

RECEPȚIONAT
Agenția Națională pentru Cercetare
și Dezvoltare _____
_____ 2026

AVIZAT
Secția AȘM _____
_____ 2026

RAPORT ȘTIINȚIFIC FINAL
(pentru anii 2024-2025)
privind implementarea proiectului din cadrul concursului
Tineri Cercetători

Proiectul Celule solare pe bază de kesterite ca alternativă pentru sisteme agrovoltaice
Cifrul proiectului 23.70105.5007.14T
Prioritatea strategică Competitivitate economică și tehnologii inovative

Rectorul/Directorul organizației

Igor ȘAROV, dr., prof. univ.

Președintele Consiliul științific/Senat

Leonid CULIUC, dr. hab., acad.

Conducătorul proiectului

Elena HAJDEU-CHICAROȘ, dr.



Chișinău, 2026

CUPRINS:

1. Scopul proiectului depus la concurs	3
2. Obiectivele	3
3. Acțiunile planificate pentru realizarea scopului și obiectivelor	3
4. Acțiunile realizate pentru atingerea scopului și obiectivelor	4
5. Rezultatele obținute	4
6. Diseminarea rezultatelor la foruri științifice	9
7. Impactul științific, social și/sau economic al rezultatelor științifice obținute în cadrul proiectului	10
8. Colaborare la nivel național în cadrul implementării proiectului	11
9. Colaborare la nivel internațional în cadrul implementării proiectului	11
10. Dificultăți în realizarea proiectului: financiare, organizatorice, legate de resursele umane	11
11. Recomandări, propuneri	11
12. Rezumatul activității și a rezultatelor obținute în proiect în limba română și în limba engleză (Anexa 1)	12
13. Lista lucrărilor științifice, publicate (Anexa 2)	14
14. Executarea devizului de cheltuieli din contractul de finanțare (Anexa 3)	15
15. Componenta echipei conform contractului de finanțare (Anexa 4)	16

1. Scopul proiectului depeș la concurs

Proiectul are ca scop înțelegerea proprietăților fundamentale ale materialelor de tip kesterit $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn},\text{Ge})(\text{S},\text{Se})_4$ de perspectivă pentru utilizare în calitate de strat absorbant în celule solare de nouă generație prin studiul avansat al acestora și aprecierea potențialului utilizării acestora în agrovoltaică, în particular pe teritoriul Republicii Moldova.

2. Obiectivele

Pentru realizarea scopului proiectului au fost inițial stabilite următoarele obiective:

1. Analiza situației generale a tehnologiilor fotovoltaice pe bază de materiale kesterite;
2. Studiul avansat al proprietăților fizico-chimice ale diferitor materiale de tip kesterit din seria $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn},\text{Ge})(\text{S},\text{Se})_4$;
3. Studiul potențialului și aprecierea avantajelor utilizării materialelor de tip $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn},\text{Ge})(\text{S},\text{Se})_4$ în calitate de strat absorbant în celule solare de nouă generație pentru aplicații în agrovoltaică în dependență de parametrii macroscopici și microscopici ai acestora, determinați în cadrul obiectivului nr. 2;
4. Crearea unei pagini web care va permite prin simulare aprecierea costurilor și suprafețelor necesare pentru dotarea cu sisteme foto/agrovoltaice pe baza diferitor tipuri de celule solare, inclusiv a celor pe bază de materiale de tip kesterit și va conține informații utile pentru cei interesați să implimenteze astfel de sisteme în Republica Moldova;
5. Modelarea unui sistem agrovoltaic pe bază de celule solare cu strat absorbant de tip $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn},\text{Ge})(\text{S},\text{Se})_4$ cu aprecierea suprafețelor necesare și costurilor în dependență de parametrii acestora;

3. Acțiunile planificate pentru realizarea scopului și obiectivelor

1. Analiza și crearea unui raport cu referire la starea actuală a tehnologiilor fotovoltaice disponibile pe bază de materiale cuaternare $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn},\text{Ge})(\text{S},\text{Se})_4$;
2. Obținerea, selectarea și pregătirea eșantioanelor pentru studiu;
3. Studiul compoziției mai multor seturi de probe din seria $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn},\text{Ge})(\text{S},\text{Se})_4$ cu diferită stare macroscopică cu ajutorul tehnologiilor EDX și AFRX;
4. Studiul structurii probelor prin metoda XRD;
5. Selectarea celor mai calitative probe conform rezultatului analizei compoziționale și structurale anterioare și definirea parametrilor tehnologici optimali care favorizează creșterea calității probelor;
6. Măsurarea spectrelor de fotoluminescență ale compușilor $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn},\text{Ge})(\text{S},\text{Se})_4$ selectați;
7. Măsurarea spectrelor Raman;
8. Analiza complexă a caracteristicilor structurale și a altor parametri corelați cu acestea în dependență de compoziția x a probelor;
9. Măsurarea proprietăților de transport și magnetotransport, prin obținerea dependențelor rezistivității de temperatură T în intervalul $T = 4-300$ K în lipsa și în prezența câmpului magnetic B ;
10. Prelucrarea și analiza rezultatelor experimentale și obținerea setului de parametri electronici caracteristici ale compușilor $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn},\text{Ge})(\text{S},\text{Se})_4$;
11. Analiza dependenței parametrilor determinați de compoziția probelor selectate;
12. Proiectarea aplicației web care va permite simularea costurilor și suprafețelor necesare pentru

- dotarea cu sisteme fotovoltaice pe baza diferitor tipuri de module fotovoltaice;
13. Modelarea unui sistem agrovoltaic cu analiza comparativă a potențialului de utilizare a modulelor fotovoltaice pe bază de kesterite; Aprecierea costurilor și suprafețelor necesare pentru dotarea unei entități agricole cu un sistem agrovoltaic.

