

RECEPȚIONAT

Agenția Națională pentru Cercetare  
și Dezvoltare \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 2022

AVIZAT

Secția AȘM \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 2022

## RAPORT ȘTIINȚIFIC ANUAL 2022

privind implementarea proiectului din cadrul Programului de Stat (2020–2023)

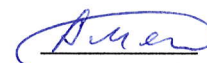
*”Dispozitive fotovoltaice cu elemente active din noi materiale calcogenice obținute  
prin tehnologii economic accesibile”*

20.80009.5007.03

Prioritatea Strategică: *Competitivitate economică și tehnologii inovative*


/ Directorul organizației

dr. hab. Mihai MACOVEI



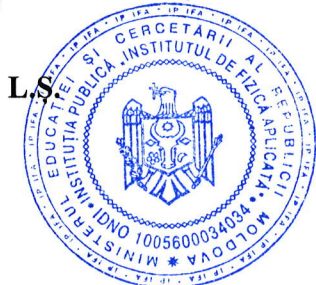
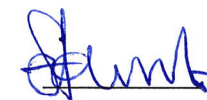
Consiliul științific/Senatul

dr. Ion COJOCARU



/ Conducătorul proiectului

acad. Ernest ARUȘANOV



Chișinău 2022

## 1. Scopul etapei anuale conform proiectului depus la concurs

Studiul proprietăților fotovoltaice ale joncțiunilor de tip  $(\text{Ag,Cu})_2\text{Zn}(\text{Cd})\text{Sn}(\text{S,Se})_4/\text{CdS}$ , modelarea optică și înregistrarea elementelor optice de difracție.

## 2. Obiectivele etapei anuale

1. Caracterizarea fundamentală a compușilor cuaternari de tip kesterit.
2. Obținerea joncțiunilor funcționale de tip  $(\text{Ag,Cu})_2\text{Zn}(\text{Cd})\text{Sn}(\text{S,Se})_4/\text{CdS}$  pe bază de straturi subțiri ale compușilor de tip kesterit.
3. Investigarea proprietăților fotovoltaice ale joncțiunilor  $(\text{Ag,Cu})_2\text{Zn}(\text{Cd})\text{Sn}(\text{S,Se})_4/\text{CdS}$ .
4. Studiul transparenței acestor joncțiuni pentru undele lungi ale spectrului radiației solare.
5. Elaborarea schemei pentru investigarea proprietăților anizotrope ale materialelor.
6. Elaborarea schemei holografice digitale pentru investigarea proprietăților optice și structurale ale materialelor care vor fi utilizate ca medii de înregistrare a EOD.

## 3. Acțiunile planificate pentru realizarea scopului și obiectivelor etapei anuale

1. Vor fi realizate lucrări de analiză a proprietăților diferitor materiale calcogenice promițătoare pentru fotovoltaică și fonică.
2. Se va lucra asupra obținerii joncțiunilor funcționale de tip  $(\text{Ag,Cu})_2\text{Zn}(\text{Cd})\text{Sn}(\text{S,Se})_4/\text{CdS}$  pe bază de straturi subțiri ale compușilor de tip kesterit care va fi joncțiunea secundă în celula solară tandem.
3. Vor fi investigate proprietăților fotovoltaice ale joncțiunilor respective și se va studia transparența acestora pentru undele lungi ale spectrului radiației solare.
4. Vor fi elaborate schemele pentru investigarea proprietăților anizotrope, optice și structurale ale sticlelor calcogenice și straturilor subțiri de azopolimeri care vor fi utilizate ca medii de înregistrare a EOD.

## 4. Acțiunile realizate pentru atingerea scopului și obiectivelor etapei anuale

1. Au fost studiate proprietățile elipsometrice ale unui set de probe policristaline de  $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x})\text{Se}_4$ .
2. Au fost obținute straturi subțiri  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS),  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  (CZTSe),  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{SSe})_4$  (CZTSSe) prin metoda de spray-piroliză și  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  utilizând metoda volumului quazi-închis de depunere.
3. Au fost dezvoltate procedeele de tratare termică ale probelor menționate în diverse condiții.
4. Au fost obținute dispozitive fotovoltaice de configurație stratificată -  $\text{SLG}/\text{FTO}/\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{Se}_3/\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_{3,2}\text{S}_{0,8}/\text{PEDOT: PSS}/\text{Au}$
5. Au fost organizate și efectuate investigațiile obiectelor de studiu cu sprijinul logistic modern al instituțiilor USM, UTM, IREC (Spania), HZB (Germania), CPST (Lituania).
6. A fost realizat studiul stabilității celulelor solare bazate pe heterojoncțiunea  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4/\text{CdS}$  sub tratamente termice post-depunere (PDT).
7. A fost dezvoltat software-ul pentru modelarea distribuției câmpului electric al elementelor optice de difracție din sticle calcogenice și straturi subțiri de azopolimeri.

8. A fost dezvoltată configurația optică pentru înregistrarea holografică analogică scalară și vectorială a elementelor optice de difracție pe nanomultistraturi din sticle calcogenice și straturi subțiri de azopolimeri.
9. A fost dezvoltată configurația optică pentru înregistrarea holografică digitală scalară și vectorială a elementelor optice de difracție pe nanomultistraturi din sticle calcogenice și straturi subțiri de azopolimeri.

## 5. Rezultatele obținute

### 5.1. Studiul proprietăților elipsometrice ale policristalelor $Cu_2Zn(Ge_xSi_{1-x})Se_4$

În cadrul acestei acțiuni a fost determinată funcția dielectrică la temperatura camerei pentru probele policristaline de  $Cu_2Zn(Ge_xSi_{1-x})Se_4$  cu  $x = 0,4$  și  $0,8$ , crescute prin metoda Bridgman modificată, cu ajutorul elipsometriei spectroscopice în intervalul de energie 1,0–4,5 eV. Calitatea lor înaltă a fost confirmată de măsurătorile de împrăștiere Raman obținute la diferite lungimi de undă de excitație, care nu arată vârfuri ale fazelor secundare în probele analizate. Modelul Adachi a fost utilizat pentru a analiza datele elipsometriei spectroscopice obținute și a permis identificarea clară a tranziției E0 la valori mici ale energiei, precum și a tranzițiilor E1A și E1B de mare energie și variația lor în funcție de compoziție. În rezultat, au fost evaluate constantele optice precum indicele de refracție, coeficientul de extincție și coeficientul de reflexie și absorbție. Datele raportate sunt esențiale pentru proiectarea și optimizarea dispozitivelor fotovoltaice durabile pe bază de kesterite de bandă largă ajustabilă, cu costuri reduse.

### 5.2. Obținerea, tratarea și studiul straturilor subțiri de $Cu_2ZnSn(S_xSe_{1-x})_4$ pentru utilizarea în calitate de strat absorbant în celule solare

