Electrozi-de-spate nanostructurați pentru celule solare cu eficiență ridicată

Cod: PN-III-P1-1.1-TE-2019-0868; Contract: TE 115 / 2020

1. Noțiuni Introductive și Plan de Realizare

Scopul principal al proiectului **NANODELL** este de a realiza o celulă solară de tip *„substrat”* cu eficiență ridicată, prin nanostructurarea controlată a electrodului colector de goluri (folosind matrici de nanofire de Cu perpendiculare pe suprafața electrodului), și prin utilizarea de materiale active prietenoase cu mediul înconjurător (compuși calcogeni A^{II}-B^{VI}, pe bază de Zn). Structura elementului fotovoltaic vizat, precum și elementele constituente ale acestuia sunt prezentate în **Figura 1**.

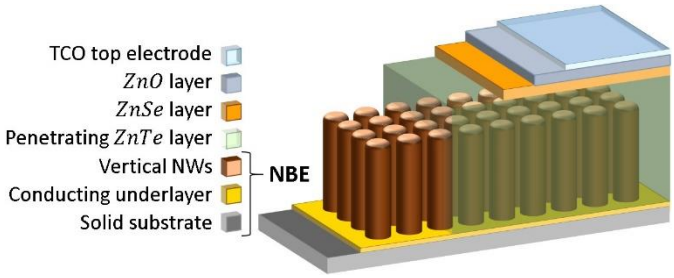


Figura 1 Elementele dispozitivului fotovoltaic nanostructurat, având o configurație de tip *„substrat”*.

Îndeplinirea acestui obiectiv principal, implică execuția mai multor activități specifice, conform planului de realizare al proiectului **NANODELL**. Acest raport include o prezentare tehnico-științifică succintă a principalelor rezultate obținute în perioada **01 Ianuarie – 31 Decembrie, 2021**, corespunzând **Etapei 2** a proiectului, așa cum este detaliată în **Tabelul 1**.

Tabel 1 Principalele activități propuse și rezultate estimate pentru **Etapa 2** a proiectului **NANODELL**

Nr.	Etapă / Activități	Rezultate estimate
1	**Etapa 2:** - Studiul literaturii de specialitate – continuare; - WP1: Dezvoltarea electrozilor-de-spate cu nanofire (NBEs) – continuare; - WP2: Dezvoltarea și caracterizarea celulelor solare de referință; - WP3: Dezvoltarea și caracterizarea celulelor solare bazate pe NBEs; - WP4: Diseminarea rezultatelor și acțiuni de comunicare publică - continuare.	Actualizarea paginii web a proiectului; Livrabil A/2: Producerea electrozilor-de-spate cu nanofire (NBEs); Livrabil B: Configurația optimă a unei celule convenționale fără NBEs; Livrabil C: Arhitectura optimă a electrozilor-de-spate cu nanofire (NBEs); Raportul intermediar științific, tehnic și financiar al etapei 2; Un articol trimis spre publicare și o participare la o conferință.
2	**Act. 2.1:** - T.1.3: Creșterea nanofirelor (NWs) prin sinteză electrochimică asistată de șablon	Documentare pe internet vizând starea actuală a domeniului de cercetare; Studii ale literaturii de specialitate în vederea elaborării unor rutine experimentale; Optimizarea platformei experimentale de sinteză electrochimică asistată de șablon, folosită la creșterea controlată a unor matrici dense de nanofire aliniate vertical în raport cu substratul; Fabricarea unor electrozi-de-spate bazați pe nanofire (NBEs), cu diferiți parametrii structurali și compoziționali.
3	**Act. 2.2:** - T.1.4: Caracterizarea morfo-structurală a nanofirelor (NWs)	Studii de caracterizare morfologică, compozițională și structurală a electrozilor-de-spate cu nanofire (NBEs), vizând alegerea configurației optime.
4	**Act. 2.3:** - T.2.1: Construcția celulelor solare convenționale de tipul: BSs/ZnTe/ZnSe/ZnO/TCO.	Prepararea unor structuri de celulă solară multi-strat, de tipul BSs/ZnTe/ZnSe/ZnO/TCO (unde TCO reprezintă un film subțire de IZO sau AZO), folosind tehnici de evaporare termică în vid, pulverizare catodică în plasmă asistată de magnetron, și/sau depunere electrochimică.