4. Acțiunile realizate pentru atingerea scopului și obiectivelor

1. A fost realizat un raport cu descrierea situației actuale a tehnologiilor fotovoltaice disponibile pe bază de materiale cuaternare $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn,Ge})(\text{S,Se})_4$;
2. Au fost obținute seturi de probe ale compușilor $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn,Ge})(\text{S,Se})_4$;
3. Au fost obținute datele experimentale pentru caracteristicile compoziționale ale probelor;
4. Au fost selectate seturi de probe $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn,Ge})(\text{S,Se})_4$ conform calității compoziționale;
5. Au fost obținute date experimentale pentru proprietățile optice ale probelor;
6. Au fost obținute date experimentale pentru caracteristicile de transport electronic ale probelor;
7. A fost inițiată analiza și interpretarea rezultatelor experimentale ale măsurătorilor proprietăților optice și de transport ale probelor;
8. Au fost măsurate și analizate proprietățile de transport electronic ale compușilor de tip kesterit din seria $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn,Ge})(\text{S,Se})_4$.
9. A fost făcută analiza dependenței parametrilor determinați și a concentrației defectelor specifice compușilor de tip kesterit de compoziția probelor selectate;
10. A fost analizată calitatea și au fost măsurate caracteristicile de sarcină ale structurilor cu straturi subțiri de tip kesterit, obținute în cadrul proiectului.
11. S-a lucrat la proiectarea și scrierea aplicației web, precum și la acumularea datelor necesare pentru aceasta. Aplicația (cu acces public) permite simularea costurilor și a suprafețelor necesare pentru dotarea cu sisteme fotovoltaice pe baza diferitor tipuri de module fotovoltaice existente în comerț, precum și va găzdui articole de popularizare și informare din domeniul fotovoltaicii.
12. S-a lucrat asupra simulării unui sistem agrovoltaic pentru o livadă de prun cu analiza comparativă a potențialului de utilizare a modulelor fotovoltaice pe bază de kesterite, inclusiv cu estimarea suprafețelor, costurilor, eficienței și altor caracteristici.
13. S-a lucrat asupra scrierii articolelor științifice pe baza rezultatelor activității în cadrul proiectului.

5. Rezultatele obținute

Studiile pentru celule solare pe bază de kesterite au evidențiat că eficiența scăzută a acestora e cauzată în principal de prezența defectelor antisite Cu_{Zn} și a vacanțelor în aceste materiale. Acestea introduc niveluri profunde în banda intersiză, ceea ce favorizează recombinarea nedorită a purtătorilor de sarcină și reduce semnificativ tensiunea de circuit deschis (V_{oc}) a celulelor solare. De asemenea, concentrațiile mari de defecte structurale limitează densitatea purtătorilor liberi și scurtează durata lor de viață, ceea ce scade atât curentul de scurtcircuit, cât și randamentul global al celulelor solare pe bază de kesterite. Înțelegerea acestor procese este esențială pentru îmbunătățirea calității structurilor fotovoltaice cu straturi de kesterit și a progresului de mai departe în acest domeniu. Astfel, în cadrul proiectului a fost inițiată o analiză complexă a defectelor structurale din rezultatele măsurătorilor compoziționale, structurale, vibraționale și a proprietăților de transport ale probelor cu diferită compoziție și stare

macroscopică (monocristale, policristale, pulberi, straturi subțiri). Aceste studii au fost începute în primul an de realizare a proiectului și au fost continuate și la etapa a doua a acestuia.

La etapa I-a a proiectului (anul 2024) lucrările s-au concentrat asupra optimizării procedurilor tehnologice de obținere a probelor și obținerea propriu-zisă a seturilor de probe de tip kesterit din seria $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn,Ge})(\text{S,Se})_4$ cu diferită stare macroscopică – monocristale, policristale, pulberi și straturi subțiri. Probele țintă au fost straturile subțiri de o calitate cât mai înaltă. Pentru fiecare din seturile de probe obținute a fost efectuată analiza calității acestora prin măsurători ale proprietăților compoziționale (EDX, SEM), structurale (XRD), vibraționale (Raman), optice precum și au fost inițiate măsurători ale proprietăților de transport electronic ale acestora. La etapa a II-a (anul 2025) acțiunile științifice au vizat atât continuarea investigării proprietăților fundamentale (vibraționale, compoziționale, structurale și de transport) ale compușilor de tip kesterit din seria $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn,Ge})(\text{S,Se})_4$, cât și analiza integrării rezultatelor în aplicații practice — obținerea structurilor fotovoltaice pe bază de straturi subțiri de tip kesterit, dezvoltarea unui instrument web dedicat estimării, cu scop informativ, a calculelor suprafețelor, prețurilor și altor specificații tehnice pentru o instalație fotovoltaică precum și simularea unei configurării agrovoltaice pentru o livadă de prun cu aprecierea comparativă a potențialului structurilor pe bază de materiale kesterite în agrovoltaică ca înlocuitor al modulelelor pe bază de Si.

5.1. Obținerea straturilor subțiri de $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn,Ge})(\text{S,Se})_4$

Straturile subțiri au fost obținute prin pulverizarea soluției complexe cu conținut de Cu, Zn, Ge, Sn și S pe suport de sticlă. Procedul de pulverizare s-a efectuat în atmosferă de dioxid de carbon, pentru a evita oxidarea elementelor chimice ce intră în componența straturilor subțiri de kesterit. Soluția complexă era dispersată pe suportul de sticlă încălzită la temperatura de 315-320°C, presiunea gazului purtător (CO_2) fiind de 1 atmosferă în exces presiunii atmosferice normale. Rata de consum a soluției complexe a fost de circa 1 ml pe minut. Pentru a îmbunătăți calitatea cristalină a straturilor subțiri de kesterit s-a efectuat tratarea termică a straturilor în atmosferă de S_2 la temperatura de 550°C timp de 60 min. Tratarea termică a probelor a fost realizată simultan în cadrul aceluiași proces. Din analiza SEM s-a observat că dimensiunea cristalitelor în mediu nu depășea 150-250 nm. Totodată, în anumite zone puteau fi observați pori de dimensiuni mai mici decât cele ale cristalitelor. Totuși, pentru un strat de grosime mai mare, porii se suprapuneau și stratul de kesterit devenea continuu. În mod ideal, dimensiunea cristalitelor ar trebui să fie egală cu grosimea stratului depus, pentru a asigura o calitate înaltă a materialului absorbant. Era de așteptat, astfel, ca în rezultatul procesului de tratare termică să aibă loc recristalizarea tuturor straturilor subțiri, cu o creștere corespunzătoare a dimensiunii cristalelor. Acest lucru nu a avut loc, ceea ce a condus la concluzia că timpul de tratare termică era insuficient și trebuia mărit până la o valoare optimală. Astfel, pe parcursul proiectului, au fost încercate diverse metode de optimizare a procedului de depunere a straturilor subțiri pentru creșterea calității acestora – creșterea timpului de tratare termică, sulfurizarea în atmosfere de S și CO_2 , doparea cu ioni de Cd sau Ag, înlocuirea Ge cu Sn în diferite proporții, etc.

