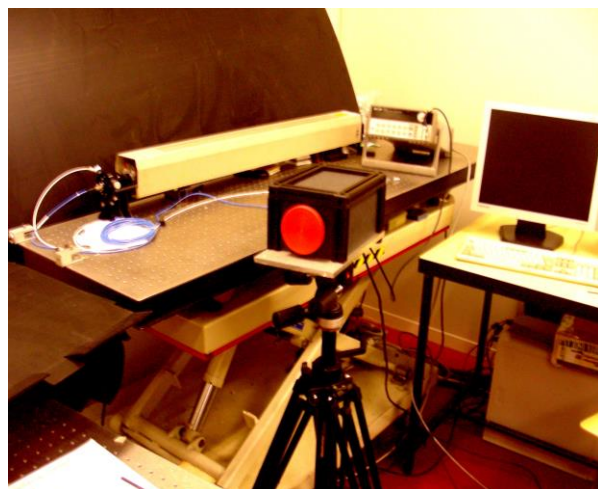
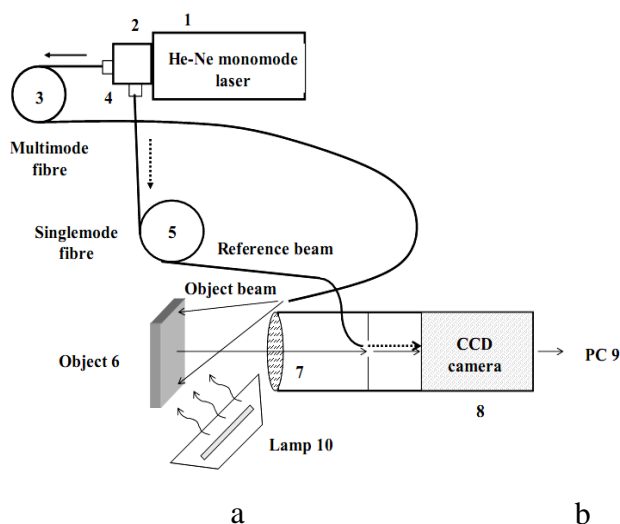


Fig. 5. Schema optică (a) și fotografia (b) a configurației IHD: 1 - laser monomod He-Ne Siemens LGK 7626; 2 - splitter de rază de intensitate variabilă; 3 - fibră optică multimodală; 4 - doi conectori cu fibră optică; 5 - menținerea polarizării mono-mode "Bow-Tie" fibră (mod dia 5 μm); 6 - obiect cu defecte interne probabile; 7 - obiectiv; 8 - CCD; 9 - PC; 10 - lampă pentru încălzire.

Pentru designerii optici este disponibilă o varietate largă de descrieri posibile a calității imaginii și reprezentărilor. Calitatea unui sistem optic trebuie să fie întotdeauna adecvată și descrisă de criteriile care sunt apropiate aplicației și tipului de sistem. În consecință, nu există o metrică de calitate universală pentru toate sistemele.

Performanța optică a sistemului IHD elaborat a fost estimată pe baza codului ZEMAX. Este important să se determine parametrii cheie atât pentru configurația în general, cât și pentru fiecare componentă optică: obiectiv, diafragmă, fibră, cameră de achiziție, etc.

Parametrul cel mai important al unei configurații IHD este rezoluția. Pentru acest parametru sunt responsabile două componente ale sistemului IHD: obiectivul și procesorul camerei de achiziție a datelor. O rezoluție a obiectivului aproape de dimensiunea pixelului camerei de înregistrare este deosebit de indicată pentru designul optic al instalației.

Conform teoriei de eșantionare, este posibilă restaurarea perfectă a imaginii atunci când imaginea primită nu are o componentă de frecvență spațială mai mare ca frecvența Nyquist, care constituie jumătate din inversul perioadei de eșantionare sau a dimensiunii pixelilor. Atunci când imaginea de intrare are componente de frecvență mai mari decât frecvența Nyquist, distorsiunea imaginii care rezultă este inevitabilă.

La caracterizarea rezoluției unui sistem de imagini este extrem de util să se facă referire la noțiunea de Modulation Transfer Function (MTF). O modalitate ușoară de a interpreta rezultatele MTF este imaginarea unei ținte cu linii alb-negre (contrast 100%). Datorită limitei de difracție, nici un obiectiv (chiar teoretic perfect, cu orice rezoluție) nu poate transfera pe deplin acest contrast al imaginii. MTF-ul unui obiectiv reprezintă măsurarea capacității sale de a transfera contrastul la un anumit nivel de rezoluție de la obiect la imagine. S-au prezentat și analizat modelul geometric al obiectivului telecentric, al diafragmei rectangulare, MTF, al frontului de undă și al grilei de raze principale.

Combinarea microscopiei optice și a holografiei digitale oferă un avantaj unic de a capta simultan informații complete 3D despre obiect. Utilizarea luminii coerente a făcut posibilă achiziționarea continuă a informației despre probă cu ajutorul calculatorului și investigarea diferitor obiecte, inclusiv de natură tehnică și biologică. Spre deosebire de microscopia convențională, nu sunt necesare scanări la diferite adâncimi pentru obținerea imaginii 3D. Astfel, este posibilă depășirea principalei limitări a microscopului confocal de a studia procesele care decurg temporal mai lent decât timpul de achiziție, care este de ordinul unei secunde.

În această lucrare se utilizează un MHD cu tehnica sparse iterativă de suprimare a zgomotului pentru reconstrucția 3D a imaginii holografice de pe o rețea de suprafață înregistrată pe un film NMS As_2S_3 -Se. În cadrul experimentului au fost înregistrate holograme de pe părțile neexpuse ale probei NML și de pe rețele de suprafață, utilizate ca holograme de referință. Scăderea fazelor a două reconstrucții permite construirea hărții de fază $\Delta\varphi(x, y)$ și dacă sunt cunoscute lungimea de undă λ și indicele de refracție n , harta de fază poate fi transformată în hartă topografică. Contrar metodei transformării Fourier, abordarea variațională permite folosirea întregii puteri a hologramei (în domeniul Fourier înseamnă utilizarea tuturor ordinilor hologramei). Acesta este principalul avantaj al abordării variaționale care ar putea garanta o precizie și o rezoluție mai bună a imaginilor.

A fost demonstrat, că configurația off-axis de înaltă rezoluție a MHD poate fi aplicată pentru investigarea la scară nanometrică a rețelelor de difracție de suprafață. Noul algoritm variațional SPAR dezvoltat pentru holografia digitală off-axis este capabil să reproducă imagini de înaltă calitate pentru date cu zgomot destul de puternic. Rezultatele reconstrucției au demonstrat o eficiență mai bună în comparație cu transformarea standard Fourier.

Pentru obiecte cu mărimea de ordinul a sute de nanometri, a fost dezvoltată o altă configurație de MHD pe baza interferometriei holografice digitale, modificând partea de iluminare și imagistică. Este bine cunoscut faptul, că, atunci când o suprafață optică brută este iluminată cu lumină coerentă, imaginea înregistrată de detector reprezintă o imagine speckle a suprafeței, care se formează datorită diferenței de fază la reflexia luminii de la diferite puncte de pe suprafață. Rata și uniformitatea măririi sistemului sunt determinate de obiectivul camerei, iar valorile lor sunt suficiente pentru aplicarea microscopiei. Este necesar să se potrivească sistemul optic al DHM cu dimensiunile obiectului.

Un sistem optic entocentric este în mare măsură nepotrivit sarcinilor de măsurare și inspecție a microobiectelor, deoarece introduce mai mulți factori nefavorabili, care reduc acuratețea măsurătorii și repetabilitatea: 1) o variație a măririi duce la comă; 2) distorsionarea imaginii datorită aberației optice pentru părțile obiectului departe de axa optică; 3) erorile de perspectivă; 4) rezoluția slabă. Schema de iluminare dark-field folosită utilizează un microscop epi-obiectiv în brațul obiect al DHI, ceea ce scade drastic dezavantajele schemei de iluminare white-field.

Din moment ce eficiența de difracție a rețelelor este definită de trei parametri, cum ar fi modificarea indicelui de refracție (fotorefracția), modificarea transmisiei (fotoîntunecarea) și schimbarea reliefului (fotoexpansia), a fost necesară investigarea contribuției fiecărui parametru la formarea rețelei de difracție. În acest scop sunt potrivite tehnicile optice, utilizate pe scară largă la caracterizarea filmelor subțiri și aplicații datorită naturii nedistructive inerente și preciziei ridicate.

Printre tehnicile optice, elipsometria este unul dintre cele mai puternice instrumente. Aceasta permite determinarea independentă simultană a grosimii filmului și a indicelui de refracție cu o precizie ridicată. Odată cu tendința modernă de miniaturizare a dispozitivelor electronice, aplicarea elipsometriei în această zonă este împiedicată de mărimea mare a spotului de iluminare și de procesul lent de scanare a elipsometriei convenționale. Astfel, elipsometria imagistică cu rezolvare spațială poate fi utilizată pentru evaluarea morfologiilor bidimensionale ale suprafeței. Aceasta combină rezoluția verticală înaltă submicronică a elipsometriei convenționale cu rezoluția laterală micrometrică a microscopiei optice.