Metodele de preparare ale filmelor de tip kesterit și a dispozitivelor în baza acestora sunt descrise mai minuțios în rapoartele precedente. Aici metodele menționate, ușor modificate, se utilizau în următoarea succesiune: Pe un substrat de sticlă SLG prin metoda spray-piroliză s-au depus straturile oxide transparente și conductibile de  $SnO_2$  și  $TiO_2$  de grosime  $\sim 30$ – $40$  nm. Pe ultimul strat prin metoda depunerii cu transport de vapori s-au format pelicule subțiri de  $Sb_2Se_3$  cu o grosime de aproximativ 10-15 nm. Ulterior, filmele  $Cu_2ZnSnS_4$  (CZTS) au fost depuse prin spray-piroliză la o temperatură a substratului de  $340^\circ C$ . Filmele CZTS obținute au fost apoi tratate termic într-o atmosferă de sulf la 340, 380, 420 și  $450^\circ C$  timp de 30 min. După sulfurare, filmele CZTS au fost selenizate într-o cutie de grafit la  $540^\circ C$  timp de 30 de minute. Ulterior, PEDOT:PSS a fost depus prin spin coating pe CZTSSe ca strat selectiv de goluri. Configurația dispozitivelor a fost finisată prin evaporarea termică a unui strat de aur de grosime 60 nm. Pentru îmbunătățirea aderenței stratului de CZTS pe suprafața de  $TiO_2$ , care este destul de slabă atunci când kesteritul este depus direct pe  $TiO_2$  s-a folosit un strat subțire de  $Sb_2Se_3$  (grosimea  $\approx 15$ - $20$  nm) ca strat injector în loc de CdS care este toxic pentru mediu. Mai mult, pierderea inevitabilă a ionilor de Sn la temperaturi ridicate poate fi eventual substituită de Sb datorită naturii izovalente, fiind un alt motiv important pentru utilizarea stratului  $Sb_2Se_3$ . Compoziția probelor a fost determinată cu ajutorul EDX. Din datele obținute, s-a observat că toate probele prezintă o distribuție nestoichiometrică a atomilor de Cu și Zn în structura CZTS, care conține o cantitate mică de cupru ( $Cu/(Zn + Sn) = 0,82$ – $0,87$ ) și un

exces de Zn ( $Zn/Sn = 1,04-1,14$ ). Această distribuție nestoichiometrică promovează formarea de faze secundare, defecte și locuri libere în filmele CZTS, în care s-a observat și o anumită cantitate de clor. Clorul poate favoriza formarea de defecte și faze secundare în filmele CZTS și, prin urmare, trebuie evitat. Observăm că conținutul de clor scade de la 1,88% în filmele sulfurate la 340°C până la 0,08% în filmele sulfurate la 450°C. În consecință, sulfurarea la temperaturile menționate permite obținerea compoziției CZTS bogate în Cu și Zn și reducerea conținutului de clor. Figura 1a prezintă profilele XRD ale filmelor subțiri CZTS sulfurate. Modelele de difracție ale tuturor filmelor confirmă formarea fazei de kesterită tetragonală a CZTS (Fig. 1a stânga).

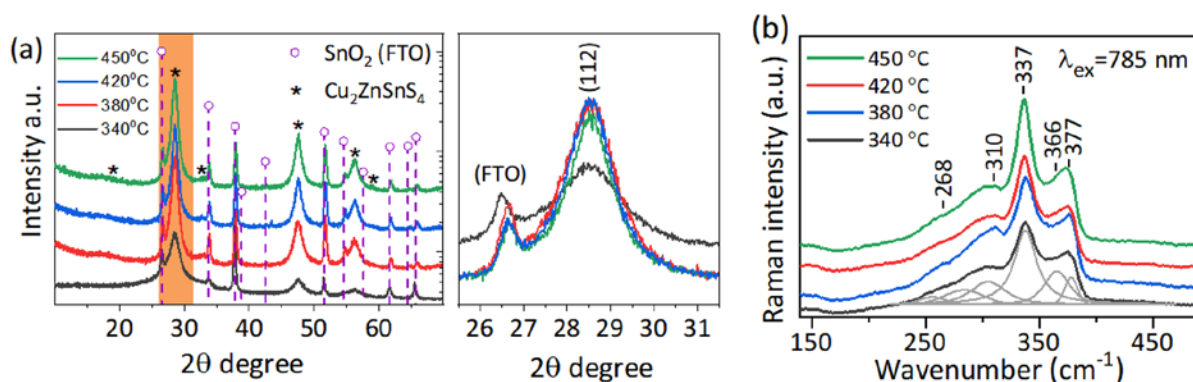


Figura 1. Modele de difracție cu raze X a filmelor CZTS tratate termic la diverse temperaturi (a) Spectrele Raman ale filmelor CZTS sulfurate la diferite temperaturi (b).

Mărimea dimensiunilor cristalitelor este un parametru important care determină calitatea materialului investigat și poate fi estimat din profilele XRD (Fig. 1a dreapta). A fost astfel calculată dimensiunea cristalitelor folosind metoda Halder-Wagner. Liniile XRD ale filmului CZTS sunt destul de largi, sugerând că dimensiunea cristalitelor care compun filmul este mică ( $2,6 \pm 0,4$  nm). Sulfurarea filmelor CZTS la temperaturile menționate a dus la o creștere semnificativă a dimensiunii cristalitelor. Cele mai mari cristalite (dimensiuni de  $5,6 \pm 0,3$  nm) au fost obținute în filmele CZTS sulfurate la 420°C. Din imaginile SEM ale morfologiei suprafețelor filmelor CZTS sulfurate și ale filmelor CZTSSe selenizate s-a obținut că filmele CZTS obținute prin tehnica spray-piroliză au o suprafață poroasă cu multe granule și găuri. Calitatea filmelor se îmbunătățește prin tratarea termică ale acestora. Cea mai semnificativă îmbunătățire se obține pentru filmele sulfurate la 420°C, ceea ce duce la o dimensiune mai mare a granulelor și o suprafață a filmului mai netedă.

Toate filmele CZTS au fost selenizate în continuare la o temperatură constantă de 540°C pentru a obține absorbante CZTSSe cu banda interzisă adecvată. Avantajul utilizării CZTSSe este cristalinitatea sa îmbunătățită și densitatea mai mică a defectelor de sulf în comparație cu materialul absorbant CZTS pur. Este evident că calitatea filmelor CZTSSe depinde de condițiile inițiale în care s-au format filmele CZTS. Filmele CZTSSe preparate din straturi CZTS tratate la temperaturi joase constau din cristalite mici cu suprafața rugoasă. În schimb, tratarea filmelor CZTS la temperaturi mai ridicate (420 și 450°C) are ca rezultat o suprafață mai netedă și o dimensiune mai mare a cristalitelor în filmele CZTSSe. Cea mai bună calitate a stratului este obținută în acele filme CZTSSe care au fost obținute din probe de CZTS selenizate la 420°C. În general, selenizarea îmbunătățește semnificativ calitatea tuturor filmelor CZTSSe, rezultând o densitate mai mică a

orificiilor, limite de granule reduse și cristalite mai mari în comparație cu filmele CZTS și acest lucru este deosebit de important atunci când sunt fabricate celule solare.

Pentru a determina modul în care condițiile de tratare ale filmelor CZTS afectează proprietățile optoelectronice ale materialelor absorbante CZTSSe, au fost investigate proprietățile fotovoltaice ale celulelor solare superstrate elaborate pe baza CZTSSe. Structura și secțiunea transversală SEM a celulelor solare CZTSSe investigate și diagramele nivelului de energie ale materialelor utilizate sunt prezentate în Fig. 2.

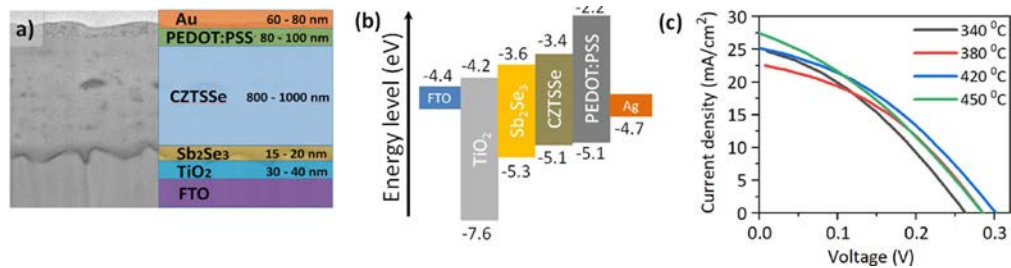


Figura 2. Structura și caracteristicile celulelor solare în baza CZTSSe.