5.2. Caracterizarea compozițională și structurală

Calitatea probelor (compoziția și morfologia suprafeței) era analizată, cu ajutorul tehnologiilor EDX și SEM, la fiecare ciclu de obținere a acestora. Analiza compozițională realizată pe monocristalele și straturile subțiri de $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn,Ge})(\text{S,Se})_4$ obținute în cadrul primei

etape a proiectului (anul 2024), a confirmat variații reprezentative ale raporturilor cationice, specifice familiei kesterite. Distribuția elementelor Cu, Zn, Cd, Sn, Ge și S/Se a evidențiat atât probe cu exces ușor de cupru, cât și probe cu deficit de Zn, condiții care favorizează apariția defectelor antisite tipice acestor materiale (în special Cu_{Zn} , principalul acceptor) sau a vacanțelor de Zn. Reieșind din valorile raportului $\text{Cu}/(\text{Zn}+\text{Ge}+\text{Sn})$, pentru majoritatea probelor investigate, compoziția chimică indica un deficit de Cu iar luând în considerație valorile raportului $\text{Zn}/(\text{Ge}+\text{Sn})$ - conținutul de Zn era în exces. Astfel, compoziția chimică pentru majoritatea probelor obținute devia de la valorile stoichiometrice.

Studiul microstructurii straturilor subțiri de $\text{Cu}_2\text{ZnSn}_x\text{Ge}_{1-x}\text{S}_4$ obținute prin tehnologia spray-piroliză, analizate prin SEM, pentru trei compoziții diferite (0%Ge, 10%Ge:90%Sn, 20%Ge:80%Sn) a arătat o evoluție a morfologiei suprafeței odată cu modificarea compoziției. Astfel s-a observat că substituția controlată a Sn cu Ge în straturile subțiri de $\text{Cu}_2\text{ZnSn}_x\text{Ge}_{1-x}\text{S}_4$ influențează direct procesul de cristalizare, conducând de la o microstructură neregulată (0% Ge), la formarea unor structuri aciculare tranzitorii (10% Ge), iar în final la cristalite poliedrice bine definite și o densificare superioară a stratului (20% Ge). Această evoluție morfologică sugerează o reducere a dezordinii cationice și o creștere a calității structurale, cu potențial impact pozitiv asupra proprietăților optoelectronice ale materialului.

Deviațiile locale între compoziția nominală și cea determinată experimental au fost corelate ulterior cu parametrii transportului electronic, confirmând sensibilitatea comportamentului electronic față de ne-stoichiometrie. În unele probe, în special cele din seria $\text{Cu}_2\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{SnS}_4$, s-au observat diferențe notabile între valoarea nominală a lui x și cea obținută prin analiza XRF, ceea ce indică o redistribuție parțială a Cd în subrețelele structurale. Prin optimizarea procedeelelor de obținere a probelor încercate de către echipa proiectului (sulfurizarea în atmosferă de CO_2 , tratarea termică, doparea cu ioni de Cd sau Ag, determinarea unei concentrații optime a precursorilor care ar favoriza obținerea unei compoziții stoichiometrice în probele crescute/depuse) s-a ținut în vedere îmbunătățirea calității cristaline și micșorarea gradului de dezordine structurală. Astfel s-a obținut că o dopare moderată cu Ag sau Cd conduce la o structură mai bine ordonată, în timp ce o dopare mai mare generează apariția de faze secundare în straturile subțiri de kesterite. De asemenea, sulfurizarea în atmosferă de CO_2 favorizează o structură mai omogenă și o incorporare mai controlată a Ag până la ~10%, ceea ce o face mai adecvată pentru obținerea de filme $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4:\text{Ag}$ de calitate ridicată pentru aplicații fotovoltaice.

5.3. Proprietățile optice ale soluțiilor solide din seria $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn},\text{Ge})(\text{S},\text{Se})_4$

Pentru mai multe seturi de probe au fost obținute și analizate spectrele de absorbție, măsurate în intervalul de lungimi de undă (300-700 nm). Astfel, în domeniul energetic înalt, valorile coeficientului de absorbție al probelor ($\alpha > 10^4\text{cm}^{-1}$) indicau prezența tranzițiilor electronice directe. Respectiv au fost calculate valorile lățimii benzii interzise care se diferențiau de cele raportate în literatura de specialitate, și oscilau între 2.29 și 3.88 eV. Această discrepanță se datorează abaterii de la stoichiometrie a compoziției chimice a probelor investigate, dar și a valorii aproximative a grosimii straturilor subțiri. De asemenea s-a observat că odată cu creșterea concentrației de argint în soluțiile solide $(\text{Ag}_x\text{Cu}_{1-x})_2\text{CdGeS}_4$, lățimea benzii interzise era în descreștere, atât până la tratarea termică a probelor cât și după aceasta.

Măsurătorile de fotoluminescență nu au dat rezultate clare, întrucât semnalul fotoluminescent de la mai multe probe analizate era foarte slab, de ordinul zgomotelor.

Analiza Raman a seturilor de probe selectate a arătat lipsa fazelor secundare în acestea cu dominarea fazei kesterit în toate. Rezultatele măsurătorilor proprietăților vibraționale realizate pentru straturi subțiri de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ dopate cu Ag în diferite concentrații au arătat că acestea păstrează structura kesterit ca fază principală pentru toate concentrațiile studiate, însă ordinea structurală este influențată semnificativ atât de conținutul de Ag, cât și de atmosfera de sulfurizare. O dopare moderată (~5% Ag) conduce la o structură mai bine ordonată, în timp ce o dopare mai mare (15% Ag) generează o segregare de faze secundare. Tratarea în atmosferă de CO_2 favorizează o structură mai omogenă și o încorporare mai controlată a Ag până la ~10%, ceea ce o determină o calitate mai bună a straturilor subțiri de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ dopate cu Ag.