A fost utilizată elipsometria imagistică pentru studierea rețelelor de difracție înregistrate în filmele subțiri de As_2S_3 . Au fost perfectate diagnostici cantitative pentru efectul de fotoîntunecare și rețele fotoinduse de fază formate la înregistrarea holografică în filme subțiri de As_2S_3 . Rezultatele experimentale au arătat, că mărimea amplitudinii de modulație a indicelui de refracție este clar definită de procesul de expunere la lumină. S-a demonstrat, că elipsometria imagistică, utilizată în cazul dat pentru

caracterizarea filmelor subțiri de As_2S_3 , poate măsura în același timp grosimea, absorbția și indicele de refracție al filmelor subțiri. Măsurarea grosimii a indicat o sensibilitate de 5 Å și o rezoluție spațială de aproximativ 1 μm. Pentru această rezoluție spațială a fost obținută în măsurătorile indicelui de refracție o sensibilitate de 0,002. Pentru rețelele de difracție înregistrate în filmele subțiri de As_2S_3 s-a determinat o modificare maximală a indicelui de refracție de $0,035 \pm 0,0002$. Amplitudinea variației realizabile a indicelui de refracție depinde de parametrii expunerii. La o anumită expunere, schimbarea fotoindusă a indicelui de refracție ajunge la saturație, cu o scădere ulterioară. De asemenea, s-a demonstrat că profilul indicelui de refracție variază odată cu expunerea de la sinusoidală ($H = 29 \text{ J/cm}^2$) la aproape cicloidală ($H = 42 \text{ J/cm}^2$) și la cicloidală ($H = 55 \text{ J/cm}^2$).

Măsurătorile AFM au arătat, că înregistrarea rețelelor de difracție în NMS de As_2S_3 -Se asigură o calitate optică ridicată a reliefului obținut cu o amplitudine a modulației suprafeței rețelei de circa 113 nm la o grosime totală a filmului NMS de As_2S_3 -Se de 2500 nm și o perioadă de repetiție a straturilor 25 nm. În plus, în procesul de înregistrare, raportul vizual semnal/zgomot mare în primul maxim de difracție dovedește proprietăți optice ridicate ale acestor rețele.

În **Capitolul 5** sunt demonstrate exemple de aplicare practică a opticii difractive. O gamă de aplicații se referă la utilizarea hologramelor digitale ca elemente de securizare.

Holograme generate de calculator, înregistrate cu ajutorul fasciculului de electroni într-un microscop electronic cu baleaj asistat de calculator, înregistrate în filme NMS de SC-Se, sunt folosite ca semne de protecție. Designul EOD a fost elaborat pe baza studiilor sistematice a capacității NMS din SC și filmelor subțiri din AP de a fi structurate fie prin metoda de înscriere laser, fie prin expunerea la radiații electronice. Modelarea matematică și analiza numerică, elaborate în cadrul teoriei difracției luminii, au fost aplicate ca descriere teoretică a procesului de înregistrare a informațiilor în mediile dezvoltate și pentru proiectarea EOD. Au fost studiate potențialul și limitările diferitelor structuri multistrat din SC și filme din AP și metodele aplicate pentru structurarea lor. Aceste cercetări vor deschide perspective de optimizare și/sau dezvoltare pentru o gamă largă de aplicații ca elemente de contrafacere.

A fost utilizată tehnica HD pentru înregistrarea hologramelor ca semne de protecție a articolelor din metale prețioase. Înscrierea hologramelor generate de calculator a fost realizată prin utilizarea ablației laser selective ($\lambda = 1.064 \text{ μm}$) a probelor de metale prețioase. Au fost evaluate caracteristicile de difracție și reconstrucția HGC fabricate. Hologramele de reflexie pot fi fabricate într-un singur proces fără aplicarea măștilor și procedurilor de pre- sau post-tratare. Imaginea holografică concepută este transferată pe o mască utilizând litografia standard cu fascicul de electroni sau litografia cu fascicul laser. Majoritatea proceselor necesită un mediu controlat și timp. Înainte de a înregistra HGC, s-a determinat diametrele și calitatea spoturilor ablativ pe proba de metal pentru a obține modele bine definite de HGC. Fasciculul laser a fost focalizat pe suprafața metalului cu un obiectiv telecentric (10x vizibil NA 0.30) într-un spot cu diametrul de 10 μm. Ulterior, s-a stabilit regimul de lucru al laserului: puterea, frecvența de repetiție și

durata impulsurilor, frecvența structurii de difracție. Hologramele digitale dezvoltate au fost aplicate de Camera de Stat pentru Supravegherea Mărcii a Republicii Moldova pentru perfecționarea nivelului de protecție a articolelor din metale prețioase.

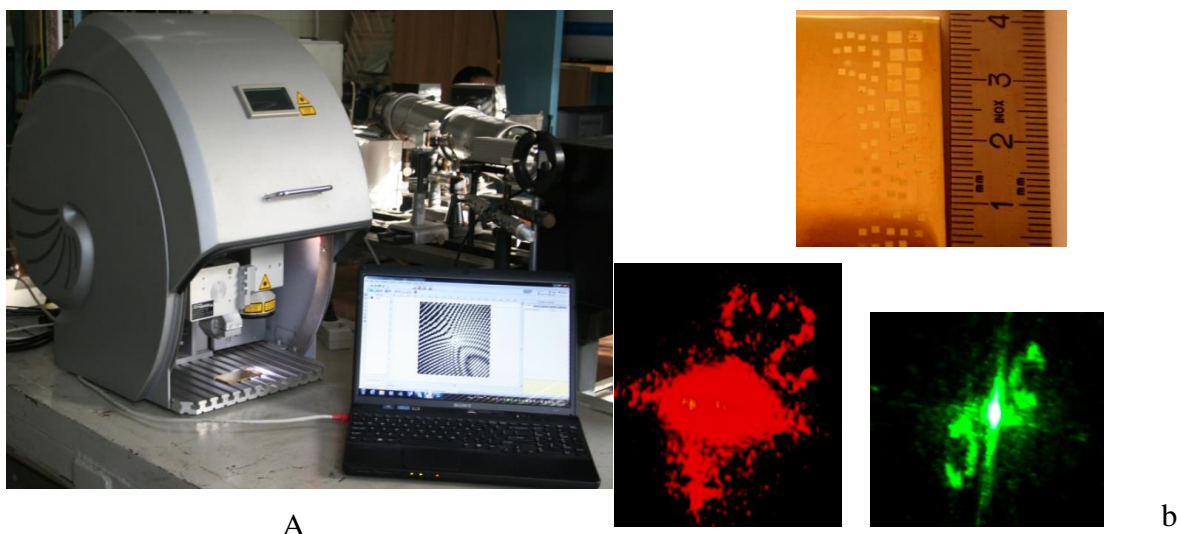


Fig. 6. Dispozitivul pentru marcarea cvasi-hologramei (a) și modelele de difracție ale hologramelor reconstruite (b).

Aplicarea practică a EOD înregistrată în filmele subțiri AP ca concentrator de celule solare a fost demonstrată în Proiectul FP7 "ener2i INNOVATION VOUCHER COMPETITION". Am identificat folosirea unui concentrator Fresnel, realizat ieftin din folie de polimer transparent. Tehnologia holografică este foarte apropiată de concentratorul subțire din polimer Fresnel pentru creșterea eficienței capturilor luminoase ale celulelor fotovoltaice (PVC). Eficiența foliilor din PVC este limitată de nivelul prezent al tehnologiei semiconductorilor. Dar eficiența energetică a PVC-ului poate crește prin concentrarea luminii solare. Majorarea eficienței captării luminii solare cu concentratorul solar poate conduce la creșterea eficienței energetice și reducerea costurilor de PVC, deoarece pentru aceeași putere este necesar de o suprafață mai mică și o cantitate mai mică de material semiconductor PVC scump.

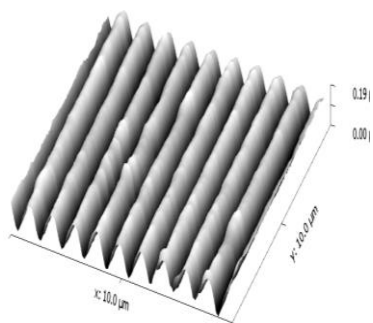


Fig. 7. Suprafața vizuală tridimensională a parte din lentile Fresnel în AP.