Caracteristicile curent-tensiune (I-V) ale dispozitivelor CZTSSe care au prezentat cele mai bune performanțe sunt prezentate în Fig. 2c. Cele mai performante dispozitive au fost obținute în baza filmelor CZTSSe sulfurate la temperatură de 420°C. Randamentul acestora a atins valoarea de 3,48%, asigurată de valorile curentului de scurt circuit  $J_{sc} = 25,17 \text{ mA/cm}^2$ , tensiunii în circuit deschis  $V_{oc} = 300 \text{ mV}$  și factorul de umplere  $FF = 39,4\%$ . Sensibilitatea maximă a dispozitivului este în intervalul lungimilor de unde 450 – 650 nm, ce demonstrează posibilitatea utilizării acestora în calitate de elemente secundare în structurile fotovoltaice tandem.

### 5.3. Studiul stabilității celulelor solare bazate pe heterojoncțiunea $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4/\text{CdS}$ sub tratamente termice post-depunere "soft" (PDT)

În cadrul acestei acțiuni, a fost evaluată stabilitatea termică a heterojoncțiilor CZTSe/CdS din interiorul dispozitivelor SLG/Mo/CZTSe/CdS/i-ZnO/ITO. În acest scop, o serie de etape PDT diferite și o analiză cuprinzătoare efectuată la fiecare din acestea prin intermediul spectroscopiilor Raman și de fotoluminescență (PL) combinate cu o analiză optoelectronică au permis identificarea efectului PDT-ului "soft" aplicat dispozitivelor finale asupra straturilor tampon și absorbante. Analiza statistică detaliată a proprietăților optoelectronice ale celulelor solare (au fost analizate > 50 de celule la fiecare pas) a permis să concluzionăm că principala forță motrice care conduce la îmbunătățirea eficienței dispozitivului după PDT este îmbunătățirea calității stratului tampon CdS, în timp ce absorbantul CZTSe prezintă un impact destul de negativ asupra eficienței dispozitivului. Analiza spectrelor de împrăștiere Raman ale stratului tampon de CdS, măsurate în condiții de rezonanță, a relevat o posibilă recristalizare a acestui strat nanometric, ceea ce este în acord cu rezultatele publicate anterior și poate fi considerat factorul principal care joacă un rol pozitiv în creșterea eficienței celulei solare observată. Pe de altă parte, analiza atât a spectrelor Raman, cât și a celor PL arată o creștere a dezordonării Cu/Zn în stratul absorbant CZTSe după PDT-ul "soft", care joacă un rol negativ asupra performanței dispozitivului și poate fi principalul factor limitator pentru

dezvoltarea tehnologiilor fotovoltaice viitoare pe bază de kesterite. Analiza unui set suplimentar de probe pulbere, cu omogenitate ridicată și cu diferite niveluri de dezordine Cu/Zn, a permis propunerea unei metodologii rapide bazate pe spectroscopia de împrăștiere Raman pentru a diferenția cu ușurință modificările nivelului de dezordine și concentrația defectelor punctuale dintr-un set de probe.

#### 5.4. Elaborarea metodelor de modelare optică a elementelor optice de difracție pe sticle calcogenice și straturi subțiri de azopolimeri

Odată cu dezvoltarea tehnologiilor digitale, a devenit posibilă crearea elementelor optice de difracție (EOD) folosind modelarea, sinteza computerizată și transferul ulterior către material prin sisteme optice și litografice digitale care în prezent sunt dezvoltate și utilizate în mod activ. Sistemele digitale, de asemenea, permit crearea structurilor optice tridimensionale. EOD-urile sunt folosite pentru a obține distribuții complexe de câmp electric, cum ar fi câmpurile vortex. Utilizarea pe scară largă a fasciculelor optice vortex a condus la dezvoltarea și investigarea extinsă a metodelor pentru generarea lor eficientă și precisă. În cazul înregistrării interferometrice a vortex-urilor optice prin fabricarea rețelelor în formă de furcă (RFF), faza și relieful RFF au o structură sinusoidală în materialul fotosensibil:

$$T(r, \varphi) = \exp \left[ i\alpha \sin \left( \frac{2\pi}{D} r \cos \varphi + p\varphi \right) \right] \quad (1)$$

unde  $p$  este întreg și denotă numărul de “furci” în interiorul RFF,  $D$  este perioada este perioada părții sale rectilinii,  $2a = k(n-1)h$  este deplasarea maximă de fază a luminii,  $n$  este indicele de refracție al materialului,  $h$  este înălțimea reliefului,  $k = 2\pi/\lambda$  este numărul de undă. În acest caz, eficiența maximă de difracție a primului ordin de difracție poate atinge valoarea de aproximativ 33,9% la o valoare concretă a înălțimii reliefului. Folosind descompunerea

$$\exp[i\alpha \sin(x)] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(\alpha) \exp(imx) \quad (2)$$

unde  $J_m(\alpha)$  este ordinul  $m$  al funcției Bessel de ordinul întâi, reiese următoarea formulă:

$$\exp \left[ i\alpha \sin \left( \frac{2\pi}{D} r \cos \varphi + p\varphi \right) \right] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(\alpha) \exp \left[ im \left( \frac{2\pi}{D} r \cos \varphi + p\varphi \right) \right] \quad (3)$$

În acest caz, fascicolul optic vortex cu sarcină topologică (TC)  $pm$ . Distribuția energiei în ordinele de difracție în planul focal al unei lentile cu o distanță focală  $f$  se definește după cum urmează:

$$|G(\mathbf{u})|^2 \approx (R/f)^2 \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m^2(\alpha) \text{sinc}^2 \left[ R \left( \frac{u}{\lambda f} - \frac{m}{d} \right) \right] \quad (4)$$

unde  $R$  este raza câmpului luminii incidente. Dacă o RFF similară (RFF2) (cu deplasarea maximă de fază  $2\beta$  și TC  $p_2$ ) rotit cu  $\theta$  grade se adaugă la RFF definită de ecuația (1) (RFF1), atunci compusul bidimensional RFF format poate fi descris prin următoarea formulă:

$$T(r, \varphi) = \exp \left[ i\alpha \sin \left( \frac{2\pi}{D_1} r \cos \varphi + p_1 \varphi \right) \right] \times \exp \left\{ i\beta \sin \left[ \frac{2\pi}{D_2} r \cos(\varphi + \theta) + p_2(\varphi + \theta) \right] \right\} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(\alpha) \exp \left[ im \left( \frac{2\pi}{D_1} r \cos \varphi + p_1 \varphi \right) \right] \times \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q(\beta) \exp \left\{ iq \left[ \frac{2\pi}{D_2} r \cos(\varphi + \theta) + p_2(\varphi + \theta) \right] \right\} \quad (5)$$

În acest caz, în ordinea de difracție ( $m, q$ ), se formează un vortex optic cu sarcina topologică TC ( $p_1 m + p_2 q$ ). Evident, din cauza însumării, sarcinice topologice pot crește sau scădea. Apoi, luând în considerare proprietățile funcției  $\text{sinc}(x)$ , se poate obține următoarea expresie pentru intensitatea luminii în ordinele de difracție corespunzătoare:



$$I_{m,q} \approx \left(\frac{R}{f}\right)^2 J_m^2(\alpha) J_q^2(\beta) \quad (6)$$

Astfel, distribuția intensității pe ordinele de difracție este determinată de valorile de contrast ale RFF individuale  $\alpha$  și  $\beta$ . Ecuațiile (5) și (6) arată că această abordare oferă o mare varietate a matricelor generate de vortexul optic cu diferite sarcini topologice și intensități controlabile.