5.4. Analiza mecanismelor de transport electronic

Măsurarea dependenței de temperatură a rezistivității probelor a fost efectuată utilizând instalația formată dintr-un criostat cu ciclul închis cu He, un termoregulator de marcă Lake Shore și un multimetru GWInstek. Dependențele de temperatură ale rezistivității probelor au fost măsurate în intervalul de temperaturi 20 – 300 K.

Analiza proprietăților de transport și magnetotransport a arătat că toate probele investigate au prezentat o dependență activățonală a rezistivității, cu mecanisme de transport specifice semiconductorilor dezordonați. A fost confirmată prezența a două regimuri de conductibilitate dominante: conductibilitatea prin salturi pe acceptorii vecini (NNH) și conductibilitatea prin salturi cu lungime variabilă de tip Mott (VRH). Prioritatea mecanismului Mott în fața celorlalte reiese din lungimea intervalelor termice în care a fost observat. Aceste două regimuri au putut fi identificate clar în intervale distincte de temperatură, iar analiza lor a permis determinarea parametrilor fundamentali ai materialelor: energia de activare, temperatura caracteristică Mott, densitatea stărilor localizate la nivelul Fermi, raza de localizare și raportul critic al concentrației acceptorilor în raport cu pragul tranziției metal–izolator (MIT).

Pentru majoritatea probelor, valorile energiei de activare E_n au fost comparabile cu semi-lățimea benzii acceptoare W , ceea ce indică poziționarea nivelului Fermi în apropierea marginii benzii respective. Această situație este caracteristică materialelor cu un număr semnificativ de defecte acceptoare, în principal defectele Cu_{Zn} , considerate responsabile pentru proprietățile p -tip ale kesteritelor. Valorile raportului N/N_c (concentrația acceptorilor raportată la valoarea critică de la MIT) situate în intervalul 0,49 – 0,80 pentru cele mai multe probe indică apropierea de tranziția metal–izolator, un fenomen bine documentat pentru familia compușilor $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn},\text{Ge})(\text{S},\text{Se})_4$. O parte din rezultatele studiului fac subiectul manuscrisului echipei proiectului publicat în anul 2025 în jurnalul *Romanian Reports in Physics* <https://rrp.nipne.ro/IP/AP850.pdf>.

Un rezultat major al proiectului îl constituie aplicarea și extinderea unui model analitic complex pentru determinarea concentrației defectelor antisite Cu_{Zn} pornind de la datele experimentale EDX și de la dependentele transportului electronic măsurate pe parcursul etapelor I și II a proiectului. Modelul a permis separarea contribuțiilor cationilor străini (Cd, Ge) în subrețeaua de Zn, determinarea parametrilor caracteristici α , γ_1 , γ_2 , ξ_{Sn} , ξ_{Ge} , care descriu probabilitățile de ocupare a diferitelor poziții în rețeaua cristalină, diferențierea între probe cu deficit și exces de Zn, precum și evaluarea efectelor dezordinii induse termic asupra concentrației acceptorilor (în special pentru probele tratate termic).

Modelul s-a dovedit aplicabil pentru toate familiile de materiale analizate: $\text{Cu}_2\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{SnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSn}_x\text{Ge}_{1-x}\text{S}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ pulberi și straturi subțiri.

În ansamblu, el a permis identificarea cu precizie a proporției de Zn aflat în afara subrețelei sale naturale ($\approx 2 - 4\%$ pentru CZTS simplu, crescând până la $12 - 15\%$ pentru compușii cu Ge sau Cd), precum și a probabilităților de generare a vacanțelor și a defectelor antisite în diferite condiții de stoichiometrie. Aceste rezultate fac subiectul unui manuscris al echipei proiectului acceptat recent spre publicare în jurnalul *Physics of the Solid State*.

5.5. Obținerea joncțiunilor $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4/\text{CdS}$ și studiul acestora

În cadrul proiectului s-a lucrat asupra obținerii joncțiunilor $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4/\text{CdS}$ cu analiza calității straturilor de tip kesterit din componența acestora și a caracteristicilor de sarcină. Figura 1 ilustrează caracteristica de sarcină (curent-tensiune) a celei mai reușite celule solare pe bază de joncțiunea $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4/\text{CdS}$ obținută de către echipa proiectului. Caracteristica a fost măsurată sub o iluminare de 23 mW/cm^2 , generată de o sursă incandescentă. Stratul absorbant de kesterit a fost obținut prin tehnologia spray-pirroliză, iar stratul tampon CdS a fost depus utilizând metoda volumului cvasi-închis, asigurând formarea unui contact uniform.

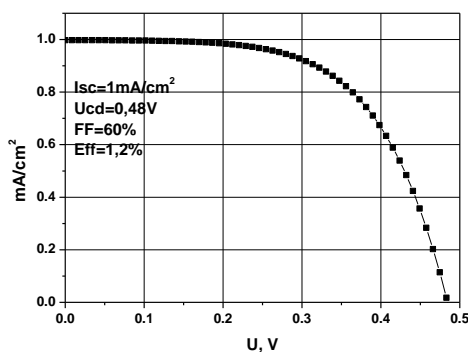


Fig. 1. Caracteristica de sarcină a CS în baza joncțiunii $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4/\text{CdS}$.

Curba I-U prezintă un curent de scurtcircuit $I_{sc} \approx 1 \text{ mA/cm}^2$ și o tensiune în gol $U_{cd} \approx 0,48 \text{ V}$, valori tipice pentru celule solare CZTS obținute prin metode chimice în soluție, unde nivelul de dezordine structurală limitează colectarea purtătorilor de sarcină. Factorul de umplere ($FF \approx 60\%$) indică o joncțiune relativ coerentă, dar cu rezistențe parazite vizibile în zona de curbură a graficului. Eficiența rezultată, $\eta \approx 1,2\%$, reflectă performanța modestă, dar în concordanță cu nivelul tehnologic specific tehnicilor de depunere utilizate.