5	**Act. 2.4:** - T.2.2: Caracterizarea optică și electrică a celulelor solare convenționale	Studii de caracterizare optică și electrică a celulelor solare convenționale.
6	**Act. 2.5:** - T.2.3: Compararea performanțelor celulelor solare convenționale	Evaluarea performanțelor celulelor solare convenționale, și alegerea celei mai performante arhitecturi.
6	**Act. 2.6:** - T.3.1: Construcția interfeței electrod-de-spate cu nanofire (NBEs) / strat absorbant de ZnTe	Prepararea interfeței electrod-de-spate cu nanofire (NBEs) / strat absorbant de ZnTe, prin tehnici combinate de sinteză electrochimică asistată de șablon și alte metode fizice de depunere a filmelor subțiri (evaporare termică în vid sau pulverizare catodică în plasmă).
6	**Act. 2.7:** - T.3.2: Caracterizarea electrică a interfeței electrod-de-spate (NBEs) / strat absorbant de ZnTe	Studii de caracterizare electrică a interfețelor fabricate, în vederea alegerii configurației optime.
7	**Act. 2.8:** - T.4.1, T.4.2, T.4.3 și T.4.4: Activități de diseminare și de management al proiectului	Întâlniri științifice periodice între membrii echipei de cercetare; Evaluarea progresului științific; Elaborarea unor măsuri de minimizare a riscurilor eventual apărute; Actualizarea paginii Web a proiectului; Popularizarea rezultatelor științifice prin intermediul canalelor de socializare online; O lucrare științifică trimisă spre publicare; O participare la un eveniment național și/sau internațional de comunicare științifică; Raportarea științifică, tehnică și financiară a celei de-a doua etape.

Acțiunile de management al proiectului, precum și cele de diseminare științifică și de popularizare către publicul larg a rezultatelor experimentale obținute în această perioadă sunt enumerate în finalul acestui raport.

2. Rezumatul Tehnico-Științific al Rezultatelor Obținute

2.1. Creșterea nanofirelor prin sinteză electrochimică asistată de șablon

Conform planului de realizare al **Etapei 2** (**Act. 2.1** și **Act. 2.2**, vezi **Tabelul 1**), s-a continuat printr-un studiu minuțios al literaturii de specialitate [1-8], vizând starea actuală a domeniului de cercetare, precum și stabilirea unor rutine experimentale pentru creșterea controlată a unor matrici dense de nanofire aliniate vertical în raport cu substratul. Aceste studii s-au axat în principal pe conceperea și optimizarea unei platforme experimentale de sinteză electrochimică asistată de un șablon nanoporos suportat de oxid de aluminiu anodic (AAO). Șablonul nanoporos suportat de AAO oferă o densitate mare de nanopori a căror parametrii geometrici (de ex. diametrul porilor sau densitatea lor) pot fi ușor de controlat din condițiile procesului de anodizare, oferind în final un grad înalt de ordonare a aranjamentului de nanofire obținut.

Sinteza electrochimică asistată de șablonul nanoporos suportat de AAO presupune două etape: (i) în primă fază prin intermediul procesului de oxidare electrochimică (anodizare) se creează nanopori de Al_2O_3 (alumină) ce evoluează spre nano-canale cilindrice într-un film subțire de aluminiu (Al) depus inițial pe un substrat (siliciu acoperit de un film subțire de aur, i.e., Si/Au, în cazul de față) – Figura 2a, (ii) urmând ca ulterior aceste nano-canale să fie umplute (parțial) cu materialul dorit printr-un procedeu de depunere electrochimică (ECD) – Figura 2b. În cele din urmă, nanofirele (NWs) rămânând aliniate-vertical în raport cu substratul, sunt obținute prin îndepărtarea chimică a șablonului de AAO. În acest condiții, s-au desfășurat experimente de creștere controlată a unor matrici dese de nanofire de cupru (Cu).