### 5.5. Înregistrarea elementelor optice de difracție cu utilizarea metode holografice analogice scalare și vectoriale (polarizate)

Pentru înregistrarea interferometrică analogică în două etape a RFF complexe ce au fost modelate, s-au folosit nanomultistraturi (NMLS) pe bază de sticle calcogenice  $As_2S_3$ -Se. NMLS cu grosimea totală de 1,3  $\mu m$  compusă din 110 perechi de substraturi de  $As_2S_3$  și Se cu grosimi corespunzătoare de 9 nm și 3 nm. Indicele de refracție „eficient” al acestui mediu a fost calculat din spectrele de transmisie și este aproximativ 2,45 pentru lungimea de undă de 650 nm. Parametrii unor astfel de rețele au fost bine studiați și s-a demonstrat că două fascicule laser interferente cu polarizări liniare ortogonale (+45 și 45 de grade față de planul de incidență al fasciculelor ce interferă) produc eficiență maximă de difracție a EOD fabricate. Abordarea menționată a interferenței cu două fascicule a fost utilizată și pentru fabricarea RFF-urilor unidimensionale. Pentru realizarea unui sistem de litografie fără mască, am folosit configurația optică bazată pe interferometrul Mach-Zehnder prezentat în Fig. 3a.

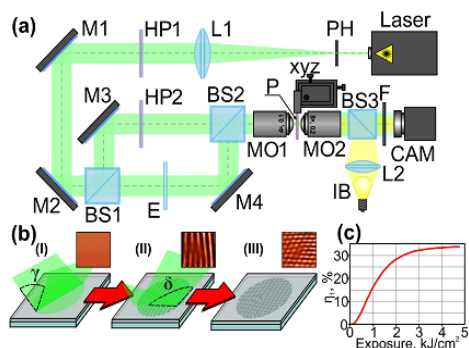


Fig. 3. Schema de înregistrarea în două etape a RFF-urilor complexe ce au fost modelate pe NMLS. (a) Configurația optică utilizată în experimente. (b) Reprezentare schematică a etapelor procesului de înregistrare holografică a RFF-urilor complexe, unde  $\gamma$  și  $\delta$  sunt unghiurile de convergență ale fasciculelor laser suprapuse. (c) Cinetica efectului de difracție în ordinul de difracție +1 în timpul înregistrării holografice a rețelei cu perioadă 1  $\mu m$ .

Fascicul laser incident are o formă Gaussiană și are o polarizare liniară de la un laser cu solid ( $\lambda = 532$  nm) a fost extins și filtrat spațial cu un sistem compus dintr-un gaură mică (pinhole) PH cu dimensiunea deschiderii de 40  $\mu m$  și o lentilă L1 cu distanță focală de 150 mm. Un retarder de jumătate de lungime de undă HP1 a fost utilizat pentru a roti direcția de polarizare a fascicului laser inițial cu 45 de grade față de planul mesei optice. Folosind oglinzile M1 și M2, fasciculul laser colimat a fost direcționat către intrarea interferometrului Mach-Zehnder format din două oglinzi M3 și M4 și două separatoare de fascicule nepolarizante BS1 și BS2. În câmpul optic a fascicului obiect al interferometrului a fost instalată un retarder de fază în formă de spirală care generează fascicule vortex cu sarcina topologică dorită. În plus, un retarder de jumătate de lungime de undă HP2 a fost utilizat pentru a roti direcția de polarizare a fascicului de referință a unei laser cu 90 de grade față de direcția de polarizare a fascicului obiect. În acest fel putem realiza atât înregistrări holografice scalare cât și vectoriale. Un microobiectiv MO1 (4x, cu apertură numerică (NA) = 0,1) a focalizat fasciculele laser interferente obiectul și de referință ale interferometrului pe suprafața unei

sticle P acoperite cu nanomultistraturi NMLS. Placa a fost fixată pe o treaptă mecanizată cu trei axe (XYZ). Un microobiectiv MO2 (8x, NA=0,2) și o cameră video CAM au fost folosite pentru a monitoriza procesul de litografie. Un filtru neutru F ne-a permis să reducem intensitatea fascicului laser. Un sistem format dintr-un bec IB, o lentilă sferică L2 (lungime focală 50 mm) și un separator de fascicule BS3 a fost utilizat pentru a ilumina suprafața sticlei acoperite de NMLS. Oglinzile M3 și M4 ne-au permis să modificăm înclinarea fasciculelor laser interferente și a pozițiile lor reciproce și astfel să modificăm parametrii franjelor de interferență generate. Astfel au fost variate perioada franjelor de interferență precum și orientarea acestora.

### 5.6. Înregistrarea elementelor optice de difracție cu utilizarea metodelor holografice digitale scalare și vectoriale (polarizate).

Înregistrarea holografică digitală polarizată funcționează ca o configurație de înregistrare interferometrică Mach-Zehnder. Fig. 4 prezintă configurația experimentală bazată pe laserul cu solid TEM00 pompat cu diodă ( $\lambda = 532\text{nm}$ , putere 2W).

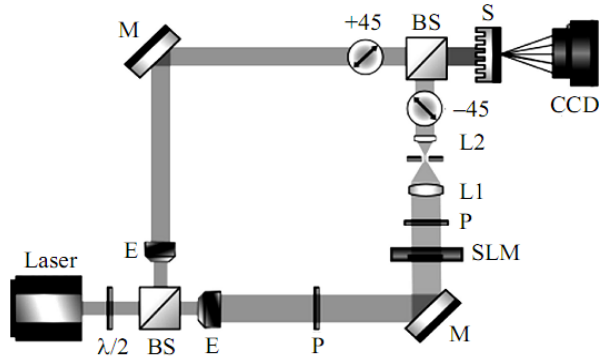


Fig. 4. Configurația interferometrică bazată pe modulator spațial de lumină (SLM) pentru înregistrarea holografică digitală polarizată: M — oglindă; BS — separator de fascicul nepolarizant, E — expander; SLM — modulator spațial de lumină LC—2002 cu rezoluție de  $800 \times 600$  pixeli și dimensiunea pixelilor de  $32 \mu\text{m}$ ; S — probă;  $\lambda/2$ -retarder de jumătate de lungime de undă; P — polarizator; L1, L2 — lentile.

Înregistrarea RFF are loc atunci când interferă fascicului obiect care trece prin SML cu polarizarea de  $-45^\circ$  și cu un fascicul referință de formă Gaussiană cu polarizarea de  $+45^\circ$  (față de planul fasciculelor interferente). Astfel, unghiul dintre direcțiile de polarizare ale fasciculelor interferente este de  $90^\circ$ . Stările de polarizare încrucișată ale fasciculelor de lumină controlate de un retarder de jumătate de undă contribuie la modularea maximă a reliefului de suprafață a RFF. Retarderul de jumătate de undă plasat direct după laser controlează unghiul de polarizare al fascicului incident în raport cu separatorul de fascicule. Primul separator de fascicul la intrarea interferometrului creează un raport de intensitate în brațe de 30:70, care asigură intensități egale la ieșirea fasciculelor din interferometru. Pentru a acoperi întreaga suprafață a ecranului SLM, fasciculele au fost extinse spațial de un colimator. Un sistem telescopic 4-f (două lentile cu distanțe focale diferite) a fost aplicat pentru a ajusta holograma transmisă prin SLM în conformitate cu locul de înregistrare de pe NMLS. Curbele din Fig. 5 arată modificarea eficienței de difracție în ordinele +11 și +23 măsurată în timp real. Eficiența maximă în ordinul de difracție +23 este de aproximativ 0,1%. Eficiența de difracție în ordinul a 11-a la 180 de minute de înregistrare ajunge la 3,5%.

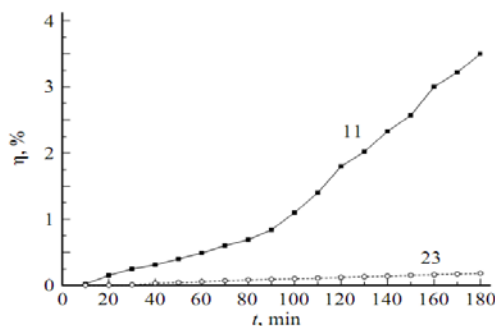


Fig. 5. Cinetica eficienței de difracție a ordinului +11 și +23 în timpul înregistrării digitale a unui EOD de tip vortex.