Per ansamblu, rezultatele demonstrează funcționarea fotovoltaică a joncțiunii $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4/\text{CdS}$ și oferă parametrii cheie ai dispozitivului necesari pentru evaluarea calității materialului, formarea joncțiunii și comportamentul electric sub iluminare.

5.6. Dezvoltarea aplicației web

A doua direcție majoră a proiectului a constat în dezvoltarea unei aplicații web dedicate simulării parametrilor tehnico-economici ai unui sistem fotovoltaic. Platforma, disponibilă online la <https://pvhub.md>, include:

1. Un funcțional pentru estimarea, cu scop informativ, a specificațiilor tehnice și economice pentru o instalație fotovoltaică în dependență de configurația selectată de utilizator. Acesta permite calcularea puterii instalate necesare, a suprafeței minime, a numărului de module, a configurației optime în funcție de tipul sistemului (on-grid, off-grid, hibrid), definirea costurilor de investiție în funcție de tipul de modul (folosește date reale despre module comerciale

disponibile pe piață, inclusiv în republica Moldova), invertor, baterii și tipul instalației, precum și informație utilă caracteristică procesului de racordare, limitări, legi, etc.

2. Un funcțional care permite publicarea și diseminarea articolelor, informațiilor de interes din domeniul fotovoltaicii.

5.7. Simularea unui sistem agrovoltaic pentru o livadă de prun

Ca rezultat al acțiunilor planificate pentru etapa anului 2025, platforma <https://pvhub.md> dezvoltată în cadrul proiectului conține un studiu dedicat simulării unui sistem agrovoltaic pentru o livadă de prun din Republica Moldova cu analiza comparativă a potențialului de utilizare a modulelor fotovoltaice pe bază de kesterite ca alternativă celor comerciale pe bază de Si. Aceasta conține estimarea suprafețelor, costurilor, eficienței și altor caracteristici specifice și arată că integrarea panourilor fotovoltaice pe structuri elevate de tip „portic” reprezintă o soluție tehnic fezabilă și agronomic compatibilă, capabilă să asigure atât protecția culturii, cât și producția de energie electrică necesară procesării fructelor. Condițiile climatice ale Republicii Moldova, caracterizate prin iradiere solară ridicată, veri calde și perioade de secetă, favorizează adoptarea unor sisteme duale agricultură – energie, în special în exploatațiile pomicole cu cerințe energetice sezoniere concentrate, cum e uscarea, sortarea și depozitarea prunelor.

Rezultatele arată că un sistem fotovoltaic de 80 kWp ON-grid poate acoperi integral consumul anual al exploatației, generând chiar un surplus injectabil în rețea, în timp ce un sistem OFF-grid de 120 kWp, echipat cu aproximativ 640 kWh stocare în baterii LFP, poate asigura autonomia zilnică necesară fermelor izolate. Penalizarea de -15% aplicată pentru configurația agrovoltaică optimizată se dovedește realistă și ar menține umbrirea în limite acceptabile pentru cultura de prun ($\leq 20\text{--}25\%$), fără efecte semnificative asupra producției agricole.

Analiza tehnologiilor disponibile indică faptul că, în contextul actual al pieței, modulele bifaciale N-type TOPCon reprezintă opțiunea optimă prin raportul lor favorabil cost–performanță, iar modulele N-type HJT constituie o alternativă premium, avantajoasă în special în condiții de temperatură ridicată. Tehnologiile emergente pe bază de kesterit (CZTS/Se), deși promițătoare la nivel de laborator, nu sunt încă mature pentru implementări comerciale.

În ansamblu, studiul confirmă că sistemele agrovoltaice pot contribui semnificativ la creșterea sustenabilității și competitivității fermelor de prun din Republica Moldova, oferind o valorificare eficientă a terenului, reducerea dependenței energetice și o reziliență sporită la efectele climatice. Integrarea tehnologiilor FV în pomicultură se conturează astfel ca o direcție strategică pentru dezvoltarea agricolă regională și pentru accelerarea tranziției energetice naționale.

Prin ansamblul lor, rezultatele obținute în cadrul proiectului demonstrează progres substanțial atât la nivel fundamental, cât și tehnologic, consolidând cadrul necesar pentru valorificarea kesteritelor în aplicații energetice moderne.

6. Diseminarea rezultatelor la foruri științifice

6.1. Participări în cadrul manifestărilor științifice internaționale

- **V. Batîr, E. Hajdeu-Chicarosh, I. A. Viktorov, E. Lähderanta, K. G. Lisunov** (USM IFA, Finland), E. Arushanov. Hopping conductivity in $\text{Cu}_2\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{SnS}_4$. 10th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics (MSCMP 2024), Chișinău, Moldova, October 1-4, 2024.

- **V. Batîr, S. Aazou, L. Dermenji, N. Curmei, Z. Sekkat, E. Arushanov, M. Guc.** Raman

analysis of $\text{Cu}_2\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{GeS}_4$ and $\text{Cu}_2\text{CdSn}_{1-x}\text{Ge}_x\text{S}_4$ solid solutions. 10th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics (MSCMP 2024), Chişinău, Moldova, October 1-4, 2024.

- L.V. Dermenji, **N.N. Curmei**, L.I. Bruk, M. Franckevičius, V. Pakštas. The influence of the synthesis atmosphere on the quality of thin layers of $(\text{Ag}_x\text{Cu}_{1-x})_2\text{ZnSnS}_4$. 10th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics (MSCMP 2024), Chişinău, Moldova, October 1-4, 2024.

6.2. Participări în cadrul manifestărilor științifice naționale cu participare internațională

- **Batîr V.**, Zalamai V., Arushanov E. Optical properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ and $\text{Cu}_2\text{CdSnS}_4$ quaternary compounds. The National Conference with International Participation, edition VII, „Natural sciences in the dialogue of generations”, September 12-13, Chisinau, Republic of Moldova, 2024. Book of abstracts, p. 240.