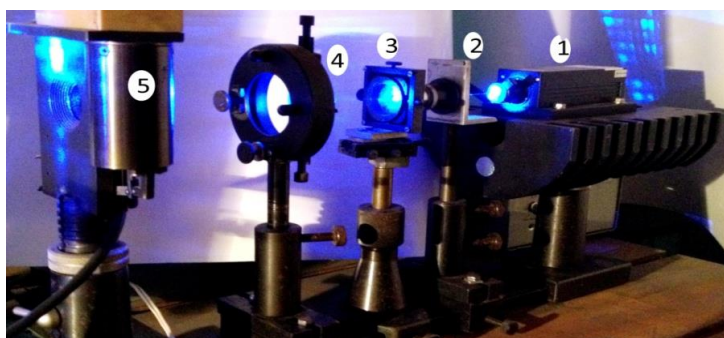


Fig. 8. Schema optică pentru formarea lentilelor Fresnel: 1 - laser; 2, 3, 4 - lentile; 5 - film de polimer fotosensibil pentru formarea lentilelor Fresnel.

Reducerea suprafeței PVC implică o reducere considerabilă a costurilor în comparație cu PVC convențional. Pe de altă parte, concentratorul poate capta lumina soarelui difuză într-o zi tulbură când

PVC produce mai puțină energie și astfel eficiența energetică va fi mai mare. Designul optic special al concentratorului Fresnel permite captarea omnidirecțională a luminii solare. Prin urmare, eliminarea necesității urmăririi soarelui cauzează creșterea eficienței energetice a panoului din PVC în producția totală de energie. În rezultat, am proiectat optica concentratorului Fresnel și obținut filmuri din polimer.

Cu ajutorul fasciculului de electroni s-au înregistrat imagini din pixeli cu emblema de stat a Republicii Moldova și Ucrainei pe filme NMS $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}\text{-Se}$. Dimensiunile imaginii au fost de 512×512 pixeli (dimensiunea unui pixel $\sim 2 \mu\text{m}$). Este necesar de notat, că pentru anumite condiții de înregistrare, înălțimea pixelilor este de până la 200-300 nm. Structura filmelor NMS din SC-Se poate fi considerată din punct de vedere al aplicării practice un compozit omogen, ale cărui proprietăți optice pot fi ajustate prin varierea grosimii straturilor de SC și Se.

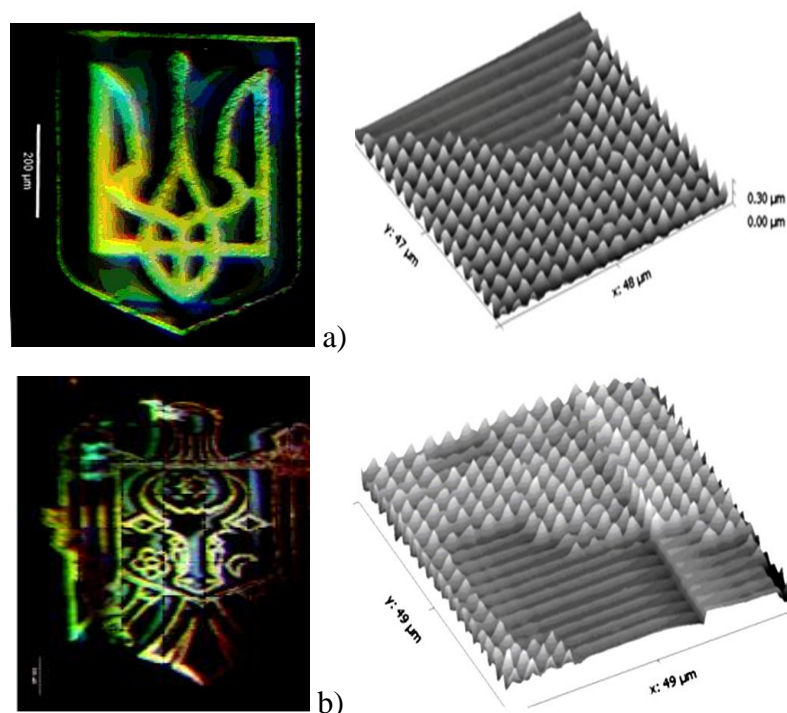


Fig. 9. Rezultatele imprimării cu fascicul electronic ale Emblemelor de Stat a Ucrainei (1) și a Republicii Moldova (2) cu folosind nanostructuri multistrat $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}\text{-Se}$. În imaginea din dreapta sunt prezentate fragmente de imagini ale emblemelor obținute cu Microscopia Atomică de Forță..

IHD portabil dezvoltat a fost aplicat pentru vizualizarea și monitorizarea lucrărilor de artă din lemn, deteriorările interne ascunse - poziția, forma și dimensiunile lor - prin excitarea căldurii ca fiind cel mai potrivit mod de excitare pentru lemn. În experimentele noastre probele de lemn au fost încălzite cu lampă Halogen Rod R7S cu reflector HLF-500W, astfel încât a fost efectuată excitarea termică a probelor de lemn. La un mic puls de căldură al lămpii (2-4 s) aplicat suprafeței eșantionului de testare, suprafața lemnului modifică după temperatură. Aceste modificări depind de proprietățile diferite ale materialelor termice (paralele și perpendiculare pe proba de lemn) și defectele din sub suprafață, cum ar fi deteriorarea lemnului prin atacuri de insecte sau detașările sub stratul furniruit pot fi dezvăluite. Prin urmare, analizând

modificarea hărții de fază, detectăm defectele existente sub suprafață și evaluăm poziția, mărimea și forma lor.

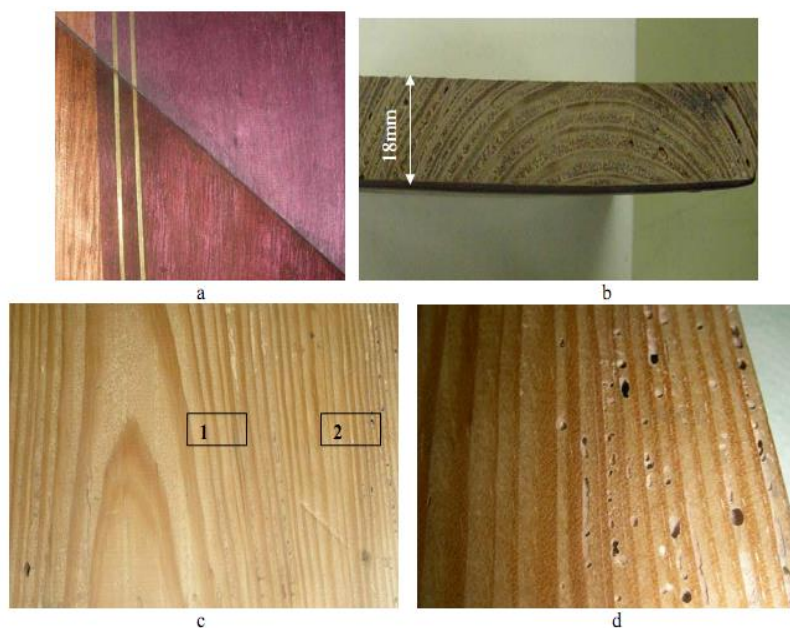


Fig. 10. Latimea eșantionului deteriorat (a); secțiunea transversală a probei (b); partea din spate la o mărire diferită (c — 1^x , d — 5^x).

Metoda de măsurare se bazează pe observarea vizuală și instrumentală a marginilor termice deformată în afara planului pe suprafața zonei inspectate (obiectivul ales pentru câmpul vizual este de $20 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$); temperatura suprafeței inspectate este mărită pe o perioadă mai scurtă prin modul menționat mai sus. Încălzirea induce micro-deplasări ale suprafeței, citite de capul IHD (modele de margini în interferograme) și evidențiază prezența unor defecte sub suprafață care sunt invizibile pentru inspecția vizuală.

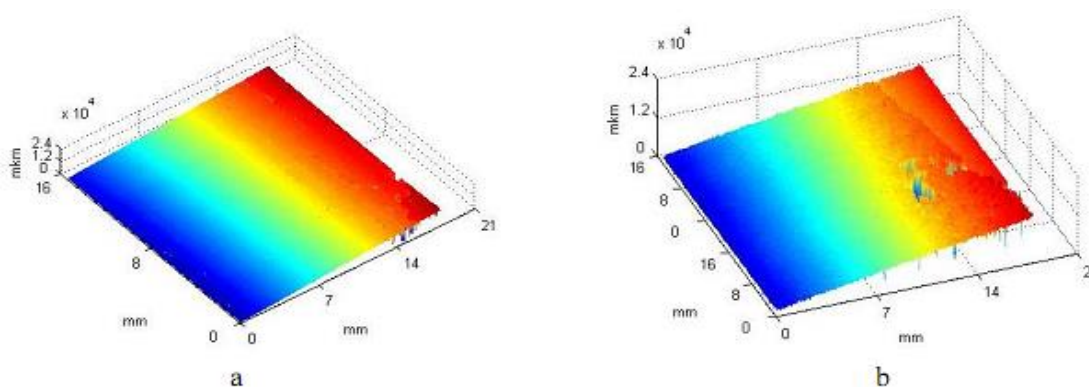


Fig. 11. Pseudo 3D de fază dezvelite a eșantionului ne-deteriorat (a); eșantion deteriorat (b).

