

RECEȚIONAT

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

\_\_\_\_\_ 2021

AVIZAT

Secția AȘM \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 2021

## RAPORT ȘTIINȚIFIC ANUAL

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

MATERIALE ȘI STRUCTURI MULTIFUNCȚIONALE PENTRU DETECTAREA  
RADIAȚIILOR ELECTROMAGNETICE

cifrul 20.80009.5007.12

Prioritatea Strategică V: Competitivitate economică și tehnologii inovative

Conducătorul proiectului

\_\_\_\_\_ VATAVU Sergiu

Rectorul Universității de Stat  
din Moldova

\_\_\_\_\_ ȘAROV Igor

Președintele Senatului USM

\_\_\_\_\_ ȘAROV Igor



Chișinău 2021

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

Prepararea structurilor în baza materialelor II-VI, III-V, III-VI și II-IV-N<sub>2</sub> sensibile la radiații X, UV, VIS, IR, și THz și cercetarea proprietăților fizice în structuri reieșind din modelele teoretico-experimentale.

### 2. Obiectivele etapei anuale

1. Prepararea structurilor mono- și multistrat în baza materialelor (As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)<sub>x</sub>(Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>1-x</sub>, (As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)<sub>x</sub>(SnSe)<sub>1-x</sub> și (As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)<sub>x</sub>Sn<sub>1-x</sub>, ZnSnN<sub>2</sub>, ZnO, GaN, p-i-n ZnO/InP(111), Ga<sub>2</sub>S<sub>3</sub>/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dopate cu Zn, Bi.

2. Cercetarea proprietăților fizice ale cristalelor II-VI dopate și a soluțiilor solide în baza lor

3. Simularea numerică a structurilor 1D, 2D și 3D reieșind din analiza proprietăților optice, fotoelectrice, fotoluminescente ale structurilor analizate în domeniile THz, X-ray și vizibil în vederea aplicabilității în dispozitive multifuncționale.

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

1. Prepararea și cercetarea structurilor bi- și tri- strat: (As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)<sub>x</sub>(Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>1-x</sub>, (As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)<sub>x</sub>(SnSe)<sub>1-x</sub> și (As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)<sub>x</sub>Sn<sub>1-x</sub> - medii fotosensibile pentru înregistrarea imaginilor fazice în domeniul razelor X și VIS (difuzia Ag sub acțiunea radiațiilor X și vizibile).

2. Stabilirea design-ului optimal pentru matricea de detectori în baza monocristalelor CdTe, CdZnTe, CdSeTe (1x1 cm<sup>2</sup>) și a straturilor policristaline ale acestor materiale în funcție de compoziția acestora. Creșterea monocristalelor detectoare de CdZnTeSe. Modelarea proceselor fizice și optimizarea parametrilor detectorilor pentru funcționare în matrice.

3. Determinarea structurii electronice și stării de sarcină a ionilor dopanți în monocristalele ZnSe:P, As, Sb, Bi. Modelarea proceselor de formare a complexelor cu participarea ionilor elementelor din grupa a V-a în cristalele de ZnSe.

4. Prepararea structuri GaN/ZnO/Si fotosensibile UV.

5. Obținerea nanoformațiunilor de Ga<sub>2</sub>S<sub>3</sub>/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (sensibile pentru  $\lambda < 360$  nm). Prepararea straturilor subțiri din nanoformațiuni de  $\beta$  - Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dopate cu Zn, Bi și studiate proprietățile optice și electrice. Prepararea structuri Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO și Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pe substrat de Ga<sub>2</sub>S<sub>3</sub>. Măsurarea spectrelor de absorbție a stratului de oxid de la suprafața acestei heterostructuri.

6. Prepararea heterojoncțiunilor multifuncționale în baza ZnSnN<sub>2</sub> și CdSe/CdTe fotosensibile în VIS.

7. Elaborarea detectorilor p-i-n ZnO/InP cu fotosensibilitatea în VIS >400  $\mu$ A/mW.

8. Obținerea profilurilor de dopare ale regiunii active ale structurilor THz polare c-plane AlGaN/GaN cu diapazon de lucru 230-300K.

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

1. Au fost preparate și cercetate structurile în baza semiconductorilor calcogenici al sistemii As-Se-S și straturilor subțiri de Ag, calibrarea instalației de raze X cu spectrul integral 5-50 keV.

2. Au fost ajustată tehnologia de creștere și cercetate structurală și morfologică a

monocristalelor CdTe, CdZnTe, CdSeTe de diferită compoziție pentru matricea de detectori, preparate straturi subțiri ale acestor materiale, precum și analizate procesele fizice în detectori matrice în vederea optimizării parametrilor. A fost elaborată tehnologia de creștere a monocristalelor de CdZnSeTe.

3. Au fost elaborate cicluri tehnologice și stabilite regimuri tehnologice optime de sinteză a cristalelor de ZnSe prin metoda reacțiilor chimice de transport (RCT) și doparea lor concomitentă cu impurități de elemente P, As, Sb, Bi cu utilizarea în calitate de agent de transport a Br și Cl. Sunt obținute serii de probe, dopate cu impuritățile menționate.

Au fost cercetate proprietățile radiative a monocristalelor de ZnSe dopate concomitent cu impurități de elemente din grupa a V (P, As, Sb, Bi) și VII (Br, Cl), atât în procesul de creștere, cât și prin difuzia impurităților din topiturile dopante în procesul de tratare termică a cristalelor.

Prin metoda sintezei solvotermale au fost obținute pulberi nanocristaline de ZnSe nedopate și dopate în procesul de sinteză cu N și As. Sunt obținute serii de probe de ZnSe:N și ZnSe:As cu diferită concentrație a impurității dopante și cercetate proprietățile lor FL la 300K.

Prin metoda precipitării chimice din soluții apoase au fost obținute pulberi nanocristaline de ZnO, nedopate și dopate în procesul de sinteză cu N și As. Au fost obținute serii de probe de ZnO:N și ZnO:As cu diferită concentrație a impurității dopante și cercetate spectrele de FL la 300K.

4. Au fost obținute straturi subțiri de GaN pe substraturi de ZnO folosindu-se metoda HVPE. ZnO a fost preparat folosindu-se diferiți solvenți pentru acetatul de Zn.

5. Au fost obținute straturi de Ga<sub>2</sub>S<sub>3</sub> pe suporturi de Si prin metoda CSS în condiții tehnologice variate și cercetate proprietățile structurale și morfologice. Au fost preparate straturilor subțiri Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Au fost efectuate măsurări ale proprietăților optice în vederea stabilirea dependenței spectrale a spectrelor coeficientului de absorbție pentru Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

6. A fost elaborată tehnologia de preparare a straturilor subțiri de ZnSnN<sub>2</sub> prin reactive magnetron sputtering și a straturilor heterojuncțiunilor CdS/ZnO, CdSe/ZnO pentru heterojuncțiuni CdSe/CdTe prin metoda CSS-m.

7. Aplicând metodele epitaxiei din fază gazoasă în volum deschis în sistem de cloruri (metoda HVPE), depunerea compușilor semiconductoare din aerosol, depunerea magnetron și spray piroliză au fost preparate structuri n ZnO -p InP cu aplicații în fotodetectori pentru UV și VIS.

8. Au fost elaborați fotodetectori cu sensibilitate în UV în bază de ZnSe cu contacte Schottky hibride, unul din contacte fiind Ni/Au, iar al doilea fiind constituit din nanofire de Ag. Au fost cercetate caracteristicile curent-tensiune la iluminare și în lipsa acesteia și determinați parametrii de bază.

9. A fost realizată modelarea numerică a spectrului energetic al electronilor în structurile cuantice în bază de c-plane Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN (x=0,25; 0,30) polare cu una și două gropi cuantice și bariere simetrice la 300K. A fost studiată influența concentrației impurității dopante în regiunea de contact (colector) asupra diagramei benzilor energetice a structurilor cuantice și asupra spectrului energetic al electronilor în acestea.