6.3. Participări în cadrul târgurilor de invenție

- **Batîr V.**, Zalamai V., Arushanov E. $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ and $\text{Cu}_2\text{CdSnS}_4$ quaternary materials for photovoltaic applications. Cel de-al VIII-lea Târg Internațional de Inovare și Educație Creativă pentru Tineret (ICE-USV), Suceava, România, 31.05.2024 - 2.06.2024. Diplomă și medalie de argint.

6.4. Altele

- platforma <https://pvhub.md>

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

Impactul științific, social și economic al proiectului se manifestă prin avansul semnificativ în cunoașterea fundamentală și în aplicabilitatea practică a materialelor de tip kesterit în soluții fotovoltaice de test. Rezultatele obținute în urma realizării primei etape a proiectului (pe durata anului 2024) au ajutat la acumularea de date noi referitoare la proprietățile fizico-chimice ale materialelor cuaternare din seria $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn},\text{Ge})(\text{S},\text{Se})_4$, contribuind cumulativ la înțelegerea influenței acestora asupra proceselor de conversie fotovoltaică și, corespunzător, la utilizarea mult mai eficientă în celule solare de nouă generație. Rezultatele experimentale și modelele analitice dezvoltate vor contribui la înțelegerea aprofundată a efectului defectelor, dezordinii cationice și ne-stoichiometriei asupra proprietăților optoelectronice ale compușilor $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn},\text{Ge})(\text{S},\text{Se})_4$, susținând progresul la nivel internațional în domeniul materialelor utilizate în fotovoltaică. O parte dintre rezultate au fost diseminate sub formă de publicații și prezentări la conferințe internaționale, iar publicarea lor în reviste indexate în bazele de date Scopus și Web of Science confirmă relevanța științifică și vizibilitatea internațională a echipei. În perspectivă, aceste rezultate vor ajuta la aprecierea potențialului de utilizare în agrovoltaică și fotovoltaică a materialelor de tip kesterit.

În paralel, dezvoltarea platformei <https://pvhub.md> oferă societății un instrument accesibil pentru dimensionarea instalațiilor fotovoltaice și informarea privind tehnologiile fotovoltaice, racordări și costuri, facilitând astfel adoptarea energiei regenerabile la nivelul populației și al întreprinderilor. Studiul agrovoltaic dedicat livezilor de prun demonstrează fezabilitatea integrării sistemelor solare în agricultură și potențialul lor de a crește reziliența climatică și

autonomia energetică a fermelor, generând oportunități economice noi. La nivel social, aceste studii vor facilita progresul științifico-tehnologic, precum și evoluția consecventă a soluțiilor alternative pentru minimizarea efectelor crizei energetice și ecologice asupra populației, contribuind la tranziția către o agricultură mai durabilă și eficientă energetic și la consolidarea capacităților naționale în domeniul energiilor regenerabile.

8. Colaborare la nivel național în cadrul implementării proiectului

- *Nu este*

9. Colaborare la nivel internațional în cadrul implementării proiectului

Pe parcursul anului de referință, membrii echipei proiectului au colaborat cu colegii din cadrul asociației IREC din Barcelona (Spania), cu cei de la Universitatea Mohammed V din Rabat (Maroc), precum și cu cei de la Universitatea de Tehnologie Lappeenranta-Lahti din Lapeenranta (Finlanda). Astfel, în rezultatul colaborării a fost posibilă realizarea măsurătorilor proprietăților optice, vibraționale și de transport și ale mai multor seturi de probe de $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn},\text{Ge})(\text{S},\text{Se})_4$ obținute în cadrul IFA USM de către echipa proiectului.

10. Dificultățile în realizarea proiectului: financiare, organizatorice, legate de resursele umane

Pe parcursul realizării scopului proiectului au fost întâmpinate dificultăți de ordin birocratic și organizatoric în procesul de achiziționare a materialelor și echipamentelor planificate conform devizului de cheltuieli aprobat. În consecință, cea mai mare parte din acestea au fost procurate de fiecare dată spre sfârșitul etapelor.

Un aspect problematic conex a fost și majorarea prețurilor pentru articole în intervalul de timp de la planificare până la inițierea concursurilor de achiziționare. Din cauza acestor rețineri, a fost uneori dificil de a sincroniza, conform planului, necesitățile de materiale și echipamente cu procesul științific. Astfel echipa proiectului a fost nevoită uneori să amâne unele activități și să revină la ele mai târziu decât erau planificate.

Cu toate acestea, în aspect științific, datorită colegilor de proiect care activează la instituții de cercetare de peste hotare și a suportului partenerilor echipei, nu au fost întâmpinate dificultăți în realizarea activităților de cercetare.

11. Recomandări, propuneri

Propunem revizuirea procesului de achiziții, pentru facilitarea procurării în timpi utili a materialelor și dispozitivelor necesare procesului științific.

Conducătorul de proiect  / **Elena HAJDEU-CHICAROS, dr.**

Data: 20.01.2026

LȘ



Rezumatul activității și a rezultatelor obținute în proiect

Cifra proiectului **23.70105.5007.14T**

Denumirea Proiectului **Celule solare pe bază de kesterite ca alternativă pentru sisteme agrovoltaice**