Rezultatele noastre indică faptul că varianta dezvoltată IHD este bine adaptată pentru a descoperi daunele sub suprafață din probele de lemn fumiruit. Setarea poate fi utilizată în condiții de laborator și fără preocupări severe împotriva vibrațiilor. Astfel, am dezvoltat configurația prietenoasă, low cost, completă și portabilă IHD. Aplicând setarea IHD am determinat prezența diferitelor tipuri de daune situate sub suprafață și invizibile cu ochiul liber: sub galerii de delaminare a suprafeței și sub suprafață.

IGD-ul dezvoltat este capabil să prezică poziția, forma și mărimea daunelor descoperite. Rezultatele prezentate arată că tehnica IHD este un instrument promițător pentru testarea operelor de artă din lemn.

Principalele concluzii și recomandări

Optica difractivă are atribuție atât la obiecte de larg consum (diverse dispozitive de iluminare și comunicare), cât și la instrumentariul de cercetare și dezvoltarea ulterioară ale aplicațiilor optice. Din acest punct de vedere, lucrarea urmărește un scop dublu – reactualizarea instrumentelor optice, microscopelor și interferometrelor pentru obținerea de imagini 3D, precum și elaborarea de noi componente optice difractive cu ajutorul cărora aceste instrumente/dispozitive pot fi îmbunătățite.

Designul optim al componentelor și sistemelor optice moderne întotdeauna reprezintă un hibrid de componente analogice (optice) și digitale ale sistemului cu funcții alese în mod corespunzător. Tehnologiile optoelectronice și informatice emergente - creșterea vitezei de procesare și a capacității de memorare, soft-uri sofisticate, camere video CCD în loc de filme holografice, modulatori optice spațiale - au fost utilizate în lucrare pentru investigarea noilor oportunități pentru aplicații holografice avansate.

Pentru rezolvarea problemelor de formare și tratare a fasciculelor de lumină cu o anumită structură spațială și procesare optică a informației în timp real, este necesar de a avea medii fiabile cu sensibilitate foto- și de polarizare înaltă, cu viteze mari de înregistrare și citire a informației.

Principala semnificație a lucrării constă în faptul, că combinarea tehnicilor de procesare optică și digitală a imaginilor demonstrează abilitatea progresării tehnologiilor optice moderne.

Principalele rezultate ale cercetării:

➤ A fost dezvoltată și studiată tehnologia computerizată de depunere succesivă în vid a structurilor nanomultistrat SC-Se. A fost efectuată investigația comparativă a caracteristicilor optice și de înregistrare a structurilor nanomultistrat și a nanostraturilor constitutive, care vizează extinderea domeniului aplicațiilor EOD.

➤ A fost dezvoltată sinteza chimică a polimerilor carbazolici dopați cu Disperse Orange (azopolimeri, AP), obținute prin metoda spin-coating filme subțiri din acești polimeri și determinate proprietățile de înregistrare induse prin tehnici holografice scalare și vectoriale.

➤ A fost determinat experimental, că în filme NMS din SC-Se și filme subțiri din AP rețelele de relief de suprafață pot fi formate prin metode optice și digitale de înregistrare holografică directă (one-step), condiționate de răspunsul vectorial, rezultat al anisotropiei spațiale a mediului.

➤ Variațiile complexe ale parametrilor optici ai NMS din SC-Se și filmelor subțiri din AP au loc ca răspuns la acțiuni atât a componentelor scalare, cât și a celor vectoriale ale câmpului electric de lumină.

➤ Rețelele de relief de suprafață înregistrate pe NMS din SC-Se sunt guvernate de structurarea fotoindusă în nanostraturile de SC și Se, care duce la transferul de masă în material.

➤ Rețelele de relief de suprafață înregistrate pe filmele subțiri din AP sunt guvernate de transformarea *trans-cis-trans* fotoindusă în AP, care duce la transferul de masă în acest mediu.

➤ Pe filme NMS din SC-Se și filme subțiri din AP, prin metoda directă cu utilizarea tehnicii holografiei de polarizare, au fost obținute holograme de relief de suprafață de calitate optică înaltă. Metoda directă de înregistrare presupune excluderea etapei corodării chimice a suprafeței, care este cea mai nedorită etapă tehnologică în procesul de fabricare a hologramelor de relief.

➤ Utilizând tehnica holografiei de polarizare, au fost elaborate și înregistrate rețele de difracție de fază pe filmuri NMS din SC-Se și filme subțiri de AP cu eficiență de difracție de până la 48% în primul ordin de difracție. Au fost studiate potențialul și limitele lor de utilizare în aplicațiile practice.

➤ A fost demonstrată aplicabilitatea practică a nanomultistraturilor din SC-Se și filmelor subțiri de AP în calitate de componente optice difractive: măști de fază pentru prelucrarea optică în MHD, elementele de securitate digitale cu un grad sporit de protecție și semne holografice de protecție pentru protejarea diferitelor tipuri de produse împotriva contrafacerii.

Recomandări pentru cercetări ulterioare bazate pe concluziile lucrării:

1. Dezvoltarea tehnologiei computerizate de depunere a NMS din SC-Se și efectuarea de experimente tehnologice ce vor permite alegerea din varietatea de compoziții de SC a celor potrivite spectrului de iluminare laser.

2. Elaborarea de metode de calcul a hologramelor digitale și a proceselor de ablație laser selectivă a suprafeței metalice pentru fabricarea de holograme-master pentru ștanțare pe folii de plastic.

3. Studiarea eficienței de difracție - atributul principal de performanță - a rețelelor de relief de suprafață înregistrate în diferite condiții (doza iluminării, starea de polarizare, perioada rețelei) va extinde gama de aplicații practice ale EOD înregistrate pe filme NMS din SC-Se și filme subțiri de AP.

4. Efectuarea studiului anizotropiei fotoinductate în NMS ca fenomene prospective pentru descoperirea de noi proprietăți ale SC și AP.

5. Dezvoltarea tehnologiilor de interferometrie/microscopie holografică digitală va permite extinderea aplicării practice a testelor optice nedistructive avansate în domeniul microelectronicii, biomedicinii, patrimoniului cultural și tehnologiilor de securitate.

6. Implementarea tehnologiilor digitale moderne (modulatoare spațiale de lumină, videocamere CCD, retardere variabile pe cristale lichide) și software (HD, ZEMAX, LabVIEW, EOD) ale tehnologiilor optice în procesele de cercetare și educație este o necesitate pentru menținerea nivelului actual al acestor domenii.

Referințe

1. Gabor D. A new microscopic principle, Nature, 1948, v.161, p.777-778.
2. Leith E. N. and Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory, J. Opt. Soc. Amer., 1962, v. 52, p. 1123-1130.
3. Denisyuk Y. N. Photographic reconstruction of the optical properties of an object in its own scattered radiation field, Sov. Phys. Doklady, 1962, v. 7, no.6, p. 543-545.

4. Benton S.A. Hologram reconstruction with extended light sources. *J. Opt. Soc. Am.*, 1969, 59, 1545-1551.
5. Brown B. R. and Lohmann A. W. Complex Spatial Filtering with Binary Masks, *Appl. Opt.*, 1966, v. 5, no. 6, p. 967-969.
6. Wu M. C. Micromachining for optical and optoelectronic systems, *Proc. of the IEEE*85, 1997, p. 1833-1856.
7. Veldkamp W. and McHugh T. J. Binary Optics, *Scientific American*: New York, 1992, 253 p.
8. Goodman J.W. *Introduction to Fourier Optics*. 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Inc, 1996. p. 81–83.
9. Weber A.G., Schell M., Fischbeck G., and Bimberg D. Generation of single femtosecond pulses by hybrid model locking of a semiconductor laser. *IEEE J. Quantum Electron*, 1992, vol. 28, p. 2200–2207.
10. Smith H.I. A proposal for maskless, zone-plate-array nanolithography. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1996, vol. B14, p. 4318–4322.
11. Kashyap R. *Fiber Bragg grating*. London: Academic Press, 1999, 478 p.
12. Kakicheshvili Sh.D. *Polyarizatsionnaya golografiya*. Nauka. 1989, 143 p.
13. Nikolova L. and Ramanujam P.S. *Polarization holography*. New York: Cambridge University Press, 2009, 266 p.
14. Tanaka K. Chalcogenide Glasses. In: *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Sec. Edition, Buschow K.H.J. et al., Editors-in-Chief. Amsterdam: Elsevier, 2001, p. 1123–1131.
15. Takats V., Kokenyesi S. Surface patterning on amorphous chalcogenide nanomultilayers. *Optical Materials*, 2010, vol. 32, p. 677–679.
16. Dikova J., Vlaeva I., Babeva Tz., Yovcheva T., Sainov S. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, vol. 50, 838–843.
17. Saito I., Masuzawa T., Kudo Y., Pittner S., Yamada T., Koh A.T.T., Chua D.H.C., Mori Y., Zahn D.R.T., Amaratunga G.A.J., Okano K. *J. Non-Crystall. Solids*, 2013, vol. 378, p. 96–100.
18. Hoegl H. On photoelectric effects in polymers and their sensitization by dopants. *Journal of Physical Chemistry*, 1965, vol. 69, no. 3, p. 755–766.
19. Li Y., Gu P. Free-form surface inspection techniques state of the art review. *Comput. Aided D*, 2004, vol. 36, p. 1395–1417.
20. Bivol V., Andresh A. New photoresists from carbazol-containing photopolymers. *Proceedings of SPIE “Applications of Photonic Technology”*, 2000, vol. 4087, p. 754–759.
21. Grazulevicius J.V. Photophysics of carbazole-containing systems. 3 Fluorescence of carbazole-containing oligoethers in dilute solution. *Macromolecules*, 1998, vol. 31, no. 15, p. 4820–4827.