## 5. Rezultatele obținute (descriere narativă 3-5 pagini)

Structuri cu straturi subțiri  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_{0,99}(\text{Bi}_2\text{Se}_3)_{0,01}$ ,  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_{(0,90)}(\text{SnSe})_{(0,10)}$  și  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_x(\text{Bi}_2\text{Se})_{1-x}/(\text{As}_2\text{S}_3)_x\text{Sn}_{1-x}$  au fost obținute pe substraturi din safir prin evaporare termică în vid. Pentru a studia dependența spectrală a fotoconductivității, straturi semiconductoare au fost depuse pe un substrat de safir acoperit cu un strat conducător de ITO. Fotosensibilitatea spectrală maximă pentru  $(\text{As}_2\text{S}_3)_{0,99}\text{Sn}_{0,01}$  este aproape de 440 nm cu multiplicitatea fotocurentului  $k=6,4$ , pentru  $(\text{As}_2\text{S}_3)_{0,99}(\text{Bi}_2\text{Se}_3)_{0,01}$  sensibilitatea maximă este în regiunea 445 nm ( $k=7,2$ ) și pentru  $(\text{As}_2\text{S}_3)_{(0,90)}(\text{SnSe})_{(0,10)}$  sensibilitatea maximă este poziționată spectral 468 nm ( $k=8,3$ ). Cercetările în regiunea X a spectrului radiațiilor electromagnetice a fost realizat prin folosirea straturilor de Ag depuse pe substraturi de safir, având grosimea de 20-25 nm. Grosimea straturilor semiconductoare  $(\text{As}_2\text{S}_3)_{0,99}(\text{Bi}_2\text{Se}_3)_{0,01}$ ,  $(\text{As}_2\text{S}_3)_{(0,90)}(\text{SnSe})_{(0,10)}$  și  $(\text{As}_2\text{S}_3)_x(\text{Bi}_2\text{Se})_{1-x}/(\text{As}_2\text{S}_3)_x\text{Sn}_{1-x}$  a variat între 0,25-1  $\mu\text{m}$ . Studiul difuziei argintului în straturile semiconductoare a fost efectuat cu utilizarea instalației de raze X (tub cu anod de Cu, 45 kV, 40 mA) cu spectrul integral 5-50 keV și doză absorbită de 1,2 Gy/h. Înainte de iradiere, transmisia optică a structurii studiate a fost măsurată în intervalul spectral de 400–1000 nm, după care s-au efectuat cicluri de iradiere cu raze X la intervale de timp fixe. După prima doză de iradiere, transmisia optică a fost măsurată, apoi următoarele cicluri de iradiere au fost efectuate la aceeași putere a tubului cu raze X și pentru intervale de timp egale până la saturația difuziei Ag în stratul semiconductor. Creșterea transmisiei optice ca urmare a difuziei Ag sub acțiunea radiației de raze X în stratul semiconductor a fost:  $\Delta T = 1,4\%$  pentru structura  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_{(0,90)}(\text{SnSe})_{(0,10)}$  cu o absorbție totală doză de 0,55 Gy,  $\Delta T = 0,9\%$  pentru  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_{0,99}(\text{Bi}_2\text{Se}_3)_{0,01}$  la o doză de 0,68 Gy și  $\Delta T = 1,2\%$  pentru  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_x(\text{Bi}_2\text{Se})_{1-x}/(\text{As}_2\text{S}_3)_x\text{Sn}_{1-x}$  la o doză de 0,57Gy. Pentru a studia difuzia Ag în regiunea vizibilă a spectrului, a fost folosit radiația laser 447 nm și 532 nm; cinetica modificării transmisiei în timpul înregistrării a fost măsurată la o lungime de undă a radiației laser de 635 nm. La iradierea filmelor subțiri  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_x(\text{Bi}_2\text{Se})_{1-x}/(\text{As}_2\text{S}_3)_x\text{Sn}_{1-x}$  și  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_x(\text{Bi}_2\text{Se})_{1-x}$  prin radiație laser 447 nm (la expunere energetică 80  $\text{cm}^2/\text{mJ}$ ), transmisia optică a crescut cu  $\Delta T = 1,8\%$  și respectiv  $\Delta T = 1,2\%$ , care conform surselor bibliografice, sunt valori tipice pentru filmele semiconductoare ale sistemului As-Se-S. La iradierea filmelor subțiri de  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_{(0,90)}(\text{SnSe})_{(0,10)}$  cu radiație laser  $\lambda = 532$  nm, transmisia a crescut cu  $\Delta T = 2,4\%$ . Conform surselor bibliografice, atunci când straturi subțire ale sistemului As-Se-S sunt iluminate în spectrul vizibil și ultraviolet viteza de gravare chimică (în soluție anorganică 5% de NaOH sau soluție organică 10% de monoetanolamină) se modifică în locuri luminate și neluminate, ceea ce permite utilizarea lor ca fotoreziste cu rezoluție înaltă (conform surselor bibliografice - până la 7000  $\text{mm}^{-1}$ ). În zonele iradiate cu raze X, ca urmare a difuziei Ag, viteza de gravare chimică a stratului semiconductor se modifică în raport cu zonele neiradiate, ceea ce face posibilă vizualizarea imaginilor înregistrate cu raze X prin gravare chimică. Structurile de film subțire obținute pot fi utilizate atât pentru înregistrarea imaginilor în domeniul spectral vizibil, cât și în domeniul razelor X în spectrul integral 5-50 keV.

Elaborarea sistemului de citire a datelor de pe detectori a fost testat primar în baza dispozitivului ce consta dintr-un detector cuplat printr-un condensator de blocare la preamplificatorul de curent (CSP). CSP-ul este cuplat la un detector de impulsuri PDIC, care este controlat și citit de microcontrolerul Arduino. Funcționalitatea detectorilor în matrice de înregistrate a impulsurilor determinate de acțiunea radiațiilor ionizante este asigurată de un circuit cu amplificatorul operațional AD8034. Totalitatea de impulsuri este preluată de detector, care reprezintă o matrice de 256 sau 512 elemente. După citirea elementului indicat indexul matricei este apoi incrementat cu unu și sistemul se resetează. Implementarea citirii stării

elementelor matricei integral, este realizată și testată în dispozitiv cu utilizarea unui convertor analog-digital cu 256 de canale ADAS1131.

Au fost elaborate tehnologii de obținere a cristalelor de ZnSe dopate cu Br și codopate cu Br și elemente din drupa V (P, As, Sb, Bi) prin metoda reacțiilor chimice de transport (RCT) și tratarea termică a cristalelor nedopate de ZnSe în topitură de Zn, ce conține impuritățile corespunzătoare.

Prin metoda RCT au fost obținute cristalele: ZnSe:Br; ZnSe:Br:0,05%at.P; ZnSe:Br:0,02%at.As; ZnSe:Br:0,05%at.Sb; ZnSe:Br:0,025%at.Bi. În calitate de sursă de Br este folosit ZnBr<sub>2</sub>.

La temperatura camerei au fost cercetate spectrele de FL a probelor obținute în intervalele lungimilor de undă 480-800 nm la excitarea cu radiație laser  $\lambda_{exc}=405$  nm (3,06 eV). S-a stabilit că, spectrele de FL a tuturor probelor în domeniul cercetat de lungimi de undă sunt caracterizate de prezența unei benzi largi de radiație și compusă după structură. De menționat că, structura benzilor și semilățimea lor depind considerabil de tipul impurității dopante. Astfel, maximumul benzii de radiație a probei de ZnSe:Br este situat în vecinătatea 580 nm. Pe panta benzii de FL din domeniul undelor scurte și cea din domeniul undelor lungi se observă particularități în vecinătatea 560 nm, 610 nm și 660 nm corespunzător. Semilățimea benzii constituie  $\Delta W = 0,63$  eV. În spectrul de FL a probei de ZnSe:Br:P maximumul benzii este situat în vecinătatea 620 nm ( $\Delta W = 0,60$  eV). Maximumul benzii de FL a probei ZnSe:Br:As este situat la 650 nm ( $\Delta W = 0,36$  eV). Pe panta din domeniul undelor scurte a benzii se observă particularitate la 560 nm. Spectrul probei ZnSe:Br:Sb este caracterizat de o bandă cu maximum în vecinătatea 630 nm ( $\Delta W = 0,55$  eV). Scăderea nivelului de excitare a probelor de 10 ori nu conduce la evidențierea benzilor elementare de FL.

Prin metoda tratării termice a cristalelor inițiale de ZnSe în topituri de Zn; (Zn+Sb); (Zn+Sb+ZnBr<sub>2</sub>); (Zn+Bi); (Zn+Bi+ZnBr<sub>2</sub>); (Zn+As); (Zn+As+ZnBr<sub>2</sub>); (Zn+P); (Zn+P+ZnBr<sub>2</sub>) a fost obținută seria de probe codopate cu impurități de elemente din grupa V și VII.