RO: Pe durata implementării proiectului s-a realizat investigarea complexă a compușilor cuaternari din seria $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn,Ge})(\text{S,Se})_4$ în vederea evaluării potențialului acestora pentru aplicații fotovoltaice și agrovoltaice, prin combinarea studiilor fundamentale cu activități de modelare și aplicative. Etapa inițială (2024) a fost dedicată optimizării proceselor tehnologice de obținere a probelor de tip kesterit și acumulării datelor experimentale de bază, necesare caracterizării acestor compuși, precum și stabilirii contextului științific actual privind utilizarea lor în sisteme agrovoltaice. În rezultat au fost obținute seturi de probe sub formă de monocristale, pulberi, policristale și straturi subțiri, iar caracterizarea morfologică, structurală și compozițională a permis ajustarea parametrilor tehnologici pentru îmbunătățirea stoichiometriei și a calității cristaline. Măsurătorile spectrelor de absorbție și ale dependenței rezistivității de temperatură au confirmat influența semnificativă a tratamentului termic, ne-stoichiometriei și a compoziției eșantioanelor asupra comportamentului electronic. La etapa a II-a (2025), activitatea s-a extins asupra studiului detaliat al proprietăților vibraționale, compoziționale, structurale și de transport ale probelor obținute anterior. Analiza transportului electronic a confirmat, pentru majoritatea probelor, prezența mecanismelor de conductivitate prin salt NNH și VRH Mott, iar integrarea datelor experimentale într-un model analitic complex a permis determinarea concentrațiilor defectelor antisite Cu_{Zn} , a vacanțelor de Cu și a gradului de dezordine structurală. Aceste rezultate au elucidat modul în care compoziția, raporturile cationice și tratamentele termice influențează performanțele fotovoltaice ale compușilor de tip kesterit. Tot în cadrul etapei a fost realizată obținerea și caracterizarea joncțiunilor kesterit/CdS, iar măsurarea caracteristicii de sarcină a demonstrat funcționarea fotovoltaică a straturilor obținute.

În paralel, s-a realizat dezvoltarea tehnică a platformei web <http://pvhub.md>, care permite simularea puterii instalate, suprafețelor necesare și costurilor asociate diferitelor tipuri de instalații fotovoltaice comerciale și include o secțiune dedicată pentru diseminarea informațiilor tehnice și educaționale din domeniul fotovoltaicii. O parte importantă a activității a vizat un studiu de simulare pentru integrarea unui sistem fotovoltaic într-o livadă de prun în condițiile climatice ale Republicii Moldova. Modelarea a demonstrat fezabilitatea tehnică a unui sistem agrovoltaic de tip portic, cu estimarea producției energetice, a gradului de umbră și a costurilor asociate, precum și evaluarea comparativă a performanței potențiale a modulelor fotovoltaice pe bază de straturi subțiri de kesterit față de tehnologiile comerciale pe bază de siliciu. În ansamblu, proiectul a combinat activități de cercetare fundamentală cu aplicații practice, contribuind la înțelegerea proprietăților materialelor de tip kesterit și la evaluarea potențialului acestora în soluții energetice moderne. Rezultatele au fost diseminate prin 3 articole științifice publicate și prezentări la conferințe internaționale, iar colaborările cu grupurile de cercetare de la IREC (Spania), UM5 (Maroc) și Universitatea Lappeenranta-Lahti (Finlanda) au sprijinit validarea rezultatelor. Proiectul a atins integral obiectivele propuse, oferind o bază solidă pentru continuarea cercetărilor în direcția materialelor fotovoltaice emergente și a aplicațiilor agrovoltaice.

EN: Throughout the implementation of the project, an extensive investigation of quaternary compounds from the $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn,Ge})(\text{S,Se})_4$ series was carried out in order to evaluate their potential for photovoltaic and agrivoltaic applications, combining fundamental studies with modeling and application-oriented activities. The initial stage (2024) focused on optimizing the technological processes for obtaining kesterite-type samples and on collecting the fundamental experimental data required for their characterization, as well as establishing the current scientific context regarding their possible integration into agrivoltaic systems. As a result, sets of samples in the form of single crystals, powders, polycrystals and thin films were obtained, and their morphological, structural and compositional characterization enabled the adjustment of synthesis parameters to improve stoichiometry and crystalline quality. Measurements of optical absorption and temperature-dependent resistivity confirmed the significant influence of thermal treatment, non-stoichiometry and sample composition on the electronic behaviour.

In the second stage (2025), the activity expanded toward a detailed study of the vibrational, compositional, structural and transport properties of the previously obtained samples. The analysis of electronic transport confirmed, for most samples, the presence of NNH and Mott VRH hopping conduction mechanisms, while the integration of experimental data into a complex analytical model enabled the determination of Cu_{Zn} antisite defect concentrations, Cu vacancies and the degree of structural disorder. These results clarified how composition, cationic ratios and thermal treatments influence the photovoltaic performance of kesterite-type compounds. During the same stage, kesterite/CdS junctions were obtained and characterized, and the measured current–voltage characteristics demonstrated the photovoltaic functionality of the synthesized layers.

In parallel, the technical development of the web platform <http://pvhub.md> was completed. The platform enables the simulation of installed power, required surface area and associated costs for various commercial photovoltaic system configurations and includes a dedicated section for disseminating technical and educational information in the field of photovoltaics. An important component of the applied work involved a simulation study on integrating a photovoltaic system into a plum orchard under the climatic conditions of the Republic of Moldova. The modeling demonstrated the technical feasibility of a portico-type agrivoltaic system, including estimates of energy production, shading levels and associated costs, as well as a comparative assessment of the potential performance of thin-film kesterite photovoltaic modules relative to commercial silicon-based technologies.

Overall, the project successfully combined fundamental research with practical applications, contributing to a deeper understanding of the properties of kesterite-type materials and to evaluating their potential in modern energy solutions. The results were disseminated through three scientific publications and presentations at international conferences, while collaborations with research groups from IREC (Spain), UM5 (Morocco) and Lappeenranta–Lahti University of Technology (Finland) supported the validation of findings. The project fully achieved its objectives and provides a solid foundation for continuing research on emerging photovoltaic materials and agrivoltaic applications.

Conducătorul de proiect  / **Elena HAJDEU-CHICAROS, dr.**

Data: 20.01.2026

LȘ



**Lista lucrărilor științifice, științifico-metodice și didactice
publicate în cadrul proiectului**

Celule solare pe bază de kesterite ca alternativă pentru sisteme agrovoltaice

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. **V. Batir (USM IFA)**, K. G. Lisunov, E. Arushanov, *Variable-range hopping conduction in the $Cu_2Zn_{1-x}Cd_xSnS_4$ single crystals*. Romanian Reports in Physics (2025) (acceptat). Disponibil la: <https://rrp.nipne.ro/IP/AP850.pdf> (IF: 2.2).
2. E. Lähderanta, **E. Hajdeu-Chicarosh (USM IFA)**, E. Arushanov, K. G. Lisunov, *Defects in kesterite type compounds: Analysis based on the results of transport investigations*, Physics of the Solid State (2025) (acceptat, în proces de publicare) (IF: 0.38)
3. **V. Batîr (USM IFA)**, V. Zalamai. *Optical properties of Cu_2ZnSnS_4 and Cu_2CdSnS_4 quaternary compounds*. Romanian Reports in Physics, 2024, vol. 76, pp. 1-13. ISSN 1221-1451. Link-ul: <https://doi.org/10.59277/RomRepPhys.2024.76.506> (IF: 2.1).