## **6. Diseminarea rezultatelor obținute în proiect în formă de publicații**

Vezi *Anexa IA*

## **7. Impactul științific, social și/sau economic al rezultatelor științifice obținute în cadrul proiectului**

Elaborările de materiale noi și tehnologii moderne low-cost, metode eficiente de înregistrare a informației optice și a radiației IR și UV vor avea un impact considerabil științific și tehnologic la nivel internațional. Crearea materialelor și structurilor noi pentru convertoare FV și a tehnologiilor accesibile cu costul redus de producere a celulelor solare tandem are un impact de interes pentru întreaga comunitate științifică globală întrucât valorificarea surselor regenerabile de energie ecologic inofensive este unul din proiectele cele mai dinamice ale industriei mondiale. Impactul științific fundamental constă în elaborarea concepțiilor pentru design-ul diverselor materiale și publicarea rezultatelor în reviste științifice recenzate cu factor de impact înalt pe parcursul anului 2022 (*Anexa IA*). Rezultatele și experiența obținute de echipa de executanți pe parcursul realizării proiectului în perioada de referință și metodele moderne de înregistrare computerizată a elementelor optice de difracție au fost folosite la instruirea specialiștilor în optoelectronică. Rezultatele obținute în cadrul proiectului vor contribui la asigurarea și ridicarea nivelului științifico-didactic al studenților și masteranzilor.

## **8. Infrastructura de cercetare utilizată în cadrul proiectului**

Infrastructura utilizată pentru studiile realizate în cadrul proiectului constă în resursele tehnice și materiale disponibile în cadrul Institutului de Fizică Aplicată (IFA), precum și cele puse la dispoziție de către Universitatea Tehnică a Moldovei (UTM), Universitatea de Stat din Moldova (USM) și centrele de cercetare din Spania, Finlanda, Germania, Lituania, Belarus, etc. cu care echipa proiectului colaborează de mai mulți ani.

Astfel, probele policristaline de  $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x})\text{Se}_4$  au fost obținute la Universitatea de Stat de Informatică și Radioelectronică din Belarus. O parte din aceste probe au fost obținute în cadrul IFA, dar calitatea acestora s-a dovedit a fi mai joasă. Proprietățile elipsometrice ale acestora au fost măsurate la Centrul de Optică "Daza de Valdés" (IO-CSIC) din Madrid (Spania). Analiza datelor a fost realizată la IFA, cu utilizarea calculatoarelor și programelor de analiză din dotare.

Straturile subțiri de tip kesterit studiate în cadrul acestui proiect au fost obținute la IFA, la instalația de obținere a straturilor subțiri prin spray-piriliză. Procedurile de selenizare și tratare termică au fost, de asemenea realizate cu utilizarea dispozitivelor și cuptoarelor din dotarea Laboratorului Materiale pentru Fotovoltaică și Fonică din cadrul IFA. Analiza compozițională pentru probele de tip kesterit și a straturilor subțiri au fost realizate la instalația INCA Energy 200 EDX system (Oxford Instruments) atașată la un microscop cu scanare electronică (SEM) TESCAN VEGA 5130 MM din cadrul Universității Tehnice din Moldova (UTM) precum și la Analizatorul de fluorescență AFRX „X-Calibur” din dotarea Laboratorului Materiale pentru Fotovoltaică și Fonică a IFA. Spectrele Raman pentru toate probele de tip kesterit utilizate în studiu au fost măsurate la Institutul de Cercetare în Energetică IREC din Barcelona (Spania) cu ajutorul spectrofotometrului FHR640 Horiba Jobin Yvon cuplat la un detector CCD. Structura și compoziția straturilor subțiri a fost analizată cu ajutorul difractometrului X'PERT-MPD (Philips) cu sursă de radiație  $\text{CuK}\alpha_{1,2}$  (1.5405 Å, 1.5444 Å) și a Microscopului cu Scanare Electronică (SEM) TESCAN VEGA din

dotarea Helmholtz-Centrum Berlin (Germania). Împreună cu colaboratorii centrului UAB Modernios E-Technologijos (Lituania) au fost realizate lucrări de depunere a straturilor ITO prin tehnica spray-piroliză și optimizarea acestora în scopul utilizării lor la obținerea celulele solare tandem kesterite-siliciu. Cercetarea proprietăților structurale și a proprietăților optice ale straturilor  $\text{Ag}_2\text{ZnGeS}_4$  (AZGS),  $\text{Ag}_2\text{CdSnS}_4$  (ACTS) și  $\text{Ag}_2\text{CdGeS}_4$  (ACGS) au fost realizate împreună cu colaboratorii Moroccan Foundation for Advanced Science Innovation and Research Fondation MASCIR (Rabat, Maroc).

Studiul stabilității celulelor solare bazate pe heterojoncțiunea  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4/\text{CdS}$  sub tratamente termice post-depunere "soft" (PDT) a fost realizat cu ajutorul resurselor tehnice moderne din cadrul Institutul de Cercetare în Energetică IREC din Barcelona (Spania), de către colegii noștri aflați la stagii de practică acolo (Guc Maxim, Rotaru Victoria).

Elaborarea metodelor de modelare optică a elementelor optice de difracție pe sticle calcogenice și straturi subțiri de azopolimeri precum și înregistrarea elementelor optice de difracție prin diferite metode a fost realizată în cadrul IFA, în Laboratorul de holografie digitală și optică. În acest sens au fost utilizate microscopul holografic digital (un dispozitiv eficient pentru vizualizarea 3D a probelor transparente de dimensiuni micrometrice), mese holografice, Lasere DPSS (532 nm, 4 W; 532 nm, 100 mW; 473 nm, 100 mW), lasere de gaz (He-Ne 633 nm, 50 mW; He-Cd 442 nm 10 mW), lasere semiconductoare, camere CMOS și CCD, componente optice și mecanice: lentile, oglinzi, cuburi de divizare a luminii, polarizatoare, plăci de jumătate de undă și sfert de undă, modulatori optici tridimensionali LC 2002 (producător HOLOEYE, Germania) pentru înscrierea hologramelor digitale, sistem automat de măsurare a eficacității de difracție a hologramelor, spectrofotometru UV-VIS pentru măsurarea automatizată (digitală) a spectrelor optice de transparență, reflecție și absorbție ale materialelor sintetizate în domeniul spectral 200-800nm, Software: LabVIEW, Matlab, OpticMeter. Pentru sintetizarea și depunerea materialelor fotosensibile pentru utilizarea ca medii de înregistrare a hologramelor au fost utilizate sistemul centrifugal de depunere a straturilor subțiri SCS P-8" Spin Coater, agitatorul magnetic cu încălzire, centrifuga, balanța, echipamentul cu ultrasunete, suporturi multifuncționale, aparatură specializată de laborator pentru efectuarea diverselor experimente, precum eprubete, ustensile, substanțe chimice, dulap de uscare a peliculelor subțiri, baie cu ultrasunet pentru prepararea soluțiilor, echipament și veselă chimică.

## **9. Colaborare la nivel național în cadrul implementării proiectului**

Pe parcursul anului de referință echipa proiectului a colaborat cu Universitatea Tehnică a Moldovei și Universitatea de Stat a Moldovei pentru schimb de experiență, realizarea unor măsurători și în scop didactic.