Prin cercetarea spectrelor de FL a probelor obținute la temperatura camerei a fost stabilit că, spectrul probei inițiale de ZnSe este constituit dintr-o bandă compusă cu maximum lângă 590 nm ( $\Delta W = 0,63$  eV) și o pantă cu particularitate în vecinătatea 630÷650 nm. În spectrul de FL a probei ZnSe:Zn este prezentă o bandă simetrică cu maximum lângă 620 nm ( $\Delta W=0,59$  eV). Adăosul Br în topitura de Zn conduce la îngustarea benzii de FL ( $\Delta W=0,40$  eV) și deplasarea maximumului spre 600 nm. Tratarea termică a ZnSe în topitura Bi+1% masa de Br conduce la lărgirea semnificativă a benzii de FL, dar poziția maximumului ei nu se schimbă, însă apare particularitate în vecinătatea 650 nm. Co-doparea cristalelor de ZnSe cu impurități de Br și Bi conduce la deplasarea maximumurilor benzilor spre 590 nm, apariția particularității pronunțate în vecinătatea 620 nm, lărgirea benzii în regiunea undelor lungi ( $\Delta W = 0,55$  eV). Îngustarea observată a benzilor de radiație cercetate, probabil, se explică prin micșorarea numărului de centre radiative în baza V<sub>Zn</sub>, deoarece tratarea termică a probelor s-a realizat în topitura de Zn.

A fost demonstrat că, aplicarea metodei RCT cu utilizarea Cl în calitate de agent de transport (sursa de Cl este sarea Zn(NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>Cl<sub>5</sub>) nu permite obținerea blocurilor volumetrice monocristaline de ZnSe, potrivite pentru cercetarea proprietăților lor fizice.

Prin metoda tratării termice a monocristalelor de ZnSe în topituri de Zn + x % at. Zn(NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>Cl<sub>5</sub> + x % at. P(As; Sb; Bi) pentru raportul volumul probei către volumul topiturii de Zn egal cu 1:7 și la temperatura de tratare 860°C, și timp de tratare 100 ore, a fost obținută seria de probe de ZnSe:Cl:P (As; Sb; Bi) pentru studierea proprietăților radiative.

Pe baza cercetărilor efectuate s-a stabilit că, pentru obținerea monocristalelor de ZnSe prin metoda RCT, cel mai bun și efectiv agent de transport, din numărul elementelor din drupa a VII-ea (I, Br, Cl), este iodul.

Analiza spectrelor de FL a pulberilor nanocristaline ZnSe:N și ZnSe:As a arătat că, pentru toate pulberile este caracteristică banda lată de radiație cu maximum în regiunea 500 - 600 nm, iar pe unele benzi spectrale se observă o particularitate suplimentară în regiunea 630 - 640 nm. FL ZnSe în regiunea 600 - 640 nm, de obicei, este legată cu complexe defectelor native. Dependența intensității de radiație de cantitatea impurității introduse are caracter ambiguu atât pentru N, cât și pentru As. În principal, se observă micșorarea intensității FL odată cu creșterea concentrației impurității, legată, probabil, cu efectul stingerii FL în dependență de concentrație.

Analiza spectrelor de FL a pulberilor nanocristaline ZnO:As, obținute din soluții apoase, a arătat că, caracteristicile spectrale a probelor au maximum de radiație în regiunea 590 - 595 nm la toate concentrațiile impurităților dopante. Odată cu majorarea conținutului de arsen, intensitatea radiației în maximumul benzii de FL trece prin maximum și, începând cu o anumită concentrație a impurității, intensitatea radiației se micșorează, ceea ce este legat cu efectul stingerii luminescenței în dependență de concentrație, când nivelele de recombinare, începând cu o anumită cantitate de impuritate, trec în nivele de alipire. Este stabilit că, maximumul intensității de radiație a nanopulberilor ZnO și ZnO:N este localizat la 595 nm. Tratarea termică a pulberilor la 500°C în decurs de 1 oră duce la deplasarea maximumului benzii de radiație spre 660 nm, condiționată de înlocuirea oxigenului cu azotul molecular în procesul de tratare termică a pulberilor

A fost stabilită corelația dintre proprietățile fizice ale straturilor nano dimensionale, de nucleație, de ZnO depuse prin metoda cvasi hidrotermală pe Si de componența solvenților, tipul de conductibilitate și structura cristalografică a substraturilor. Au fost preparate nanoparticule ZnO de nucleație cu dimensiunile de (15-25 nm - confirmat prin GI-XRD și AFM) size. Forma nanoparticulelor sunt echiaxiale semisferice. Nanoparticulele sunt agregate cu dimensiunea de 50-200 nm și formează o peliculă pe suprafața SiO<sub>x</sub>/Si, densitatea fiind influențată de condițiile de creștere.

Straturi de Ga<sub>2</sub>S<sub>3</sub> au fost preparate pe suporturi de n-Si (100) 4-8 Ω·cm (110-150 μm grosime) și quartz utilizând metoda CSS. Drept sursă a fost folosit α'-Ga<sub>2</sub>S<sub>3</sub>. Temperatura evaporatorului a fost constantă de 800°C, iar temperatura suportului a variat între 550°C și 650°C. Reieșind din cercetările structural morfologice a fost stabilit că la folosirea suporturilor de quartz se obțin straturi de Ga<sub>2</sub>S<sub>3</sub> cu amestec de faze α+β, iar odată cu mărirea temperaturii suportului tensiunile mecanice descresc de la 0,6 la 0,4%, aceeași însă dimensiunile cristalitelor se măresc de la 18 la 28 nm. În cazul folosirii suporturilor de n-Si pentru prepararea straturilor semiconductoare, a fost demonstrată obținerea peliculelor monofazice de α-Ga<sub>2</sub>S<sub>3</sub>. În astfel de straturi dimensiunile cristalitelor descresc de la 45 nm la 15 nm, iar tensiunile mecanice cresc la mărirea temperaturii suportului. Odată cu parcurgerea a cca 25 de cicluri de depunere prin CSS, se observă apariția fazei GaS.

Prepararea straturilor de Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a fost posibilă prin metoda aerosol. Temperatura suportului (0001) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a fost de 590°C. Grosimea peliculei de β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> monoclinic este de 31 nm.

Morfologia, structura și proprietățile electronice a suprafeței au un rol determinant în funcționalitatea dispozitivelor microelectronice multistrat. Prepararea straturilor de CdS, CdSe pentru aplicarea în dispozitive fotodectoare a fost efectuată prin metoda CSS pe suporturi TCO (AZO, SnO<sub>2</sub>)/sticlă. Studiul proprietăților fizice este prezentat în exemplul straturilor subțiri de

CdS depuse pe TCO (AZO, SnO<sub>2</sub>)/sticlă la temperatura suportului între 280-460°C temperatura evaporatorului la 630°C. Analiza structurală a fost realizată prin intermediul GI-XRD pentru unghiuri 0,3-1,0° (tub Cu<sub>Kα</sub>), cu efectuarea Rietveld refinement, determinarea dimensiunilor cristalitelor și a tensiunilor mecanice. Măsurări Kelvin Probe (KP) și Photoelectron Yield Spectroscopy (PYS) au fost realizate cu folosirea sursei UV pentru regiunea spectrală 172 nm - 364 nm (7.20 eV - 3.40 eV). Morfologia suprafeței a fost studiată prin SEM, AFM, iar XRF și EDX au fost folosite pentru analiza elementelor componente. A fost stabilit că straturile subțiri de CdS au o structură F-43m la depunerea pe AZO, iar mărirea temperaturii suportului de la 290°C la 420°C duce la mărirea dimensiunilor cristalitelor de cca 4 ori. Mărirea temperaturii suportului rezultă în formarea straturilor cu perfecțiune structurală mai înaltă, microtensiunile descrescând de 2 ori. Folosirea SnO<sub>2</sub> în calitate de suport rezultă la formarea pe acesta a straturilor de CdS cu structură P 6<sub>3</sub> mc cu dimensiunile cristalitelor în domeniul 7-22 nm. A fost stabilit că mărirea temperaturii suportului duce la apariția unui maxim (360°C) în dependența dimensiunilor medii ale cristalitelor temperatură, spre deosebire de straturile preparate pe AZO unde este prezentă o creștere monotonă a dimensiunilor cristalitelor cu temperatura.

Rezultatul analizei comune ale KP și PYS prezintă un răspuns spectral tipic pentru semiconductor. CdS preparat pe AZO prezintă o scădere a valorii lucrului de ieșire cu approx. 0,25 eV la mărirea temperaturii suportului până la 463°C, iar cel preparat pe SnO<sub>2</sub> prezintă o scădere a valorii menționate cu mai puțin de 55 meV. Energia de ionizare prezintă o dependență cu saturare după 350°C (AZO) și o creștere liniară în cazul structurii CdS/SnO<sub>2</sub>. Poziția nivelului Fermi ce variază între 180 meV și 320 meV sub CBM pentru CdS/AZO, în timp ce în cazul CdS structurii CdS/SnO<sub>2</sub> se observă valori caracteristice degenerării.