Lista lucrărilor științifice

Articole de sinteză:

1. Стронский А.В., **Акимова Е. А.** Использование методов модификации и создания нанокмозитов для получения новых функциональных материалов на основе халькогенидных стекол и полимеров, Свиридовские чтения: Сб. ст., 2015, вып. 11, Минск, с. 144-151.
2. **Achimova E.** Direct Surface Relief Formation in Nanomultilayers Based on Chalcogenide Glasses: A Review, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2016, v. 52, no. 5, p. 456–468.
3. Stronski A., **Achimova E.**, Paiuk O., Meshalkin A., Lytvyn P., Senchenko O., Prisakar A., Triduh G., Abashkin V., Oleksenko P. Nanomultilayer structures on the base of chalcogenide glasses: properties and application in optical elements fabrication, *Collection of scientific papers «Fullerenes and nanostructures in condensed matter» Minsk-2016 Institute of thermal & mass transfer NAS Belarus*, 2016, p. 412-418.

Articole în reviste de circulație internațională:

4. Andriesh A.M., **Akimova E.A.**, Buzdugan A.I., Iovu M.S., Simashkevich A.A., Verlan V.I. Injection sensibilization of photoeffect in two-layer glassy semiconductor heterostructures, *J. Non-Crystalline Solids*, 1987, v. 90, p. 339–342.
5. Андриеш А.М., **Акимова Е.А.**, Берил С.И., Верлан В.И. Инжекция и перенос дырок в гетероструктуре Se / As₂Se₃, *Физика и техника полупроводников*, 1987, т. 22, № 2, стр. 289-292.
6. Andriesh A.M., **Akimova E.A.**, Bivol V.V., Khancevskaya E. G., Iovu M.S., Malcov S.A., Verlan V.I. Metal-Semiconductor Amorphous Thin Film-Metal Structures: Properties and Applications, *International Journal of Electronics*, 1994, v.77, no.3, p.339-342.
7. Andriesh A.M., **Akimova E.A.**, Simashkevich A.A., Shutov S.D., Verlan V.I. Holography Recording in Thin Films Heterostructures Metal–In₂S₃ / As₂Se₃-Al, *Letters in Journal of Technical Physics (Russia, Moscow)*, 1992, v.18, no.17, p.11-13.
8. Abashkin V., **Achimova E.** Acoustic-Optical Sensors with Laser Amplification for Medical Diagnostics, *Romanian Journal of Optoelectronics*, 1999, v.7, no. 3, p. 25-27.
9. Andrieș A., **Achimova E.**, Bivol V., Meșalchin A., Prisacari A., Sergheev S., Triduh Gh. Laser and electron induced structuring of thin films on the base of carbazolyl-containing polymers and polymer-ChGS compositions, *J. of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2005, v.7, no.3, p. 1169-1178.
10. Andrieș A., **Achimova E.**, Bivol V., Meșalchin A., Prisacari A., Triduh Gh. Diffraction optical structures on the basis of chalcogenide glasses and polymers, *J. of Optoelectronics and Adv. Materials*, 2007, v. 9, no. 10, p. 3007– 3012.

11. Castellini P., Abaskin V., **Achimova E.** Portable electronic speckle interferometry device for the defect measurements in wood artworks, *Journal of Cultural Heritage*, 2008, v. IX, no 3, p.225-233.
12. Andries A., Abaskin V., **Achimova E.**, Meshalkin A., Prisacar A., Sergheev S., Robu S., Vlad L. Application of carbazole-containing polymer materials as recording media, *Physica Status Solidi (a)*, 2011, v. 208(8), p. 1837-1840.
13. Кравец Л.И., Лизунов Н.Е., Мешалкин А.Ю., Робу С.В., Андриеш А.М., **АКИМОВА Е.А.** Структура и электрохимические свойства полимерных композитных мембран с селективным слоем, *ЭЛЕКТРОХИМИЯ*, 2011, том 47, № 4, с. 489–498.
14. Meshalkin A., Andriesh I., Abashkin V., Prisacar A., Triduh G., **Achimova E.**, Enachi M. Digital interferogram processing in nanometer thickness measurement by micro-interferometer МИИ-4, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2012, v. 48, no 6, p.114-118.
15. Meshalkin A., Abashkin V., Prisacar A., Triduh G., Andries I., Bets L., **Achimova E.** High precision interferometric analysis of sub-micrometers spin-coated polymer films, *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 2012, v. 3(9), p. 62-69.
16. Röling C., Thiesen P., Meshalkin A., **Achimova E.**, Abashkin V., Prisacar A., Triduh G. Imaging ellipsometry mapping of photo-induced refractive index in As_2S_3 films, *J. Non-Crystall. Solids*, 2013, v. 365, p.93–98.
17. Freik D. M., **Achimova E. A.**, Kryskov Ts. A., Liuba T. S., Meshalkin A. Yu., Optasyuk S. V., Rachkovsky O. M., Tsykanyuk B. I. The influence of impurities of Sb on transmission spectra of PbTe thin films in the infrared wavelength range. *J. Physics and Chemistry of Solid State*, 2013, v.14, no 3, p.5-8.
18. **Achimova E. A.**, Stronski A. V., Paiuk A. P., Meshalkin A. Yu., Boiarinov Yu. Yu., Prisacar A. M., Robu S. V., Oleksenko P. F., Lytvyn O. S. Recording of holographic diffraction gratings on carbazole-containing polymer thin films, *Optoelectronics and Semiconductor Technique*, 2014, v.49, p. 31-35.
19. Stronski A., **Achimova E.**, Paiuk A., Abaskin V., Meshalkin A., Prisacar A., Triduh G., Lytvyn O. Surface relief formation in $Ge_5As_{37}S_{58}$ -Se nanomultilayers, *J. Non-Crystalline Solids*, 2015, v. 409, p. 43–48.
20. **Achimova E.**, Stronski A., Abaskin V., Meshalkin A., Paiuk A., Prisacar A., Oleksenko P., Triduh G. Direct surface relief formation on As_2S_3 -Se nanomultilayers in dependence on polarization states of recording beams, *Optical Materials*, 2015, v. 47, p. 566–572.
21. Паюк О., Мешалкин А., Стронский А., **АКИМОВА Е.**, Сергеев С., Абашкин В., Литвин О., Олексенко П., Присакар А., Тридих Г., Сенченко Е. Электронно-лучевая и

голографическая запись поверхностно-рельефных структур с использованием многослойных наноструктур $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}\text{-Se}$ как регистрирующих сред, *Optoelectronics and Semiconductor Technique*, 2015, v. 3, p. 33-35.