2. Teze ale conferințelor științifice

2.1. în lucrările conferințelor științifice internaționale (Republica Moldova)

1. **V. Batîr (USM IFA)**, **E. Hajdeu-Chicarosh (USM IFA)**, I. A. Viktorov, E. Lähderanta, K. G. Lisunov (USM IFA, Finland), E. Arushanov (USM IFA). *Hopping conductivity in $Cu_2Zn_{1-x}Cd_xSnS_4$* . 10th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics (MSCMP 2024), Chișinău, Moldova, October 1-4, 2024. Book of abstracts, p. 75.
2. **V. Batîr (USM IFA)**, S. Aazou, L. Dermenji (USM IFA), **N. Curmei (USM IFA)**, Z. Sekkat, E. Arushanov (USM IFA), **M. Guc**. *Raman analysis of $Cu_2Zn_{1-x}Cd_xGeS_4$ and $Cu_2CdSn_{1-x}Ge_xS_4$ solid solutions*. 10th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics (MSCMP 2024), Chișinău, Moldova, October 1-4, 2024. Book of abstracts, p. 84.
3. L.V. Dermenji (USM IFA), **N.N. Curmei (USM IFA)**, L.I. Bruk (USM IFA), M. Franckevičius, V. Pakštas. *The influence of the synthesis atmosphere on the quality of thin layers of $(Ag_xCu_{1-x})_2ZnSnS_4$* . 10th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics (MSCMP 2024), Chișinău, Moldova, October 1-4, 2024. Book of abstracts.

2.2. în lucrările conferințelor științifice naționale cu participare internațională

1. **V. Batîr (USM IFA)**, V. Zalamai, E. Arushanov (USM IFA). *Optical properties of Cu_2ZnSnS_4 and Cu_2CdSnS_4 quaternary compounds*. The National Conference with International Participation, edition VII, „Natural sciences in the dialogue of generations”, September 12-13, Chisinau, Republic of Moldova, 2024. Book of abstracts, p. 240.

**Executarea devizului de cheltuieli,
conform anexei nr. 2.3 din contractul de finanțare pentru anul 2025**

Cifrul proiectului 23.70105.5007.14T

Cheltuieli anul 2025, mii lei				
Denumirea	Cod		Anul de gestiune	
	Eco (k6)	Aprobat	Modificat +/-	Precizat
Remunerarea muncii temporare	211200	67,68	-	67,68
Contribuții de asigurări sociale de stat obligatorii	212100	16,24	-	16,24
Alte cheltuieli în bază de contracte cu persoane fizice	281600	55,95	-	55,95
Procurarea mașinilor și utilajelor	314110	64,99	-	64,99
Procurarea materialelor pentru scopuri didactice, științifice și alte scopuri	335110	35,14	-	35,14
TOTAL		240,0	-	240,0

Conducătorul organizației _____

Ioan SAROI, dr., prof. univ.

Contabil șef _____

Liliana COJOCARU

Conducătorul de proiect _____

Elina HAIDEA-CHICAROS, dr.

Data: 28.01.2026

LȘ



Componența echipei conform contractului de finanțare 2025

Cifrul proiectului 23.70105.5007.14T

Echipa proiectului conform contractului de finanțare (la semnarea contractului) pentru 2025						
Nr	Nume, prenume (conform contractului de finanțare)	Anul nașterii	Titlul științific	Norma de muncă sau nr. de ore conform contractului	Data angajării	Data eliberării
1.	Hajdeu-Chicaros Elena	1989	Dr.	0.5	02.01.2025	31.12.2025
2.	Guc Maxim	1986	Dr.	Fără remunerare	02.01.2025	31.12.2025
3.	Curmei Nicolai	1989	Dr.	0.5	02.01.2025	31.12.2025
4.	Batir Valentin	1995		0.5	02.01.2025	31.12.2025
5.	Rotaru Victoria	1998		Fără remunerare	02.01.2025	31.12.2025

Modificări în componența echipei pe parcursul anului 2025					
Nr	Nume, prenume	Anul nașterii	Titlul științific	Norma de muncă sau nr. de ore conform contractului	Data angajării
1.	<i>Nu sunt</i>				

Conducătorul organizației

Contabil șef

Conducătorul de proiect

Data: 28.07.2026

LȘ

[Handwritten signatures]

[Handwritten signature] / Liliana

[Handwritten signature] / Hajdeu

L. S. B. dr., prof. univ.Elena HAJDEU-CHICAROS, dr.

UNIVERSITATEA DE STAT DIN MOLDOVA

INSTITUTUL DE FIZICĂ APLICATĂ



MOLDOVA STATE UNIVERSITY

INSTITUTE OF APPLIED PHYSICS



EXTRAS

din PROCESUL VERBAL nr. 6
al ședinței Consiliului Științific al Institutului de Fizică Aplicată al USM
din 24 noiembrie 2025

PREZENȚI: 10 (din 13) membri ai Consiliului Științific.

Obiect de referință:

Aprobarea rapoartelor științifice anuale
pentru etapa 2025.

Ca urmare a prezentării publice se aprobă rezultatele științifice anuale (2025), obținute în cadrul proiectului pentru tineri cercetători **“Celule solare pe bază de kesterite ca alternativă pentru sisteme agrovoltaice”**, cu cifrul 23.70105.5007.14T, conducător de proiect **HAJDEU-CHICAROȘ Elena**.

Președintele Consiliului Științific IFA



 dr. ȘIKIMAKA Olga

Secretarul Consiliului Științific IFA

 dr. MEȘALCHIN Alexei