Au fost preparate straturi epitaxiale de InP optimizate după parametrii electrici (1-25)·10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup>, (1,5-5,0)·10<sup>-1</sup> Ω·cm, (995-1246) cm<sup>2</sup>/V·s și structuri nZnO/pInP (100), (111) pentru fotodetectori utilizând metoda HVPE, depunerea din compuși, metaloorganici, magnetron și spray piroliză, cu intervalul fotosensibilității sensibilității extinse (400-950 nm), cu maxim localizat la 850 nm.

Au fost elaborate detectoare pentru regiunea UV a spectrului pe bază de ZnSe (regiunea activă 10x10,5 μm<sup>2</sup>) cu contacte Schottky hibride, un contact fiind constituit din Ni/Au (10,5x1,0 μm<sup>2</sup>), iar al doilea contact din nanofire de Ag (Ag-nanowire). Au fost cercetate dependențele curent-tensiune la iluminare (laser He-Cd 325 nm) și în lipsa acesteia. Curentul de întuneric depinde liniar de tensiune (la 15 V curentul constituie 0,36 nA). La iluminarea UV (laser), răspunsul fotodetectorului cu contacte hibride, pentru tensiuni cuprinse între 0-15 V, are un caracter similar cu dependența fotocurentului de tensiune pentru fotodetectorii în baza de ZnSe cu contacte Cr(Au) sau Ni(Au). Sensibilitatea maximă este de 0,58 A W<sup>-1</sup> la 15 V (325 nm). A fost stabilit că dependența detectivității de tensiunea aplicată are o formă de V, valoarea maximă fiind de ~ 5,49 × 10<sup>10</sup> cm Hz<sup>1/2</sup> W<sup>-1</sup> la 15 V.

Efectul dopării de n-tip a colectorului asupra diagramei energetice a benzii de conducție și asupra spectrului energetic al excitonilor pentru structurile cuantice polare c-plane Al<sub>0,30</sub>Ga<sub>0,70</sub>N/GaN cu o singură groapă de potențial (QW) și bariere cuantice duble (QBs) au fost studiate numeric. Structura pe straturi are următoarea configurație (începând enumerarea cu emitorul): 100 nm GaN (emitter)/10 nm UID GaN (spacer)/ 2 nm Al<sub>0,30</sub>Ga<sub>0,70</sub>N (QB)/3 nm GaN (QW)/ 2 nm Al<sub>0,30</sub>Ga<sub>0,70</sub>N (QB)/ 10 nm UID GaN (spacer)/ 100 nm GaN (collector). Pentru o astfel de structură a fost determinat că creșterea nivelului de dopare a colectorului de la 1×10<sup>18</sup>

$\text{cm}^{-3}$  la  $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  rezultă în îngustarea barierei (induse de polarizare) a colectorului, de la ~ 50 nm la 10 nm și mărește coeficientul de transmisie a barierei la tunelarea rezonantă.

Efectul dopării de n-tip a colectorului asupra diagramei energetice a benzii de conducție și asupra spectrului energetic al excitonilor pentru structurile cuantice polare c-plane  $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}/\text{GaN}$  cu două gropi de potențial cuantice (QW) și bariere cuantice triple (QB) au fost cercetate numeric. Structura pe straturi are următoarea configurație (începând enumerarea cu emitorul): 100 nm GaN (emitter)/10 nm UID GaN (spacer)/ 2nm  $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$  (QB)/3nm GaN (QW)/2nm  $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$  (QB)/ 3nm GaN (QW)/ 2nm  $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$  (QB)/ 10 nm UID GaN (spacer)/100 nm GaN (collector). Pentru o astfel de structură a fost determinat că la doparea n-tip a colectorului de  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , primul nivel rezonant de energie este estimat de ~ 0,24 eV.

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

### **Lista lucrărilor științifice, științifico-metodice și didactice publicate în anul de referință în cadrul proiectului din Programul de Stat MATERIALE ȘI STRUCTURI MULTIFUNCIONALE PENTRU DETECTAREA RADIĂȚILOR ELECTROMAGNETICE**

**1. Monografii** (recomandate spre editare de consiliul științific/senatul organizației din domeniile cercetării și inovării)

1.1. monografii internaționale

1.2. monografii naționale

**2. Capitle în monografii naționale/internaționale**

2.1. SIRKELI, V.P., HARTNAGEL, H.L. ZnO for infrared and terahertz applications. In: G. Korotcenkov (Series Ed.), K. Awasthi (Ed.), *Nanostructured Zinc Oxide: Synthesis, Properties and Applications*. Amsterdam: Elsevier, 2021. pp. 639-654. ISSN 978-0-12-818900-9. DOI: 10.1016/B978-0-12-818900-9.00015-2. Accesibil pe Internet: URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128189009000152>

**3. Editor culegere de articole, materiale ale conferințelor naționale/internaționale**

**4. Articole în reviste științifice**

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

4.1.1. COCEMASOV, A., BRINZARI, V., JEONG, D.-G., KOROTCENKOV, Gh., VATAVU, S., LEE, J.-S., NIKA, D.L. Thermal transport evolution due to nanostructural transformations in Ga-doped indium-tin-oxide thin films. In: *Nanomaterials*. 2021, vol.11, nr.5, pp.1126 (14p.). EISSN 2079-4991. DOI: 10.3390/nano11051126. URL: <https://doi.org/10.3390/nano11051126> (IF 5,346)

4.1.2. SUSHKEVICH, K., GONCEARENCO, E.; NEDEOGLO, N.; NEDEOGLO, D. Photoluminescence of ZnSe simples doped with antimony and iodine. In: *Physica B: Physics of Condensed Matter*. 2021, vol. 602, p.412466 (p.). ISSN: 0921-4526. DOI: 10.1016/j.physb.2020.412466. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921452620304683> (IF 2,436)



4.2. în alte reviste din străinătate recunoscute

4.3. în reviste din Registrul National al revistelor de profil, cu indicarea categoriei

### **Categoria B**

4.3.1. SIRKELI, V., NEDEOGLO, N., NEDEOGLO, D., YILMAZOGLU, O., HAJO, A., PREU, S., KÜPPERS, F., HARTNAGEL, H. ZnSe-based solar-blind ultraviolet photodetectors with different schottky contact metals. In: *Studia Universitatis Moldaviae (Seria Științe Exacte și Economice)*. 2021, nr. 2(142), pp. 59-67. ISSN 1857-2073. DOI: 10.5281/zenodo.5094718. URL: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.5094718>

4.3.2. BOTNARIUC, V., GORCEAC, L., COVAL, A., VATAVU, S., CINIC, B., ROTARU, C., RAEVSCHI, S. Dispozitive din fosfură de indiu bazate pe efectul fotovoltaic. In: *Studia Universitatis Moldaviae (Seria Științe Exacte și Economice)*. 2021, nr. 2(142), pp. 14-18. ISSN 1857-2073. DOI: 10.5281/zenodo.5094770. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5094770>

4.4. în alte reviste naționale

## **5. Articole în culegeri științifice naționale/internaționale**

5.1. culegeri de lucrări științifice editate peste hotare

5.2. culegeri de lucrări științifice editate în Republica Moldova

## **6. Articole în materiale ale conferințelor științifice**

6.1. în lucrările conferințelor științifice internaționale (peste hotare)

6.1.1. HARTNAGEL, H.L., SIRKELI, V.P., ACEDO, P. THz Spectroscopy by Narrow Spectral Emission of Quantum Cascade Lasers for Medical Applications. In: *44th International Semiconductor Conference (CAS 2021), Proceedings*. 6-8 October 2021, Bucharest, Romania. (in press)

6.2. în lucrările conferințelor științifice internaționale (Republica Moldova)

6.2.1. SIRKELI, V.P. Recent advances in terahertz technology for security and biomedical applications. In: *Materialele Conferinței științifice internaționale "Abordări inter/transdisciplinare în predarea științelor reale, (concept STEAM)"*. vol. 2, 29-30 octombrie 2021. Chișinău, Republica Moldova: Universitatea de Stat din Tiraspol, 2021, pp. 82-88. ISBN 978-9975-76-358-5.