## **10. Colaborare la nivel internațional în cadrul implementării proiectului**

Pe parcursul etapei de referință a proiectului, echipa de cercetare a ținut legături în scopuri științifice cu colegii care se ocupă cu studierea compușilor cuaternari, ternari, silicidelor, cu proiectarea și studiul joncțiunilor fotovoltaice, cu cercetători interesați în domeniul opticii computerizate, holografiei digitale și analogice din centrele de cercetare externe: Universitatea Autonomă din Madrid și Institutul de Optică "Daza de Valdés" (Spania), Universitatea Tehnică din Lapeenranta (Finlanda), Institutul Catalan de Cercetare în Energetică IREC (Barcelona, Spania),

Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) și Institutul de Optică a Universității din Stuttgart (Germania), Universitatea Națională de Cercetări Samara (Rusia), Universitatea de Stat de Radioelectronică și Informatică din Belarus (BSUIR) (Belarus), UAB Modernios E-Technologijos (MET) și Center for Physical Sciences and Technology (Lituania), Institutul de Biochimie, Centrul de Științe ale Vieții, Universitatea din Vilnius (Institute of Biochemistry, Life Sciences Center, Vilnius University), Moroccan Foundation for Advanced Science Innovation and Research Fondation MASCIR (Rabat, Maroc), Institutul semiconductorilor lui Loshkarev (Ucraina) etc. O mare parte din acțiunile de cercetare necesare îndeplinirii scopului proiectului la etapa a treia au fost realizate în laboratoarele acestor centre (vezi pct. 8 al acestui raport) de către membrii echipei care, periodic, au îndeplinit stagii de practică acolo prin diverse acorduri de colaborare încheiate de către conducătorii unităților de cercetare. În rezultatul colaborării cu echipele de cercetători din centrele științifice din Germania, Spania și Belarus, în anul 2022 au fost publicate mai multe articole științifice în jurnale internaționale iar rezultatele au fost diseminate la câteva conferințe.

### **11. Dificultățile în realizarea proiectului**

Pe parcursul realizării obiectivelor din cadrul etapei a treia a proiectului (anul 2022), principalele dificultăți au fost legate de volumul slab al finanțării în contextul inflației ridicate datorate situației globale actuale și de finanțarea întârziată pentru procurarea materialelor necesare procesului științific.

Majorarea prețurilor de achiziție a materialelor necesare, a serviciilor de transport și a altor taxe a dus la necesitatea replanificării unor acțiuni, deplasări, participări la conferințe, iar procesele de publicare a rezultatelor în reviste cu factor de impact durează acum mai mult.

### **12. Diseminarea rezultatelor obținute în proiect în formă de prezentări la foruri științifice (comunicări, postere – pentru cazurile când nu au fost publicate în materialele conferințelor, reflectate în p. 6)**

*Lista forurilor la care au fost prezentate rezultatele obținute în cadrul proiectului de stat:*

#### ➤ Manifestări științifice internaționale (în străinătate)

1. 5<sup>th</sup> International Conference on Nanomaterials Science and Mechanical Engineering, July 5-8, 2022, University of Aveiro, Portugal. **Meshalkin Alexei**, cercetător științific; Titlul comunicării: Nanomultilayer structures based on chalcogenide amorphous semiconductors: obtaining and applications. Tipul de prezentare – keynote oral presentation.
2. 14<sup>th</sup> International Conference on Physics of Advanced Materials (ICPAM-14), September 08-15, 2022, Dubrovnik, Croatia. **Meshalkin Alexei**, cercetător științific; Titlul comunicării: Study of surface relief patterning based on diffraction methods. Tipul de prezentare – oral presentation. **Meshalkin Alexei**, cercetător științific; Titlul comunicării: Improvement of the performance of Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> solar cell by TiO<sub>2</sub> layer treatment. Tipul de prezentare – poster presentation.
3. XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям HOLOEXPO 2022, 20–22 сентября, 2022, Санкт-Петербург, Россия. **Meshalkin Alexei**, cercetător științific; Titlul comunicării: Актуальные исследования

кинетики записи голограмм с использованием формфактора. Tipul de prezentare – oral presentation.

**4. Aprecierea și recunoașterea rezultatelor obținute în proiect (premii, medalii, titluri, alte aprecieri).**

-

**5. Promovarea rezultatelor cercetărilor obținute în proiect în mass-media:**

➤ Emisiuni radio/TV de popularizare a științei

1. **Alexei Meshalkin, Vladimir Abașkin** / excursia on-line cu elevii din Liceul Teoretic "Mihail Koșubinski" 18 februarie 2022/ Subiectul abordat: tehnologii moderne holografice, microscop holografic.

2. **Alexei Meshalkin, Constantin Loșmanschii, Vladislav Botnari** / participarea la ediția a 9-a Noaptea Cercetătorilor Europeni 2022, 30 septembrie 2022, Chișinău, Moldova/ Subiectul abordat: difracția luminii, semne holografice de protecție, imagini holografice tridimensionale.

3. **Alexei Meshalkin** / participarea cu expoziție la Ziua Științei, ediția 2022, 10 noiembrie 2022, Chișinău, Moldova/ Subiectul abordat: semne holografice de protecție, imagini holografice tridimensionale, tehnologii moderne holografice.

4. **Hajdeu-Chicaroș Elena** / interviu acordat cu ocazia Zilei Științei, ediția 2022, 10 noiembrie 2022, Chișinău, Moldova / Subiectul abordat: Importanța științei pentru societate

➤ Articole de popularizare a științei

-

**6. Teze de doctorat / postdoctorat susținute și confirmate în anul 2022 de membrii echipei proiectului**

-

**7. Materializarea rezultatelor obținute în proiect**

-

**8. Informație suplimentară referitor la activitățile membrilor echipei în anul 2022**

➤ Membru/președinte al comitetului organizatoric/științific, al comisiilor, consiliilor științifice de susținere a tezelor

-

➤ Redactor / membru al colegiilor de redacție al revistelor naționale / internaționale

-

## 9. Rezumatul activității și a rezultatelor obținute în proiect.

**RO:** Pe parcursul etapei anului 2022 au fost realizate mai multe acțiuni în vederea realizării scopului final al proiectului. Astfel, au fost studiate proprietățile compoziționale, structurale, vibraționale, elipsometrice și electronice ale diferitor materiale de tip kesterit (sub formă de policristale și straturi subțiri) și particularitățile acestor materiale atunci când sunt utilizate în calitate de strat absorbant în structuri fotovoltaice.

Prin studiul efectelor temperaturii de sulfurare a filmelor CZTS s-a demonstrat că acesta este un proces inevitabil pentru a produce materiale absorbante de CZTSSe de calitate înaltă. Selectarea temperaturii de sulfurare este un factor deosebit de important care poate afecta calitatea finală a filmelor CZTSSe și a performanței celulelor solare. Procedul elaborat de tratare termică combinat în două etape, a demonstrat posibilitatea de obținere a materialului CZTSSe de cea mai înaltă calitate, care conține cele mai mari dimensiuni ale cristalitelor, o densitate redusă a defectelor și cea mai scăzută dezordine structurală. Rezultatele subliniază, de asemenea, importanța utilizării  $Sb_2Se_3$  ca strat injector pentru fabricarea celulelor solare CZTSSe cu parametri de performanță reproductibili. Celulele solare pe bază de CZTSSe fabricate din filme CZTS sulfurate la  $420^\circ C$  au prezentat eficiență de până la 3,48%, cu o medie de 3,1% și o abatere standard de 0,38%. Lucrarile efectuate în perioada etapei menționate demonstrează că optimizarea condițiilor de sulfurare și selenizare, alegerea adecvată a stratului injector sunt factori importanți pentru îmbunătățirea în continuare a calității și performanței celulelor solare în baza filmelor CZTSSe obținute prin tehnica spray- piroliză.

A fost evaluată stabilitatea termică a heterojuncțiunilor CZTSe/CdS din interiorul dispozitivelor fotovoltaice SLG/Mo/CZTSe/CdS/i-ZnO/ITO și s-a observat că tratamentele termice post-depunere asupra stratului CZTSe/CdS conduc la îmbunătățirea eficienței dispozitivului întreg datorită îmbunătățirii calității stratului tampon CdS, în timp ce absorbantul CZTSe prezintă un impact negativ asupra eficienței. Analiza spectrelor de împrăștiere Raman ale stratului de CdS a relevat o posibilă recrystalizare a acestuia, care poate fi considerată cauza principală a creșterii eficienței celulelor solare.