22. Stronski A., **Achimova E.**, Paiuk O., Meshalkin A., Abashkin V., Lytvyn O., Sergeev S., Prisacar A., Triduh G. Holographic and e-beam image recording in $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}\text{-Se}$ nanomultilayer structures, *Nanoscale Research Letters*, 2016, vol. 11(39), p. 1-7.
23. Stronski A., **Achimova E.**, Paiuk O., Meshalkin A., Abashkin V., Lytvyn O., Sergeev S., Prisacar A., Oleksenko P., Triduh G. Optical and Electron-Beam Recording of Surface Relief's Using $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}\text{-Se}$ Nanomultilayers as Registering Media, *Journal of Nano Research*, 2016, v. 39, p. 96-104.
24. Meshalkin A., Robu S., **Achimova E.**, Prisacar A., Shepel D., Abaskin V., Triduh G., Direct photoinduced surface relief formation in carbazole-based azopolymer using polarization holographic recording, *J. Optoelectronics and Adv. Materials*, 2016, v. 18, no. 9-10, p. 3007– 3012.
25. Abaskin V., **Achimova E.**, Meshalkin A., Prisacar A., Triduh G., Vlcek M., Loghina L., Voynarovich I. Investigation of Structural Features of $\text{As}_2\text{S}_3\text{-Se}$ Multilayer Nanostructure by Raman Spectroscopy, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2016, v. 52, no. 4, p. 380–386.
26. **Achimova E.**, Stronski A. Functional structures based on chalcogenide glasses obtained via nanocomposite techniques and their applications, *Open Access House of Science and Technology (OAHOST)*, 2017, v. 3, no. 28, p. 2-24.
27. Stronski A., **Achimova E.**, Paiuk O., Meshalkin A., Prisacar A., Triduh G., Oleksenko P. and Lytvyn P. Direct Magnetic Relief Recording Using $\text{As}_{40}\text{S}_{60}\text{: Mn-Se}$ Nanocomposite Multilayer Structures, *Nanoscale Research Letters*, 2017, v. 12, p. 286-293.
28. **Achimova E.**, Abaskin V., Claus D., Pedrini G., Shevkunov I., Katkovnik V. Noise minimised high resolution digital holographic microscopy applied to surface topography, *J. Computer Optics*, 2018, v. 42(2), p. 267-272.
29. Cazac V., Meshalkin A., Abashkin V., **Achimova A.**, Katkovnik V., Shevkunov I., Claus D., and Pedrini G. Surface relief and refractive index gratings patterned in chalcogenide glasses and studied by off-axis digital holography, *Applied Optics*, 2018, v. 57, is. 3, p. 507-513.
30. **Achimova E.** Polarization holography for direct surface grating patterning on chalcogenide nanomultilayers, *Journal of Physics: Conf. Series 1096*, **2019**, 012133.

Articole în culegeri internaționale:

31. Bivol V.V., Vlad L. A., **Achimova E.A.**, Robu S.V., Triduh G.M. Prisacari A.M. Composition Effect on the Kinetic and Spectral Characteristics of Photobleaching in

- Photochromatic Polymer films, Proc. Supplement. Balkan Physics Letter, 1997, vol.5, p. 401-405.
32. Andries A.M., Bivol V.V., **Achimova E.A.**, Triduh G.M., Prisacari A.M. Holographic Recording in Light-Sensitive Field Control Structures on Chalcogenide Vitreous Semiconductor Basis, Optical Memory and Neural Networks, 1995, v.4, no.1, p.69-74.
 33. Andries A.M., Bivol V.V., **Achimova E.A.**, Triduh G.M., Prisacari A.M. Fresnel Zone Plates on Chalcogenide Glass without Chromatically Aberrations, Physics and Applications of Non-Crystalline Semiconductors in Optoelectronics. NATO ASI Series, Kluwer Academic Publishers, 3. High Technology, 1997, v.36, p. 309-311.
 34. Bivol V.V., Barba N.A., Robu S.V., Vlad L.A., Prisacari A.M., Triduh G.M., **Achimova E.A.** New Compositions Based on Photosensitive Copolymers for Information Processing and Storage. Molecular Crystals and Liquid Crystals. Science and Technology, Gordon and Breach Science Publishers USA, 2000, v. 353, p. 373 – 386.
- Materiale ale comunicărilor științifice:
35. Bivol V.V., Barba N.A., Robu S.V., Vlad L.A., Ishimov V.M., Prisacari A.M., Triduh G.M., **Achimova E.A.** Properties of polymer compositions for recording and copying optical images, Proc. of SPIE, 1998, v. 3405, p. 790-795.
 36. Bivol V.V., Barba N.A., Robu S.V., Vlad L.A., **Achimova E.A.**, Prisacari A.M., Triduh G.M. Photostructure Transformation Effects of Layer Consisting from CAMC: OMA Copolymer under the Action of Laser Irradiation, Proc. of SPIE, 2001, v.4423, p.49-54.
 37. Abaskin V., **Achimova E.** The Two Types of Stethoscope Systems for Respiration System Diagnostic of Human Body, In Proc. “Laser Florence 2002, A Window on the Laser Medicine World”, 2002, Florence, Italy, Edit. Leonardo Longo, Proc. SPIE, 2003, v. 5287, p.175-178.
 38. Abaskin V., **Achimova E.** Non-destructive testing of wood defected samples by ESPI, In Proc. 7th International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications, SPIE 5504–2006, p. 322-329, Ancona, Italy.
 39. Andrieș A., **Achimova E.**, Bivol V., Meșalchin A., Prisacari A., Triduh Gh. Electro- and Photostimulated Chemical Processes in Aluminum - Chalcogenide Glass Semiconductor Thin Layer Structures, In Proc International Semiconductor Conference (CAS'96), Sinaia, Romania, IEEE, pp.309-311, 1996.
 40. Andrieș A., **Achimova E.**, Bivol V., Meșalchin A., Prisacari A., Triduh Gh. Investigations of transmission spectra of the new photopolymer compositions, In Proc. Sixth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications, 2004, Ancona, Italy, SPIE Vol.5503, pp. 522-528.

41. Abaskin V., **Achimova E.** Rating of electronic speckle pattern interferometer by optical software, In Proc. 8th Int. Conf. on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advanced and Applications, 2008, Ancona, Italy, SPIE V.70980, p. 2 - 8.
42. Abaskin V., **Achimova E.** Application of optical program for design of holographic speckle-interferometer, In Proc. Sixth International Conference “Holography. Science and Practice”, 2009, p. 165-169, Kiev, Ukraine.
43. Abaskin V., **Achimova E.** Power laser application for security glass production, Proc. Int. Conference Micro- to Nano-Photonics, Romopto-2009, 2009, Sibiu, Romania.
44. Abaskin V., **Achimova E.**, Mitioglu A. Modeling Self-mixing Interferometer with Optical Soft, In Proc. 9th Int. Conference on Vibration Measurements by Laser and Non-contact Techniques & Short Course, Ancona, Italy, 22-25 June 2010, in AIP Conf. Proc. 2010, v. 1253, p. 321-325.
45. Abaskin V., **Achimova E.** Using the Optical Code for Phase Analyses of the Fiber-Optic ESPI Set-Up, In Proc. AIP –Int. Conf. on Advanced Phase Measurement Methods in Optics and Imaging, Locarno, Switzerland, 17-21 May 2010, pp 320-325.
46. Meshalkin A., Andries A., **Achimova E.**, Bets L., Andries I., Drahnea S. Interferometric method application for sub-micrometers thickness measurements of spin-coated PEPC and PETPC polymer films, In Proc. International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering with related German-Moldovan Workshop on Novel Nanomaterials for Electronic, Photonic and Biomedical Applications, July 7-8, 2011, Chisinau, Republic of Moldova, p.194-196.
47. Abaskin V., **Achimova E.** Design of the holographic fiber-optic electronic speckle pattern interferometer for measurements of glass optical constants, In Proc. Int. Conf. on Nanotechnologies and Biomedical Engineering”. ICNBME-2011, 7-8th of July 2011, Chisinau, Moldova.
48. Kryskov Ts., Lyuba T., Kravchenko V., Abashkin V., **Achimova E.**, Meshalkin A., Prisacar A., Triduh G. Photoinduced refractive index and thickness changes in As₂S₃ thin film, In Proc. VII Int. Conf.” Electronics and Applied Physics”, Oct.19-22 2011, Ukraine, Kyiv p.120-121.
49. Abaskin V., **Achimova E.** Using the optical code for simulation of the fiber-optic ESPI set-up design, Present. At the 8th EOS Topical Meeting on Diffractive Optics (DO 2012), Delft, Netherlands, February 2012.
50. Abaskin V., **Achimova E.**, Sergeev S., Prisacar A. Computer- assisted electron beam recording of patterns in As₂S₃ films, In Proc 2nd Int. Conf. of Nanotechnologies and Biomedical Engineering. Chisinau, April 18-20, 2013, p.89-92.