6.3. în lucrările conferințelor științifice naționale cu participare internațională

6.3.1 SIRKELI, V.P., NEDEOGLO, N.D., NEDEOGLO, D.D., YILMAZOGLU, O., HAJO, A.S., PREU, S., KÜPPERS, F., HARTNAGEL, H.L. ZnSe-based ultraviolet photodetectors with hybrid Ag-nanowire and Ni/Au contacts. In: *Conferința științifică națională cu participare internațională "Integrare prin cercetare și inovare" Științe ale naturii și exacte: Rezumate ale comunicărilor*, 10-11 noiembrie 2021. Chișinău: Universitatea de Stat din Moldova, CEP USM, 2021, pp.190-193-209. ISBN 978-9975-152-48-8.

6.4. în lucrările conferințelor științifice naționale

## **7. Teze ale conferințelor științifice**

7.1. în lucrările conferințelor științifice internaționale (peste hotare)

- 7.1.1. VATAVU, S., ROTARU, C., CHOUBRAC, L., ANTONIUC, C., UNOLD, T., RUSU, M. Electronic properties of CdS/TCO structures by Kelvin Probe and Photoelectron Yield Spectroscopy. In: *European Materials Research Society (EMRS-2021) Spring Meeting Symposium A: Thin film chalcogenide photovoltaic materials*, May 31- June 01, 2021, Strasbourg, France (online conference – *oral presentation*). URL: <https://www.european-mrs.com/thin-film-chalcogenide-photovoltaic-materials-emrs-0>
- 7.1.2. SPOIALĂ, D., NAROLSCHI, Ig., SHAPOVAL, O., BELENCIUC, A., ROTARU, C., ANTONIUC, C., VATAVU, S. Ga<sub>2</sub>S<sub>3</sub> thin films by Close-Spaced Sublimation for Photovoltaic and Detector applications. In: *European Materials Research Society (EMRS-2021) Spring Meeting Symposium A: Thin film chalcogenide photovoltaic materials*, May 31- June 01, 2021, Strasbourg, France (online conference – *poster presentation*). URL: <https://www.european-mrs.com/thin-film-chalcogenide-photovoltaic-materials-emrs-0>
- 7.2. în lucrările conferințelor științifice internaționale (Republica Moldova)
- 7.3. în lucrările conferințelor științifice naționale cu participare internațională
- 7.3.1. RAEVSCHI, S., GORCEAC, L., BOTNARIUC, V., CHETRUȘ, P., GAUGAȘ, P., VATAVU, S. Preparation of ZnO/Si structures by hydrothermal method for photovoltaic and highpower. In: *Conferința științifică națională cu participare internațională “Integrare prin cercetare și inovare” Științe ale naturii și exacte: Rezumate ale comunicărilor*, 10-11 noiembrie 2021. Chișinău: Universitatea de Stat din Moldova, CEP USM, 2021, pp.214. ISBN 978-9975-152-48-8.
- 7.3.2. КЛЮКАНОВ, А., НИКА, Д., ВАТАБУ., С. Нелинейное уравнение шредингера статистической физики. In: *Conferința științifică națională cu participare internațională “Integrare prin cercetare și inovare” Științe ale naturii și exacte: Rezumate ale comunicărilor*, 10-11 noiembrie 2021. Chișinău: Universitatea de Stat din Moldova, CEP USM, 2021, pp.207-209. ISBN 978-9975-152-48-8.

7.4. în lucrările conferințelor științifice naționale

**8. Alte lucrări științifice** (recomandate spre editare de o instituție acreditată în domeniu)

8.1. cărți (cu caracter informativ)

8.2. enciclopedii, dicționare

8.3. atlase, hărți, albume, cataloage, tabele etc. (ca produse ale cercetării științifice)

**9. Brevete de invenții și alte obiecte de proprietate intelectuală, materiale la saloanele de invenții**

- 9.1. RAEVSCHI, S., GORCEAC, L., BOTNARIUC, V. Procedeu de obținere a straturilor de p-GaN. Hotărârea nr.9852 din 2021.08.06 de ACORDARE a BREVETULUI de invenție.

**10. Lucrări științifico-metodice și didactice**

10.1. manuale pentru învățământul preuniversitar (aprobate de ministerul de resort)

10.2. manuale pentru învățământul universitar (aprobate de consiliul științific /senatul instituției)

10.3. alte lucrări științifico-metodice și didactice

## 11. Prezentări la saloane de inventică

1. BOTNARIUC, S., GORCEAC, L., CINIC, B., VATAVU, S., COVAL, A., KETRUSH, P., MOLDOVANU, S., RAEVSCHI, S. Devices with indium phosphide p-n junctions. **MEDALIE DE AUR** (In: *Salonul Internațional al Cercetării Științifice, Inovării și Inventicii PRO INVENT, ediția a XIX-a*, 20-22 octombrie 2021, Cluj-Napoca, ROMANIA)
2. BOTNARIUC, V., GORCEAC, L., CINIC, B., VATAVU, S., COVAL, A., RAEVSCHI, S., CHETRUȘ, P.I., MOLDOVANU, S. Devices with indium phosphide p-n junctions. **Diplomă de excelență, MEDALIE DE ARGINT** (In: *Salonul internațional de invenții "INVENTICA"*, 23-25 iunie, 2021, Iași, ROMANIA)
3. GHILEȚCHII, Gh. GI-XRD în analiza straturilor subțiri semiconductoare. **MEDALIE DE AUR** (In: *The V th International Fair of Innovation and Creative Education for Youth (ICE-USV)*, May, 28 - 29, 2021, Suceava, ROMANIA)
4. GORCEAC, L., BOTNARIUC, V., CINIC, B., VATAVU, S., COVAL, A., RAEVSCHI, S., CHETRUS, P., MOLDOVANU, S. Devices with indium phosphide p-n junctions. **Diplomă, MEDALIE DE ARGINT** (In: *Salonul Internațional EUROINVENT*, 20-22 mai, 2021, Iași, ROMANIA)

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

Au fost elaborați fotodetectori UV în bază de ZnSe cu contacte hibride care pot fi utilizate în medicină pentru UV Tomography. Detectorii de radiații ionizante în baza semiconductorilor  $A^2B^6$  pot fi servi ca o alternativă pentru detectorii de Si folosiți în tomografie, având o perioadă de exploatare cu mult mai mare, micșorându-se costurile de întreținere a echipamentelor. Au fost obținute și investigate noi structuri multistrat  $Ag/(As_2S_3)_{(0,90)}(SnSe)_{(0,10)}$  și  $Ag/(As_2S_3)_x(Bi_2Se)_{1-x}/(As_2S_3)_xSn_{1-x}$ , care fac posibilă înregistrarea imaginilor în VIS și sub acțiunea razelor X. Fotodetectoarele în baza heterojoncțiunilor nCdS, nZnO/pInP au rezistență sporită de degradare la influența radiației corpusculare (fluxuri de electroni, protoni) și perspectivă de aplicare la detectarea radiației în ultraviolet. Straturile nanodimensionale de ZnO depuse prin metoda cvasi hidrotermală au efect de barieră la difuzia siliciului din substrat, permit obținerea structurilor GaN/Si prin metoda HVPE, GaN fiind o componentă importantă a electronicii dispozitivelor de putere mare.

8. Infrastructura de cercetare utilizată în cadrul proiectului

La realizarea obiectivelor proiectului a fost utilizată infrastructura Laboratorului de Cercetări Științifice Fizica Semiconductorilor și Dispozitivelor [https://cercetare.usm.md/wp-content/uploads/LCS\\_Fizica\\_Semiconductorilor\\_20\\_20.pdf](https://cercetare.usm.md/wp-content/uploads/LCS_Fizica_Semiconductorilor_20_20.pdf) și a Centrului Regional Interdisciplinar Științifico-Educațional pentru Studiul Materialelor Avansate (CaRISMA) [https://cercetare.usm.md/wp-content/uploads/Pasaport\\_CaRISMA\\_2020\\_22\\_10.pdf](https://cercetare.usm.md/wp-content/uploads/Pasaport_CaRISMA_2020_22_10.pdf) în particular:

- Utilaj pentru studiul materialelor prin intermediul cercetării difracției în raze X (difractometru de raze X Emphyrean);
- Microscop de Forță Atomică (cu modul STM) Park Systems;
- Instalație de măsurări ale fotoluminescenței în baza monocromatorului MDP-23;