Simularea pe calculator a caracteristicilor EOD a arătat că distribuția intensității pe ordinele de difracție este determinată de valorile contrastului rețelelor în formă de furcă individuală. Această abordare face posibilă generarea unei game largi de fascicule optice vortex cu diferite sarcini topologice și intensitate controlabilă. A fost demonstrată posibilitatea fabricării rețelelor în formă de furcă (RFF) complexe pe nanomultistraturi (NMLS) de  $As_2S_3$ -Se fabricate prin metodă holografică analogică polarizată. Aceste RFF permit generarea uni- și bidimensională a fasciculelor optice vortex cu sarcină topologică necesară. S-a folosit o placă de fază în formă de spirală pentru generarea de fascicule optice vortex care interferează cu un fascicul Gaussian pentru fabricarea rețelelor unidimensionale utilizate în fiecare dintre cele două etape ale procesului de înregistrare laser. Rețelele de difracție înregistrate prin metoda holografică digitală polarizată fac posibilă formarea de fascicule cu fază vortex (spiralată). Eficiența de difracție a acestor rețele nu depășește 3,5%, dar crește odată cu creșterea înălțimii profilului de relief. Prin urmare, studiile ulterioare vor avea ca scop creșterea înălțimii reliefului format al structurilor de difracție înregistrate.

**EN:** During the stage of 2022, several actions were carried out in order to achieve the final goal of the project. Thus, the compositional, structural, vibrational, ellipsometric and electronic properties of different kesterite-type materials (polycrystals and thin layers) and the particularities of these materials when used as an absorbing layer in photovoltaic structures were studied.

By studying the effects of sulfurization temperature on CZTS films, it has been shown that the additional low temperature sulfurization of CZTS films is an inevitable process to produce high quality CZTSSe absorber materials. The choice of sulfurization temperature is a particularly important factor that can greatly affect the final quality of the CZTSSe films and the performance of the solar cells. The employed XRD diffractometer equipped with monochromatic Cu K $\alpha$ 1 radiation source and Raman spectroscopy evidenced that the highest quality CZTSSe material i.e. containing largest crystal sizes, a reduced defect densities and the lowest structural disorder for the CZTS films pre-sulfurized at 420 °C. This study also highlights the importance of using Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> as a buffer layer for the fabrication of CZTSSe solar cells with reproducible performance parameters. The CZTSSe-based solar cells fabricated from sulfurized CZTS films at 420 °C exhibited a PCE of up to 3.48%, with an average efficiency of 3.1% and a standard deviation of 0.38%. This work shows that the optimization of the sulfurization conditions and appropriate choice of the buffer layer are important factors to further improve quality and performance of the spray pyrolysis deposited CZTSSe solar cells.

The thermal stability of CZTSe/CdS heterojunctions inside SLG/Mo/CZTSe/CdS/i-ZnO/ITO photovoltaic devices was evaluated, and it was observed that post-deposition soft thermal treatments (PDT) on the CZTSe/CdS layer lead to improved overall device efficiency due to the improvement of the quality of the CdS buffer layer, while the CZTSe absorber shows a rather negative impact on device efficiency. The analysis of the Raman scattering spectra of CdS buffer revealed the possible recrystallization of this nanometric layer, which can be regarded as the main actor playing a positive role in the observed increase of solar cell efficiency.

Computer simulation of the DOE characteristics showed that the distribution of intensity over diffraction orders is determined by the values of the contrast of individual forked gratings. This approach makes it possible to obtain a wide variety of generated optical vortex beams with different topological charges and controllable intensity. It has been demonstrated the compound fork gratings in the As<sub>2</sub>S<sub>2</sub>-Se NMLS fabricated by an analog polarization holographic method. These fork gratings allow one to generate the desired one- and two-dimensional patterns of optical vortex beams with given topological charge. We used spiral phase plate for the generation of initial optical vortex beams interfering with a Gaussian beam for the fabrication of one-dimensional gratings used in each of the two steps of the proposed laser writing process. However, any other element that is currently widely employed for the generation of single optical vortex beams can be used. Diffraction gratings recorded by the digital polarization holographic method make it possible to form beams with vortex phase. The diffraction efficiency of these gratings does not exceed 3.5%, but increases with the increasing of the height of the relief profile. Therefore, further studies will be aimed at growing the height of the formed relief of recorded diffraction structures.



## 10. Recomandări, propuneri

/ Conducătorul de proiect  acad. Ernest ARUȘANOV

Data: 16.11.22

LS



**Lista lucrărilor științifice, științifico-metodice și didactice  
publicate în anul de referință în cadrul proiectului din Programul de Stat**

**”Dispozitive fotovoltaice cu elemente active din noi materiale calcogenice obținute prin tehnologii  
economic accesibile”**

**1. Articole în reviste științifice**

*1.1. în reviste din bazele de date Web of Science și SCOPUS (cu indicarea factorului de impact IF)*

1. Lähderanta, E.; **Hajdeu-Chicarosh, E.**, Kravtsov, V.; Shakhov, M.A.; Stamov, V.N.; Bodnar, I.; **Arushanov, E.**; **Lisunov, K.G.** Electronic properties of  $\text{Cu}_2(\text{Zn,Cd})\text{SnS}_4$  determined by the high-field magnetotransport. *New J Phys.* 2022, **24**(9), 093008-1—093008-14. Doi: [10.1088/1367-2630/ac8b9f](https://doi.org/10.1088/1367-2630/ac8b9f) (IF: 3,716).
2. **Hajdeu-Chicarosh, E.**; Levcenko, S.; Sernac, R.; Bodnar, I.V.; Victorov, I.A.; Iaseniuc, O.; Caballero, R.; Manuel Merino, J.; **Arushanov, E.**; León, M. Spectroscopic ellipsometry study of  $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x})\text{Se}_4$  bulk poly-crystals. *Solid State Sci.* 2022, **132**, 106982. Doi: [10.1016/j.solidstatesciences.2022.106982](https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2022.106982) (IF: 3,752).
3. Siminel, N.; Galkin, K.N.; **Arushanov, E.**; Galkin, N.G. Photoconductivity study of  $\text{Ca}_2\text{Si}$  epitaxial film on Si(111) substrate. *Vacuum.* 2022, **203**, 111302. Doi: [10.1016/j.vacuum.2022.111302](https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111302) (IF: 3,627).
4. Porfirev, A.; Khonina, S.; Ivliev, N.; **Meshalkin, A.**; **Achimova, E.**; Forbes, A. Writing and Reading With The Longitudinal Component of Light Using Carbazole-Containing Azopolymer Thin Films. *Sci Rep.* 2022, **12**, 3477-1—3477-12. Doi: [10.1038/s41598-022-07440-9](https://doi.org/10.1038/s41598-022-07440-9) (IF: 4,379).
5. Paiuk, O.; **Meshalkin, A.**; Stronski, A.; **Achimova, E.**; **Losmanschii, K.**; Botnari, V.; Korchovy, A.; Popovych, M. Direct magnetic and surface relief patterning using carbazole-based azopolymer. *Optical Materials* (submitted for publication).
6. **Meshalkin, A.**; Shoydin, S. Actual research on the kinetics of hologram recording using a form factor, *Journal of Optical Technology* (submitted for publication).