51. Abaskin V., **Achimova E.**, Kryskov Ts., Meshalkin A., Prisacar A., Triduh G., Vlcek M. Investigation of Optical Properties of As_2S_3 -Se Multilayers, Proc. 2nd Int. Conf. of Nanotechnologies and Biomedical Engineering. Chisinau, April 18-20 2013, p. 254-257.
52. Meshalkin A., Robu S., Prisacar A., Betz L., Triduh G., **Achimova E.** Synthesis, Thin film Deposition and Optical Characterization of Epithiopropylcarazole Polymer, Proc 2nd Int. Conf. of Nanotechnologies and Biomedical Engineering. Chisinau, April 18-20 2013, p. 249-253.
53. Duca M., Pedrini G., Claus D., Abaskin V., **Achimova E.**, Glijin A., Acciu A. 3D studies of orobanche cumana seeds by digital holographic microscopy, Proc VIII Int. Conf. "Microelectronics and Computer Science", 2014, Chisinau, p.426-429.
54. Meshalkin A., Robu S., **Achimova E.**, Boiarinov Yu., Prisacar A., Sepel D., Abaskin V., Triduh G. Properties of Carbazole-Based Azopolymer Used in Formation of Photoinduced Surface Relief Gratings, In IFBME Proc. 3rd Int. Conf. on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, V. Sontea, I. Tiginyanu (Eds.) Vol. 55, pp. 76-80, © Springer Science+Business Media Singapore 2016.
55. Paiuk A., Meshalkin A., Triduh G., Prisacar A., **Achimova E.**, Stronski A., Abaskin V., Litvin O., Senchenko O., Gubanova A. Nanomultilayer As_2S_3 :Mn-Se Systems: Properties and Use as the Recording Media, In IFBME Proc. 3rd Int. Conf. on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, V. Sontea, I. Tiginyanu (Eds.) Vol. 55, pp. 72-75, © Springer Science+Business Media Singapore 2016.
56. **Achimova E.** Development of Digital Holographic Microscope for 3D Sensing of Biological Surface Morphology, In IFBME Proc. 3rd Int. Conf. on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, V. Sontea, I. Tiginyanu (Eds.) Vol. 55, pp.398-403, © Springer Science+Business Media Singapore 2016.
57. Paiuk O., Stronski A., Senchenko O., Meshalkin A., **Achimova E.**, Abashkin V., Triduh G., Prisacar A. The dispersion energies Wemple-Didomenico in nanomultilayers based on As_2S_3 -Se and $Ge_5As_{37}S_{58}$ -Se chalcogenide glasses, Proc. of the 5th International Conference "Telecommunications, Electronics and Informatics" (ICTEI-2015), May 20-23, 2015, Chisinau, Moldova, p. 92-93.
58. **Achimova E.**, Abaskin V., Meshalkin A., Prisacar A., Triduh G. Phase grating patterning by direct laser recording on As_2S_3 -Se nanomultilayers, În: ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И НАНОТЕХНОЛОГИИ. Сборник трудов, Самара, 2017. ИТНТ-2017. III международная конференция и молодежная школа, Самара, 25-27 апреля 2017 г, Россия, с. 11—13.

59. Losmanschii C., Meshalkin A., **Achimova E.**, Abashkin V., Prisacar A., Kazak V., Pogrebnoi S., Macaev F. Influence of thickness and polarization on diffraction efficiency of direct patterned diffraction gratings in carbazole-based azopolymer films, In Proc. The 9th International Conference “Microelectronics and Computer Science” & The 6th Conference of Physicists of Moldova. October 19-21, 2017, Chisinau, Republic of Moldova, p. 84—87.
 60. **Achimova E.** The self-mixing interferometer setup modeled by optical soft, In Proc. The 9th International Conference “Microelectronics and Computer Science” & The 6th Conference of Physicists of Moldova. October 19-21, 2017, Chisinau, Republic of Moldova, p. 96—99.
 61. Meshalkin A., Kazak V., Shevkunov I., **Achimova E.**, Abashkin V., Katkovnik V. Phase Grating Application for Digital Holographic Imaging, In Proc. The 9th International Conference “Microelectronics and Computer Science” & The 6th Conference of Physicists of Moldova. October 19-21, 2017, Chisinau, Republic of Moldova, p. 302—305.
 62. Abashkin V., **Achimova E.**, Slepnev I. Application of optical/digital correlator based on spatial light modulator for identification and incoming inspection of security elements, In Proc 9-th Open German-Russian Workshop on Pattern Recognition and Image Understanding, 1-5 December, 2014, Koblenz, Germany, 87-89.
 63. Meshalkin A., Robu S., Prisacar A., Boiarinov Yu., **Achimova E.**, Kryskov Ts., Optasyuk S. Polarization dependent optical recording of surface relief gratings on azopolymer films, In Proc the XVth International Young Scientists’ Conference, June 10-13, 2015, Kyiv, Ukraine, p.34-35.
 64. Kryskov Ts., Lyuba T., Optasyuk S., Rachkovsky O., Tsykanyuk B., **Achimova E.**, Boiarinov Yu., Meshalkin A. The influence of technological condition on thermoelectrical parameters of lead telluride, In Proc the XVth International Young Scientists’ Conference on Applied Physics, June 10-13, 2015, Kyiv, Ukraine, p.84-85
- Brevete obținute:
65. Андриеш А.М., **Акимова Е.А.**, Верлан В.И. Устройство для записи голографического изображения. Авт. Св-во (СССР), No.11-64650.
 66. Андриеш А.М., **Акимова Е.А.**, Малков С.А., Верлан В.И. Термопластический носитель для записи информации. Авт. св-во (СССР), No.97-0167.
 67. Андриеш А.М., **Акимова Е.А.**, Бивол В.В., Присакаръ А.М., Тридух Г.М. Оптический носитель для регистрации оптической информации высокого разрешения. Авт. Св-во (СССР), No.21-1429.
 68. Andrieș A.M., **Achimova E.A.**, Vlad L.A., Robu S.V., Prisacar A.M., Meșalchin A.I., Triduh G.M. Purtător de informație fotostructurabil. Brevet de invenție MD Nr. 352, Y 2011.

69. ABASKIN V.; **ACHIMOVA E.** Method for measuring residual stresses in sheet glass and device for its realization. MD Nr. 443 Y 2011.
Alte lucrari stiintifice:
70. **Achimova E.** Development of digital holographic microscopy in Moldova, Academos, 2017, no 4(47), p. 27-31.
71. Abaşkin V., **Achimova E.**, Andrieş A., Bivol V., Meşalchin A., Prisacari A., Triduh Gh. Fiber-optic sensor for monitoring of gases pressure into engine's combustor, Proc Int. Scientific Symposium «Modern Agriculture-Achievements and Prospects» 80th Anniversary of State Agrarian Univ. of Moldova, Chisinau, Oct. 09-11, 2013. Published in J. "LUCRĂRI ŞTIINŢIFICE", section: INGINERIE AGRARĂ ŞI TRANSPORT AUTO, vol. 38, p.193-196.
72. **Achimova E.** Thesis of candidate dissertation: "Photoinjection into Interface of Semiconductor Heterostructures Based on Thin Films of Amorphous Se and As₂Se₃", Institute of Applied Physics, Chishinau, 1989.
73. **Achimova E.** PhD Teză "Development of Electron Speckle Interferometry system for diagnostic of structural damages", Ancona University, Italy, 2006.
74. **Акимова Е. А.**, Стронский А. В., Паюк А. П., Мешалкин А. Ю., Бояринов Ю. Ю., Присакаръ А. М., Робу С. В., Олексенко П. Ф., Литвин О. С. Запись голограммных дифракционных решеток на карбазолсодержащих тонких полимерных пленках, Оптоэлектроника и полупроводниковая техника, 2014, вып. 49, с. 31-35.
75. **Акимова Е.А.**, Верлан В.И. Релаксация поверхностного потенциала в инжекционной стеклообразной гетероструктуре Se - As₂Se₃, Сб. Стеклообразные полупроводники для оптоэлектроники, 1991, с. 161-171.
76. Abaskin V., **Achimova E.** Introduction to LabVIEW for Students with exercises, 2015, Chisinau: Biotehdesign, 2015, 47 p. ISBN 978-9975-933-73-5

ADNOTARE

a tezei ”**Optica difractivă pentru holografia optică și digitală**”, Specialitatea 134.01 — *Fizica și tehnologia materialelor*, prezentată de **Elena Achimova** în vederea obținerii gradului științific de doctor habilitat în științe fizice, Institutul de Fizică Aplicată, Chișinău, 2019.

Structura tezei: Teza este scrisă în limba engleză și constă din Introducere, cinci capitole, concluzii generale și recomandări și bibliografie din 229 lucrări. Lucrarea conține 245 de pagini, inclusiv 2 anexe, 187 figuri, 12 tabele și 57 formule. Rezultatele obținute au fost publicate în 63 articole științifice.

Cuvinte cheie: optică difractivă, holografie optică și digitală, sticle calcogenice (SC), azopolimer (AP), înregistrare holografică scalară și vectorială, interferometrie și microscopie holografică digitală, procesare optică și digitală a imaginilor.

Scopul cercetării constă în cercetarea și elaborarea elementelor opticii difractive, care reprezintă o combinație funcțională de componente optice, dispozitive optico-mecanice și tehnologii, precum și algoritmi lor operaționali.

Obiectivele tezei includ elaborarea elementelor optice bazate pe structuri nanomultistrat (NMS) din SC și AP drept medii de înregistrare; elaborarea tehnologiilor holografice digitale și optice pentru crearea elementelor opticii difractive (EOD) pe medii NMS din SC și filme subțiri de AP; investigarea aplicabilității acestor metode holografice drept instrument pentru studiul proprietăților optice ale materialelor de scară nanometrică; aplicarea/folosirea EOD ca componente optice în dispozitive optoelectronice, biomedicină și securitate.