- Instalație pentru măsurători ale transmisiei peluculelor semiconductoare Cary 60 UV-VIS;
- Instalație de măsurare a puterii radiațiilor în domeniul VIS-IR;
- Instalație pentru măsurarea dependențelor curent tensiune și capacitatefrecvență-tensiune ale heterojoncțiunilor și dispozitivelor semiconductoare Keithley 4200 SCS;
- Instalație pentru determinarea parametrilor electrici și fotoelectrici ai compușilor semiconductor;
- Computer Desktop dedicat efectuării simulărilor proprietăților fizice ale structurilor semiconductoare și dispozitivelor în baza lor;
- Instalație pentru măsurarea distribuției spectrale ale randamentului cuantic extern;
- Instalație IV-T;
- Aparat pentru testarea caracteristicilor dispozitivelor semiconductoare JI2-56;
- Microscop metalografic cu polarizare pentru cercetarea morfologiei și grosimii straturilor semiconductoare MM500T;
- Instalație pentru măsurarea distribuției spectrale a fotosensibilității materialelor semiconductoare;
- Instalație pentru măsurarea distribuției spectrale a recombinării radiative în materialele semiconductoare;
- Instalația pentru cercetarea fenomenelor cinetice;
- Instalație pentru purificare prin topirea zonală;
- Instalație pentru cercetarea celulelor fotovoltaice în baza heterojoncțiunilor;
- Instalație pentru măsurarea dependențelor spectrale ale reflexiei optice pe baza monocromatorului MДP-2M;
- Instalații tehnologice în baza instalațiilor de vid de tipul:
  - BYII-4, BYII-5, VBH-2, VBH-73, VBH63M;
  - pentru prepararea straturilor subțiri micro și nanocristaline ale compușilor semiconductori A2B6, A3B5 și a compușilor ternari ale acestora și pentru prepararea straturilor metalelor (Cu, Ni, Al, Mo, In, Ag, ș.a.) pentru contactele electrice ale dispozitivelor semiconductoare prin metodele: evaporare termică, pulverizare magnetron, spray pyrolysis, CSS, HWT, flash evaporation ș.a.;
- Cuptor pentru creșterea cristalelor prin metoda Bridgman; Cuptoare pentru creșterea cristalelor prin metoda reacțiilor chimice de transport și pentru efectuarea tratamentului termic cu rotație; Cuptoare pentru sinteza/creșterea cristalelor și pentru efectuarea tratamentului termic fără rotație;
- Cuptor electric mic cu rotație pentru tratament termic;
- Cuptor electric mic fără rotație pentru tratament termic;
- Instalație de fabricare a fiolelor pentru creșterea cristalelor;
- Instalatie automatizata pe baza microcalculatorului pentru măsurarea și procesarea spectrelor de transmisie KCBY-23;
- Microscop electronic cu baleiaj și microanalizator PЭМП-4;
- Instalații tehnologice pentru prepararea straturilor epitaxiale a compușilor A3B5 din faza gazoasă (metoda HVPE);
- Instalație tehnologică pentru prepararea straturilor epitaxiale prin metoda volumului cvasiînchis;
- Instalație tehnologică pentru depunerea straturilor prin metoda spray pyrolysis;

- Instalație de studiu al proprietăților luminescente ale semiconductorilor și dispozitivelor semiconductoare;
- Instalații tehnologice pentru prepararea straturilor subțiri monocristaline prin metoda epitaxiei din fază cu vapori;
- Instalație tehnologică pentru depunere prin metoda magnetron a metalelor în baza instalației de vid ВУП-5;
- Instalații pentru măsurări optice și înregistrarea informației optice, hologramelor și interferogramelor;
- Instalație computerizată pentru măsurarea puterii radiației optice monocromatice PM100USB ThorLabs;
- Instalație în baza ВУП-5 pentru obținerea straturilor subțiri de semiconductori calcogenici pe baza de As-S-Se dopate cu Sn, Te, Fe;
- Echipament pentru cercetarea dispozitivelor în domeniile de radiofrecvență și microunde
- Instalație pentru studierea efectelor galvanomagnetice;
- Instalații și echipament tehnic pentru confecționarea și testarea dispozitivelor optoelectronice;
- Instalație pentru spectroscopia materialelor semiconductoare;
- Instalație pentru prelucrarea plăcilor și peliculelor fotografice;
- Spectrometru FTIR Jasco-6300;
- Spectrometru SPECORD 75 IR;
- Instalație pentru analiza spectrală atomică emisională pe baza de Spectrograf ДФС-8;
- Spectrofotometru SPECORD M40;
- Instalație pentru spectroscopie Raman;
- Sistem de depunere magnetron în vid înalt a peliculelor subțiri oxidice 01НН–7–006 «Оратория 5».

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

1. Institutul de Fizică Aplicată
2. Universitatea Tehnică a Moldovei
3. Grupurile de cercetare din cadrul USM în particular:
  - Laboratorul de Cercetări Științifice FIZICA ȘI INGINERIA NANOMATERIALELOR E. POKATILOV
  - Laboratorul de Cercetări Științifice FIZICA MEDIULUI ȘI MODELAREA SISTEMELOR COMPLEXE

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

1. Institut fur Mikrowellentechnik und Photonik, Technische Universitaet Darmstadt, Germania
2. Helmholtz Zentrum Berlin fuer Materialien und Energie GmbH, Berlin, Germania
3. National Institute for Lasers, Plasma and Radiation Physics, Magurele, Romania
4. National Institute of Materials Physics, Magurele, Romania
5. Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen, Germania

## 11. Dificultățile în realizarea proiectului

În legătură cu pandemia cauzată de coronavirus-ul COVID-2019 s-au înregistrat 3 decese ale cercetătorilor titulari (3 unități) precum și îmbolnăvirea a altor câțiva (tratați cu succes) ce a rezultat în perturbarea esențială a activităților de cercetare planificate în țară cât și peste hotare.

## 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 (Opțional) se va prezenta separat (conform modelului) pentru:*

- Manifestări științifice internaționale (în străinătate)
- Manifestări științifice internaționale (în Republica Moldova)
- Manifestări științifice naționale
- Manifestări științifice cu participare internațională

## 13. Aprecierea și recunoașterea rezultatelor obținute **în proiect** (premiu, medalii, titluri, alte aprecieri).

1. BOTNARIUC, S., GORCEAC, L., CINIC, B., VATAVU, S., COVAL, A., KETRUSH, P., MOLDOVANU, S., RAEVSCHI, S. **MEDALIE DE AUR** (In: *Salonul Internațional al Cercetării Științifice, Inovării și Inventicii PRO INVENT*, ediția a XIX-a, 20-22 octombrie 2021, Cluj-Napoca, ROMANIA)
2. BOTNARIUC, V., GORCEAC, L., CINIC, B., VATAVU, S., COVAL, A., RAEVSCHI, S., CHETRUS, P.I., MOLDOVANU, S. **Diplomă de excelență, MEDALIE DE ARGINT** (In: *Salonul internațional de invenții "INVENTICA"*, 23-25 iunie, 2021, Iași, ROMANIA)
3. GHILEȚCHII, Gh. **MEDALIE DE AUR** (In: *The V th International Fair of Innovation and Creative Education for Youth (ICE-USV)*, May, 28 - 29, 2021, Suceava, ROMANIA)
4. GORCEAC, L., BOTNARIUC, V., CINIC, B., VATAVU, S., COVAL, A., RAEVSCHI, S., CHETRUS, P., MOLDOVANU, S. **Diplomă, MEDALIE DE ARGINT** (In: *Salonul Internațional EUROINVENT*, 20-22 mai, 2021, Iași, ROMANIA)

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

- Emisiuni radio/TV de popularizare a științei
- Articole de popularizare a științei

## 15. Teze de doctorat / postdoctorat susținute și confirmate în anul 2021 de membrii echipei proiectului

1. Sprincean Veaceslav, "Proprietățile optice și fotoelectrice ale nanocompozitelor din sulfura de galiu/selenura de galiu - oxid propriu" / Teză de doctorat, conducător Caraman Mihail, dr. hab. prof. univ.; consultant științific Tighineanu Ion, dr. hab. prof. univ. academician.

**16. Materializarea rezultatelor obținute în proiect:**

- A fost optimizată tehnologia de depunere a semiconductorilor oxidici folosindu-se tehnologia dispozitivului de preparare a straturilor semiconductoare subțiri prin reactive magnetron sputtering;
- A fost optimizată și montată instalația asamblată în cadrul proiectului pentru înregistrarea imaginilor în raze X pe medii fotosensibile ale sistemului As-Se-S.