**2. Articole în materiale ale conferințelor științifice**

*2.1. în lucrările conferințelor științifice internaționale (peste hotare)*

1. Pedrini, G.; Schiebelbein, A.; **Achimova, E.**; **Abashkin, V.** Lensless phase imaging microscopy by multiple intensity diffraction pattern. În: *Proceedings SPIE, V. 12136 "Unconventional Optical Imaging III"*. SPIE Photonics Europe, 3 April - 23 May 2022, Strasbourg, France, p. 1213605-1—1213605-8. Doi: [10.1117/12.2620778](https://doi.org/10.1117/12.2620778).
2. **Meshalkin, A.**; **Achimova, E.**; **Abashkin, V.**; **Prisacar, A.**; **Triduh, G.**; Tsyntsaru, N. Nanomultilayer structures based on chalcogenide amorphous semiconductors: obtaining and applications. Book of Abstracts of 5<sup>th</sup> International Conference on Nanomaterials Science

and Mechanical Engineering, July 5-8, 2022, University of Aveiro, Portugal, p. 172. Doi: [10.48528/11t1-bw91](https://doi.org/10.48528/11t1-bw91)

3. Pakstas, V.; Kondrotas, R.; Drabavicius, A.; Naujokaitis, A.; Franckevicius, M.; **Meshalkin, A.**; Cesiulis, H. Improvement of the performance of  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  solar cell by  $\text{TiO}_2$  layer treatment. Abstract book of 14<sup>th</sup> International Conference on Physics of Advanced Materials (ICPAM-14), September 08-15, 2022, Dubrovnik, Croatia, p. 180-182.
4. **Meshalkin, A.**; **Achimova, E.**; **Abaskin, V.**; **Losmanschii, C.**; Botnari, V.; Pakstas, V. Study of surface relief patterning based on diffraction methods. Abstract book of 14<sup>th</sup> International Conference on Physics of Advanced Materials (ICPAM-14), September 08-15, 2022, Dubrovnik, Croatia, p. 310-312.
5. **Мешалкин, А.Ю.**; Шойдин, С.А. Актуальные исследования кинетики записи голограмм с использованием формфактора, Тезисы докладов XIX Международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям HOLOEXPO 2022, 20–22 сентября, 2022, Санкт-Петербург, Россия, с. 306-312. ISBN [978-5-00202-182-6](https://doi.org/978-5-00202-182-6).

## 2.2. în lucrările conferințelor științifice internaționale (Republica Moldova)

1. Paiuk, O.; **Meshalkin, A.**; Stronski, A.; **Achimova, E.**; **Losmanschii, K.**; Korchovy, A.; Denisova, Z.; Goroneskul, V.; Oleksenko, P. Direct Surface Patterning Using Carbazole-Based Azopolymer. În: *ICNBME 2021, IFMBE Proceedings 87, 2022*. 5th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, November 3–5, 2021, Chisinau, Moldova, p. 117–123. Doi: [10.1007/978-3-030-92328-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92328-0_16).
2. **Achimova, E.**; **Abaskin, V.**; **Cazac, V.**; **Prisacar, A.**; **Meshalkin, A.**; **Loshmanschi, C.** The Anisotropy of Light Propagation in Biological Tissues. În: *ICNBME 2021, IFMBE Proceedings 87, 2022*. 5th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, November 3–5, 2021, Chisinau, Moldova, p. 149–156. Doi: [10.1007/978-3-030-92328-0\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92328-0_20).
3. **Losmanschii, C.**; **Achimova, E.**; **Abashkin, V.**; **Botnari, V.**; **Meshalkin, A.** Photoinduced Anisotropy in Azopolymer Studied by Spectroscopic and Polarimetric Parameters. În: *ICNBME 2021, IFMBE Proceedings 87, 2022*. 5th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, November 3–5, 2021, Chisinau, Moldova, p. 314–321. Doi: [10.1007/978-3-030-92328-0\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92328-0_42).

## Executarea devizului de cheltuieli, conform anexei nr. 2.3 din contractul de finanțare

Cifra proiectului: 20.80009.5007.03

Cheltuieli, mii lei				
Denumirea	Cod		Anul de gestiune	
	Eco (k6)	Aprobat	Modificat +/-	Precizat
Remunerarea muncii	211180	2123.1	+20.4	2143.5
Contribuții de asigurări sociale de stat obligatorii	212100	615,7	+5.9	621.6
Indemnizații pentru incapacitatea temporară de muncă achitate din mijloace financiare ale angajatului.	273500	6.0		6.0
Procurarea mașinilor și utilajelor	314110	12,6		12,6
Procurarea materialelor pentru scopuri didactice, științifice și alte scopuri	335110	8,6		8,6
<b>Total</b>		<b>2766.0</b>	<b>+26.3</b>	<b>2792.3</b>

/ Conducătorul organizației *Miha* / dr. hab. Mihai MACOVEIContabil șef *Larisa* / Larisa MITROȘENCO/ Conducătorul de proiect *Ernest* acad. Ernest ARUȘANOVData: 16.11.2022LS

## Componenta echipei proiectului

Cifrul proiectului: 20.80009.5007.03

Echipa proiectului conform contractului de finanțare (la semnarea contractului)						
Nr	Nume, prenume (conform contractului de finanțare)	Anul nașterii	Titlul științific	Norma de muncă conform contractului	Data angajării	Data eliberării
1.	Simășchevici Alexei	1929	dr.hab.	0.25	03.01.2022	
2.	Achimova Elena	1959	dr.hab.	1.00	03.01.2022	
3.	Arușanov Ernest	1941	dr.hab.	1.00	03.01.2022	
4.	Șerban Dormidont	1939	dr.hab.	1.00	03.01.2022	
5.	Abașkin Vladimir	1948	dr.	1.00	03.01.2022	
6.	Aculinin Alexandr	1961	dr.	1.00	03.01.2022	
7.	Bruc Leonid	1952	dr.	1.00	03.01.2022	
8.	Lisunov Constantin	1959	dr.	1.00	03.01.2022	
9.	Nateprov Alexandr	1945	dr.	1.00	03.01.2022	
10.	Guc Maxim	1986	dr.	0.25	03.01.2022	
11.	Curmei Nicolai	1989	dr.	1.00	03.01.2022	
12.	Hajdeu-Chicaros Elena	1989	dr.	0.50	03.01.2022	
13.	Levcenco Sergiu	1983	dr.	1.00	03.01.2022	
14.	Meșalchin Alexei	1978	dr.	0.50	03.01.2022	
15.	Batır Valentin	1995		1.00	03.01.2022	
16.	Cazac Veronica	1994		1.00	03.01.2022	
17.	Dermenji Lazar	1978		1.00	03.01.2022	
18.	Loșmanschii Constantin	1990		1.00	03.01.2022	
19.	Prisacar Alexandru	1969		1.00	03.01.2022	
20.	Damaschin Ion	1942	dr.	0.75	03.01.2022	
21.	Triduh Ghennadi	1946		1.00	03.01.2022	
22.	Petco Aliona	1997		1.00	03.01.2022	31.10.2022
23.	Rotaru Victoria	1998		1.00	03.01.2022	
24.	Slepniov Ivan	1950		0.50	03.01.2022	22.06.2022

Ponderea tinerilor (%) din numărul total al executorilor conform contractului de finanțare	<b>37,5%</b>
--	--------------

Modificări în componența echipei pe parcursul anului 2022					
Nr	Nume, prenume	Anul nașterii	Titlul științific	Norma de muncă conform contractului	Data angajării
1.	Cazac Veronica	1994		-1.00	
2.	Dermenji Lazar	1978		0.5	01.01.2022
3.	Moldovanu Serghei	1967		0.5	01.01.2022
4.	Slepnirov Ivan	1950		- 0.50	
5.	Cazac Veronica	1994		0.5	07.07.2022

Ponderea tinerilor (%) din numărul total al executorilor la data raportării	36,4%
---	-------

/ Conducătorul organizației  / **dr. hab. Mihai MACOVEI**

Contabil șef  / **Larisa MITROȘENCO**

/ Conducătorul de proiect  **acad. Ernest ARUȘANOV**

Data: 16.11.22