Noutatea științifică și originalitatea rezultatelor obținute: a fost stabilit experimental, că, în structurile NMS din SC-Se și filmele subțiri de AP elaborate, schimbările parametrilor optici (indicele de refracție și coeficientul de absorbție) au loc sub acțiunea atât a componentei scalare, cât și a celei vectoriale a câmpului radiației optice; rețelele reliefate superficiale obținute prin înscriere directă, se formează prin imprimarea holografică optică și digitală, care sunt cauzate de răspunsul vectorial (spațial anizotrop) al mediului; rețeaua superficială reliefată pe SC-Se NMS este guvernată de structurarea fotoindusă în nanostraturile de SC și Se, ceea ce duce la transferul de masă în SC-Se NMS; rețelele reliefate superficiale imprimate pe filmele subțiri de AP sunt formate de transformarea fotoindusă de tip *trans-cis-trans* în AP, ceea ce duce la transferul de masă în acest mediu; au fost modelate și imprimate EOD de fază pe baza NMS din SC-Se și AP, precum și studiate posibilitățile și limitele acestora din punctul de vedere al aplicațiilor practice; impactul potențial al lucrării constă în elaborarea tehnicii optice avansate pentru imprimarea/înregistrarea structurilor difracționale și investigațiile la scară nanometrică.

Problema științifică importantă soluționată constă în elaborarea aspectelor teoretice și aplicative ale proceselor în materialele amorfe induse de lumină și iradierea cu electroni, ce conduce la formarea în aceste medii sensibile a structurilor difracționale și aplicarea acestora în holografia optică și digitală.

Valoarea aplicativă a lucrării este determinate de faptul, că cercetările sistematice ale proprietăților materialelor NMS de SC-Se și AP de a fi structurate prin metodele de înscriere laser, prin iradierea cu fascicol de electroni și prin imprimarea digitală a hologramelor, deschid largi oportunități pentru elaborarea și/sau optimizarea EOD din aceste materiale în optoelectronica și fotonica modernă (aplicații în optica difracțională, medicină, tehnologiile de combatere a falsificărilor, holografia imagistică ș.a.).

Implementarea rezultatelor: rezultatele obținute au fost utilizate în îndeplinirea cu succes a 16 proiecte internaționale și naționale aplicative.

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы “Дифракционная оптика в оптической и цифровой голографии”, Специальность 134.01 — Физика и технология материалов, представленной доктором **Еленой Акимовой** на соискание учёной степени доктора habilitation физических наук, Институт Прикладной Физики, Кишинев, 2019.

Структура работы: Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и рекомендаций, библиографии, включающей 229 названий. Основной текст представлен на 245 страницах, включая 2 приложения, 187 рисунков, 12 таблиц и 57 формул. Полученные результаты были опубликованы в 63 научных статьях.

Ключевые слова: дифракционная оптика, оптическая и цифровая голография, халькогенидные стекла (ХС), азополимеры (АП), многослойные наноструктуры, скалярная и векторная голографическая запись, цифровая голографическая интерферометрия и микроскопия, оптическая и цифровая обработка изображений.

Цель исследования заключается в разработке элементов дифракционной оптики, которые представляют собой функциональную комбинацию оптических компонентов, оптико-механических устройств и технологий, и алгоритмов работы.

Задачи исследования включают разработку оптических элементов на основе многослойных наноструктур (МНС) из ХС и АП в качестве записывающих сред; разработку существующих цифровых и оптических голографических технологий для создания элементов дифракционной оптики (ДОЭ) на МНС из ХС и тонких пленок из АП; исследование применимости данных голографических методов как инструмента для исследования оптических свойств наноразмерных материалов; применение ДОЭ как оптических компонентов в оптоэлектронных устройствах, биомедицине и защитных технологиях.

Научная новизна и оригинальность результатов состоит в экспериментальном определении изменений оптических параметров (показатель преломления, коэффициент поглощения) в МНС ХС-Se и тонких пленках АП под воздействием как скалярных, так и векторных компонентов электрического поля оптического излучения; в том что рельефные поверхностные решетки, полученные прямой записью, формируются под воздействием оптических и цифровых голографических методов записи, которые обусловлены векторным (пространственно-анизотропным) откликом среды; в том что поверхностная рельефная решетка на МНС ХС-Se формируется фотоиндуцированным структурированием в нанослоях ХС и Se, что приводит к массопереносу в МНС ХС-Se; что поверхностная рельефная решетка, сформированная в тонких пленках АП, формируется фотоиндуцированным *транс-цис-транс*-преобразованием в АП, что приводит к массопереносу в этих средах; были смоделированы и записаны фазовые ДОЭ на МНС ХС-Se и на тонких пленках АП, изучены их возможности и ограничения для практического применения; оригинальность этой работы заключается в разработке оптических методов регистрации и исследований дифракционных структур на наноразмерных слоях ХС.

Важной научной задачей исследования является разработка теоретических и прикладных аспектов фото- и электронно-индуцированных процессов в аморфных материалах, приводящих к возможности регистрации в этих средах дифракционных структур, и применению данных структур в оптической и цифровой голографии.

Практическая значимость работы заключается в том, что систематические исследования способности МНС ХС-Se и АП структурироваться под воздействием методов лазерной и цифровой голографии, облучения электронным лучом открывают новые перспективы для разработки и/или оптимизации широкого спектра приложений ДОЭ из данных материалов в оптоэлектронике и фотонике (дифракционная оптика, медицина, защитные технологии, голографические методы неразрушающего контроля, изобразительная голография и т. д.).

Внедрение результатов: полученные экспериментальные результаты были практически использованы при успешной реализации 16 международных и национальных прикладных проектов.

ANNOTATION

of the thesis “**Diffraction optics for optical and digital holography**” Speciality *134.01 — Physics and technology of materials*, presented by **Elena Achimova**, to obtain the title of doctor habilitat in [the](#) Physics, Institute of Applied Physics, Chisinau, 2019.

Thesis structure: The thesis contains Introduction, 5 chapters, general conclusions and recommendations, bibliography of 229 titles. The main text amounts to 245 pages, includes 2 Annexes, 187 figures, 12 tables, 57 formulas. The obtained results of the thesis were published in 63 scientific papers.

Keywords: diffractive optics, optical and digital holography, chalcogenide glasses (ChG), nanomultilayers, azopolymers (AP), scalar and vector holographic recording, digital holographic interferometry and microscopy, optical and digital image processing.

Aim of research is research of diffractive optics elements, which are functional combination of optical components, optico-mechanical devices and technologies, and their operation algorithms.

The objectives of thesis include the development of optical elements based on nanomultilayers (NML) structures from ChG and AP as recording media; the development of digital and optical holographic technologies for creation diffractive optics elements (DOE) on NML media from ChG and AP thin films; the investigation of applicability of these holographic methods as tools for studying of materials optical properties in nanoscale; DOE application in the form of optical components in optoelectronics and photonics, biomedicine and security.

Scientific novelty and originality of the obtained results: are determined experimentally that in the ChG-Se NML and the AP thin films the complex variations of optical parameters (refractive index, absorption coefficient) take place responding to the action of both scalar and vector components of the field of optical radiation; the direct surface relief gratings are formed under optical and digital holographic recordings which are conditioned by vectoral (spatially anisotropic) response of the medium; the surface relief gratings patterned on the ChG-Se NML are governed by photoinduced structuration in nanolayers ChG and Se that leads to mass transfer in the ChG-Se NML; the surface relief gratings patterned on the AP thin films are governed by photoinduced *trans-cis-trans* transformations in the AP that leads to mass transfer in this media; it was elaborated and recorded the phase DOE on the ChG-Se NML and the AP thin films, and their potentials and limitations for practical application were studied; the potential impact of the work consists in the development of the advanced optical techniques for diffractive structures recording and investigations at nanoscale.

Important scientific problem consists in elaborating of the theoretical and applied aspects of the processes induced in amorphous materials by light and electron irradiation leading to pattern in these sensitive media the diffractive structures and the application of them in optical and digital holography.

Applicative value of the work is that the systematic studies of ability ChG NML and AP to be structured by laser writing methods, exposure with e-beam radiation, and digital hologram recording open up perspectives for development and/or optimization of wide a variety of applications in optoelectronics and photonics (diffractive optics, medicine, counterfeiting elements, holographic methods of non-distractive testing etc.).

Implementation of results: the results obtained have been applied in the successful implementation of 16 international and national applicative projects.

ACHIMOVA ELENA

**OPTICA DIFRACTIVĂ PENTRU
HOLOGRAFIA OPTICĂ ȘI DIGITALĂ**

134.01 — Fizica și tehnologia materialelor

Autoreferatul tezei de doctor habilitat în științe fizice

Aprobat spre tipar: 21.01.2019
Hârtie ofset. Tipar ofset.
Coli de tipar.: 2.8

Formatul hârtiei 60x84 1/16
Tiraj 25 ex.
Comanda nr. 2/2019

Contrast-design, Chișinău