**17. Informație suplimentară referitor la activitățile membrilor echipei în anul 2021**

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

Nedeoglo Dmitrii / Consiliul de susținere / 21.09.2021 / membru

Nedeoglo Dmitrii / Comisia de susținere a tezelor de master / iunie 2021 / membru

Nedeoglo Dmitrii / Comisia de susținere a tezelor de licență / iunie 2021 / membru

Sirkeli Vadim / Comisia de susținere a tezelor de master / iunie 2021 / membru

Sirkeli Vadim / Comisia de susținere a tezelor de licență / iunie 2021 / membru

Vatavu Sergiu / Comisia de susținere a tezelor de master / iunie 2021 / membru

Vatavu Sergiu / Comisia de susținere a tezelor de licență / iunie 2021 / membru

Sprincean Veaceslav / Comisia de susținere a tezelor de licență / iunie 2021 / membru

Nicorici Valentina / Comisia de susținere a tezelor de master / iunie 2021 / membru

Nicorici Valentina / Comisia de susținere a tezelor de licență / iunie 2021 / membru

Dmitroglu Liliana / Comisia de susținere a tezelor de master / iunie 2021 / membru

Dmitroglu Liliana / Comisia de susținere a tezelor de licență / iunie 2021 / membru

Caraman Mihail / Comisia de susținere a tezelor de master / iunie 2021 / membru

Caraman Mihail / Comisia de susținere a tezelor de licență / iunie 2021 / membru

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

reviste naționale:

Nicorici Valentina / Studia Universitatis Moldaviae / redactor șef adjunct

Nedeoglo Dmitrii / Studia Universitatis Moldaviae / membru al consiliul academic de redacție

Caraman Mihail / Studia Universitatis Moldaviae / membru al consiliul academic de redacție

Vatavu Sergiu / Studia Universitatis Moldaviae / membru al consiliul academic de redacție

Cliucanov Alexandr / Studia Universitatis Moldaviae / membru al consiliul academic de redacție

Sirkeli Vadim / Studia Universitatis Moldaviae / recenzent

Nedeoglo Dmitrii / Moldavian Journal of the Physical Sciences / membru al consiliul academic de redacție

Vatavu Sergiu / Moldavian Journal of the Physical Sciences / membru al consiliul academic de redacție

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

Structuri multistrat  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_{0,99}(\text{Bi}_2\text{Se}_3)_{0,01}$ ,  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_{(0,90)}(\text{SnSe})_{(0,10)}$  și  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_x(\text{Bi}_2\text{Se})_{1-x}/(\text{As}_2\text{S}_3)_x\text{Sn}_{1-x}$  au fost obținute pe substraturi de safir pentru studierea difuziei Ag sub acțiunea radiației X (5-50 keV, spectrul integral). Mărirea transmisiei ca urmare a difuziei Ag în stratul semiconductor sub acțiunea razelor X este de: 1,4% pentru structura  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_{(0,90)}(\text{SnSe})_{(0,10)}$  absorbția dozei de 0,55 Gy, 0,9% pentru  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_{0,99}(\text{Bi}_2\text{Se}_3)_{0,01}$  la o doză de 0,68 Gy și 1,2% pentru  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_x(\text{Bi}_2\text{Se})_{1-x}/(\text{As}_2\text{S}_3)_x\text{Sn}_{1-x}$  (0,57 Gy). În zonele iradiate cu raze X, ca urmare a difuziei Ag, viteza de gravare chimică a stratului semiconductor se modifică în comparație cu zonele neiradiate, ceea ce permite vizualizarea imaginilor înregistrate cu raze X prin gravare chimică.

Au fost elaborate cicluri tehnologice optime de sinteză a monocristalelor de ZnSe prin metoda reacțiilor chimice de transport și doparea lor concomitentă cu impurități de elemente din grupa V cu utilizarea I, Br, Cl în calitate de agent transportator, precum și sinteza nanopulberilor de ZnSe prin metoda solvotermală cu doparea lor în procesul de creștere cu elemente din grupa a V-ea (N, As). A fost studiată influența dopării concomitente a monocristalelor de ZnSe cu elemente din grupele V (P, As, Sb, Bi) și a VII (Cl, Br, I) asupra formării centrelor radiative de FL. Doparea rezultă în formarea centrelor acceptoare asociative FL activatoare de tipul  $(\text{As}_e^{\text{V}}\text{B}_{\text{Se}}^{\text{VII}})$ , cu maxime localizate în regiunea 570-580 nm. A fost propus un mecanism de formare a benzii radiative noi.

S-a demonstrat eficacitatea sporită a unor solvenți (etanol, propanol) pentru acetatul de zinc aplicat la obținerea straturilor de nucleație de ZnO pe n-Si(111) prin metoda cvasi hidrotermală în vederea obținerii barierelor pentru GaN.

Au fost preparate straturi monofazice de  $\alpha\text{-Ga}_2\text{S}_3$  prin metoda CSS și determinată evoluția structural morfologică în funcție de parametrii tehnologici.

Condițiile de preparare a straturilor subțiri A2B6 influențează puternic structura și proprietățile suprafețelor acestora. Mărirea temperaturii suportului (CdS/ZnO:Al/Sticlă) duce la mărirea dimensiunii medii a cristalitelor (55 nm) și la micșorarea tensiunilor mecanice în straturile subțiri. Concentrația maximă a purtătorilor de sarcină în straturile de CdS este de  $7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  pentru substraturile de ZnO:Al.

Aplicarea tehnologiilor HVPE, depunerea din aerosol, metaloorganică, magnetron și spray piroliză a permis prepararea fotodectoarelor cu sensibilitate sporită în intervalul spectral cu 400-950 nm, cu maxim al sensibilității la 850 nm.

Fotodetectori UV în bază de ZnSe cu structura metal-semiconductor-metal, având contacte hibride cu folosirea nanofirelor de Ag și contactelor din Ni/Au, au fost preparate și cercetate la tensiune de până la 15 V. Dispozitivul are sensibilitate după curent maximă de  $0,58 \text{ A W}^{-1}$  la 15 V (325 nm). Dependența detectivității de tensiunea aplicată are formă de V. Detectivitatea maximă este de  $5,49 \times 10^{10} \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$  la 15 V.

Mărirea concentrației de dopare a regiunii colectorului de la  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  până la  $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  în structuri cuantice polare c-plane  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  cu o singură groapă de potențial și bariere cuantice duble (Al,  $x=0,30$ ) rezultă în micșorarea lățimii barierei induse de la ~ 50 nm la 10 nm și contribuie la mărirea ratei proceselor de tunelare rezonantă. Doparea n-tip a colectorului ( $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) în structuri cuantice polare c-plane  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  cu două gropi de potențial cuantice și bariere cuantice triple (Al,  $x=0,25$ ) rezultă în energia rezonantă ~ 0,24 eV.



Ag diffusion in the semiconductor layers as a result of X-ray irradiation (5-50 keV integral spectrum) of the multilayer  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_{0,99}(\text{Bi}_2\text{Se}_3)_{0,01}$ ,  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_{(0,90)}(\text{SnSe})_{(0,10)}$  and  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_x(\text{Bi}_2\text{Se})_{1-x}/ (\text{As}_2\text{S}_3)_x\text{Sn}_{1-x}$  structures on sapphire has been investigated. Ag diffusion in the semiconductor layer as a result of X-rays increases optical transmission by: 1,4% for the  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_{(0,90)}(\text{SnSe})_{(0,10)}$  structure (absorbed dose of 0,55 Gy, 0,9% for  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_{0,99}(\text{Bi}_2\text{Se}_3)_{0,01}$  (0,68 Gy) and 1,2% for  $\text{Ag}/(\text{As}_2\text{S}_3)_x(\text{Bi}_2\text{Se})_{1-x}/ (\text{As}_2\text{S}_3)_x\text{Sn}_{1-x}$  (0,57 Gy). The chemical etching speed of the irradiated area of semiconductor changes with respect to the non-irradiated area, which allows the visualization of recorded X-ray images by chemical etching.

Technology and optimal synthesis modes for ZnSe single crystals by chemical transport reactions as well as co-doping with V-group elements with the use of I, Br, Cl as a transport agent, are developed. ZnSe nanopowders synthesis by solvothermal method and the doping with V-group elements (N, As) in the growth process are elaborated. The influence of co-doping of ZnSe single crystals with V-group elements (P, As, Sb, Bi) and VII-group elements (Cl, Br, I) on the formation of radiative centres and photoluminescence (PL) spectra has been studied. It has been established that co-doping with these elements leads to the formation of  $(\text{As}_e^{\text{V}}\text{B}_{\text{Se}}^{\text{VII}})$  associative acceptors of activator PL responsible for new wide PL bands (peak intensity at 570-580 nm).

The increased efficiency of selected solvents (ethanol, propanol) for zinc acetate for preparation of ZnO nucleation layers onto Si(111) by use of quasi hydrothermal method, targeting their application as barriers for GaN, has been proven.

Single phase, CSS deposited,  $\alpha$ - $\text{Ga}_2\text{S}_3$  have been prepared. The structural and morphological properties evolution as a result of technological parameters variation has been established.

The preparation conditions for A2B6 thin films are highly affecting their structural and surface properties. The higher the substrate temperature is ( $\text{CdS}/\text{ZnO}:\text{Al}/\text{Glass}$ ) the higher the average grains sizes are (55 nm) and the less mechanical tensions are formed in the film. Maximum charge carrier concentration in CdS is of  $7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  for ZnO:Al substrates. The use of HVPE, aerosol, metalorganics, magnetron sputtering and spray pyrolysis technologies results in preparation of high sensitivity photodetectors in 400-950 nm spectral range, having peak sensitivity at 850 nm.

ZnSe-based metal-semiconductor-metal UV photodetector with hybrid Ag-nanowire and Ni/Au contacts have been prepared and investigated in 15 V range. The device has maximum responsivity of  $0,58 \text{ A W}^{-1}$  at 15 V (325 nm). The dependence of detectivity vs. applied bias voltage has a V-shape behavior. The maximum detectivity is  $5,49 \times 10^{10} \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$  at 15 V.

Doping level increase of collector contact from  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  to  $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  in polar c-plane  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  quantum structures with one quantum well and double quantum barriers (Al,  $x=0,30$ ) results in decreasing polarization-induced collector barrier width from  $\sim 50$  nm to 10 nm and enhances resonant tunneling. n-type doping of collector ( $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) in polar c-plane  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  quantum structures and with two quantum wells and triple quantum barriers (Al,  $x=0,25$ ) results in resonance energy  $\sim 0,24 \text{ eV}$ .

**19. Recomandări, propuneri**

Elaborarea acțiunilor efective de atragere – susținere – cointeresare a tinerilor în cercetarea științifică și obținerea de titluri științifice ar ameliora deficitul de cadre de calitate înaltă atât în educație, cât și în cercetare.

Conducătorul de proiect \_\_\_\_\_/ VATAVU Sergiu, dr. conf. cerc.

Data: \_\_\_\_\_

LS

**Executarea devizului de cheltuieli, conform anexei nr. 2.3 din contractul de finanțare nr. 149-PS din data de 04.01.2021**

**Cifrul proiectului: 20.80009.5007.12**

<b>Cheltuieli, mii lei</b>				
<b>Denumirea</b>	<b>Cod</b>		<b>Anul de gestiune 2021</b>	
	<b>Eco (k6)</b>	<b>Aprobat</b>	<b>Modificat +/-</b>	<b>Precizat</b>
Remunerarea muncii angajaților conform statelor	211180	2204,5		2204,5
Contribuții de asigurări sociale de stat obligatorii	212100	529,1		529,1
Servicii editoriale	222910	16,0	-16,0	
Servicii neatribuite altor aliniate	222990	10,5		10,5
Materiale pentru scopuri didactice, științifice și alte scopuri	335110	37,9	+16,0	53,9
Procurarea materialelor de uz gospodăresc și rechizitelor de birou	336110	2,0		2,0
<b>Total</b>		<b>2800,0</b>		<b>2800,0</b>

Conducătorul organizației \_\_\_\_\_ / (Șarov Igor)

Contabil șef \_\_\_\_\_ / (Cojocaru Liliana)

Conducătorul de proiect \_\_\_\_\_ / (Vatavu Sergiu)

Data: \_\_\_\_\_

L.Ș.

## Componența echipei proiectului

Cifrul proiectului: 20.80009.5007.12

<b>Echipea proiectului conform contractului de finanțare (la semnarea contractului)</b>						
Nr.	Nume, prenume (conform contractului de finanțare)	Anul nașterii	Titlul științific	Norma de muncă conform contractului	Data angajării	Data eliberării
1.	Vatavu Sergiu	1977	doctor	0,5	04.01.2021	
2.	Chirița Arcadi	1964	doctor	0,5	04.01.2021	Transfer pe 0,25 un. din 01.07.2021
3.	Sirkeli Vadim	1978	doctor	0,5	04.01.2021	
4.	Narolschi Igor	1968		0,5	04.01.2021	
5.	Rotaru Corneliu	1964		1	04.01.2021	
6.	Nedeoglo Natalia	1974	doctor	0,5	04.01.2021	
7.	Spoială Dorin	1968		1	04.01.2021	
8.	Sprincean Veaceslav	1980		0,25	04.01.2021	31.08.2021
9.	Nedeoglo Dmitrii	1942	doctor habilitat	1	04.01.2021	
10.	Cliucanov Alexandr	1944	doctor habilitat	0,75	04.01.2021	Transfer pe 1 un. din 01.05.2021
11.	Caraman Mihail	1941	doctor habilitat	0,5	04.01.2021	
12.	Sușchevici Constantin	1943	doctor	1	04.01.2021	
13.	Antoniuc Constantin	1949		1	04.01.2021	24.04.2021
14.	Șișianu Sergiu	1966	doctor habilitat	0,5	04.01.2021	Transfer pe 1 un. din 01.05.2021
15.	Gorceac Leonid	1942	doctor	1	04.01.2021	
16.	Iurieva Tatiana	1966		0,5	04.01.2021	
17.	Goglidze Tatiana	1947		1	04.01.2021	
18.	Botnariuc Vasile	1945	doctor	1	04.01.2021	
19.	Raevschi Simion	1941	doctor	1	04.01.2021	
20.	Nasedchina Nadejda	1947		1	04.01.2021	
21.	Prilepov Vladimir	1938	doctor	1	04.01.2021	
22.	Coval Andrei	1947	doctor	1	04.01.2021	24.05.2021
23.	Cinic Boris	1943		1	04.01.2021	18.03.2021
24.	Chetruș Petru Ion	1944	doctor	0,5	04.01.2021	
25.	Gaugaș Petru	1946	doctor	0,5	04.01.2021	
26.	Nicorici Valentina	1952	doctor	0,5	04.01.2021	
27.	Chetruș Petru Mihail	1944	doctor	0,5	04.01.2021	
28.	Dmitroglo Liliana	1978	doctor	0,5	04.01.2021	
29.	Palamarciuc Oleg	1985	doctor	1	04.01.2021	
30.	Palamarciuc Tatiana	1984	doctor	0,25	04.01.2021	Transfer pe

						0,75 un. din 01.05.2021
31.	Bercu Elena	1975		0,5	04.01.2021	
32.	Catruc-Inculeț Adriana	1991		0,25	04.01.2021	30.06.2021
33.	Șapoval Oleg	1963	doctor	0,25	04.01.2021	Transfer pe 0,5 un. din 01.05.2021
34.	Belenciuc Alexandr	1960	doctor	0,25	04.01.2021	Transfer pe 0,5 un. din 01.05.2021
35.	Melnițchi Iurie	1997		0,25	04.01.2021	30.06.2021
36.	Nica Xenia	1995		0,25	04.01.2021	Transfer pe 0,5 un. din 01.05.2021
37.	Ghilețchi Gheorghe	1998		0,25	01.09.2021	
38.	Varzari Alexandru	1997		0,25	01.09.2021	
39.	Buzu Piotr	1989		0,25	04.01.2021	30.06.2021
40.	Maistruc Irina	1996		0,25	04.01.2021	
41.	Sandu Mădălina	1997		0,25	04.01.2021	

Pondereea tinerilor (%) din numărul total al executorilor <b>conform contractului de finanțare</b>	24,4%
--	-------

Modificări în componența echipei pe parcursul anului 2021					
Nr.	Nume, prenume	Anul nașterii	Titlul științific	Norma de muncă conform contractului	Data angajării
1.	Șapoval Oleg	1963	doctor	1	Transfer din 01.07.2021
2.	Belenciuc Alexandr	1960	doctor	1	Transfer din 01.07.2021
3.	Leca Ludmila	1998		0,25	01.09.2021

Pondereea tinerilor (%) din numărul total al executorilor <b>la data raportării</b>	22,9%
---	-------

Conducătorul organizației \_\_\_\_\_ / (Șarov Igor)

Contabil șef \_\_\_\_\_ / (Cojocaru Liliana)

Conducătorul de proiect \_\_\_\_\_ / (Vatavu Sergiu)

Data: \_\_\_\_\_

L.Ș.