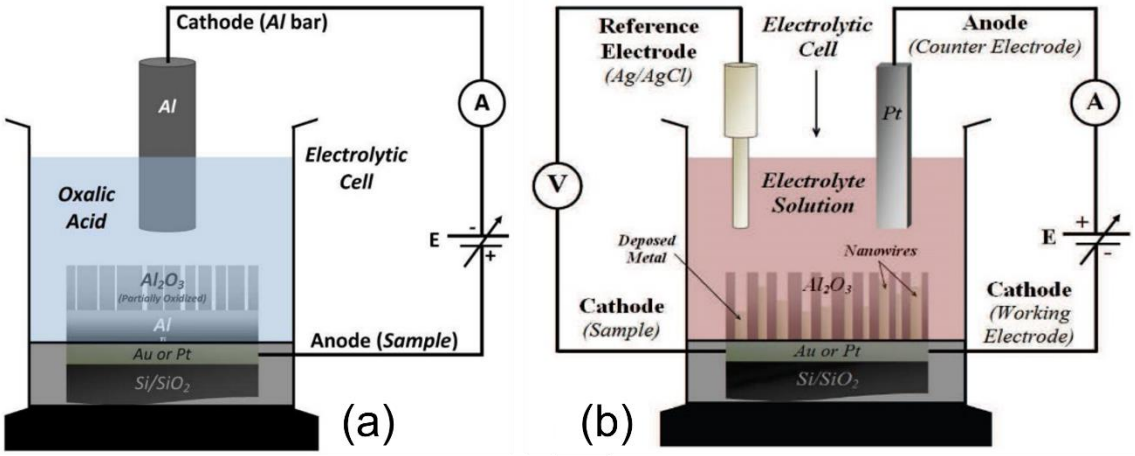


Figura 2 (a) Celulă electrolitică într-o configurație de 2 electrozi utilizată pentru procesul de oxidare electrochimică (anodizare) a filmelor subțiri de Al, pentru a obține șabloane nanoporoase suportate de AAO; (b) Celula electrolitică cu o configurație de 3 electrozi, folosită la electrodepunerea Cu în porii șablonului de AAO.

Curbe de curent tipice obținute în procesul de nanofabricație sunt prezentate în Figura 3. Curba de anodizare (Fig. 3a) arată o scădere bruscă a curentului la începutul procesului datorită formări unui film subțire de Al_2O_3 (oxid de barieră) pe întreaga suprafață de Al, iar apoi tinde spre un curent de „palier" odată cu stabilirea unui echilibru competitiv între reacția electrochimică de formare a Al_2O_3 și dizolvarea electrochimică a Al_2O_3 deja format, asistată de câmpul electric prezent în electrolit în timpul procesului de anodizare. Acest curent constant corespunde formării efective a nano-canalelor quasi-cilindrice și începe să crească în finalul procesului odată ce porii ajung la filmul conductiv de Au. Depunerea electrochimică a Cu în porii șablonului (Fig. 3b) implică un proces standard de cronoamperometrie, prin aplicarea unui potențial constant de -0.2 V *versus* un electrod de referință de Ag/AgCl. În acest proces, curentul catodic este mare la început, datorită difuziei ionilor spre electrodul de lucru, și se stabilizează odată cu dezvoltarea pe verticală a nanofirelor de Cu în interiorul porilor șablonului.

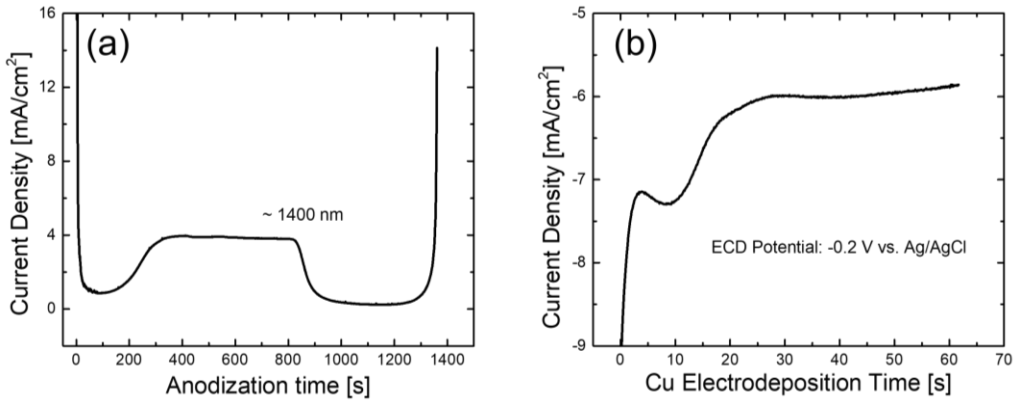


Figura 3 (a) Curentul obținut la anodizarea unui film de Al (având o grosime de 1 μm), depus pe un substrat de Si, acoperit de un film subțire de Au, pentru a genera un șablon nanoporos suportat de AAO cu o grosime de ~1.4 μm. (b) Curentul catodic obținut la depunerea electrochimică a Cu în porii șablonului de AAO, aplicând un potențial de -0.2 V vs. un electrod de referință de Ag/AgCl.

În această etapă, experimentele au vizat studii de optimizare a întregului proces de nanofabricație, pentru a obține în final matrici dese de nanofire de Cu dispuse vertical în raport cu substratul, și având diametre în jur de 100 nm și lungimi de până la 500 nm pentru a rămâne aliniate vertical în raport cu substratul după îndepărtarea șablonului, dar și pentru a asigura o distanțare optimă între ele (distanța între centrele porilor adiacenți de aprox. 150 nm) cu scopul de a facilita ulterior pătrunderea stratului activ absorbant (ZnTe, în cazul de față). Poze SEM tipice ale matricelor dense de fire de Cu aliniate vertical pe substrat, sunt prezentate în Figura 4.

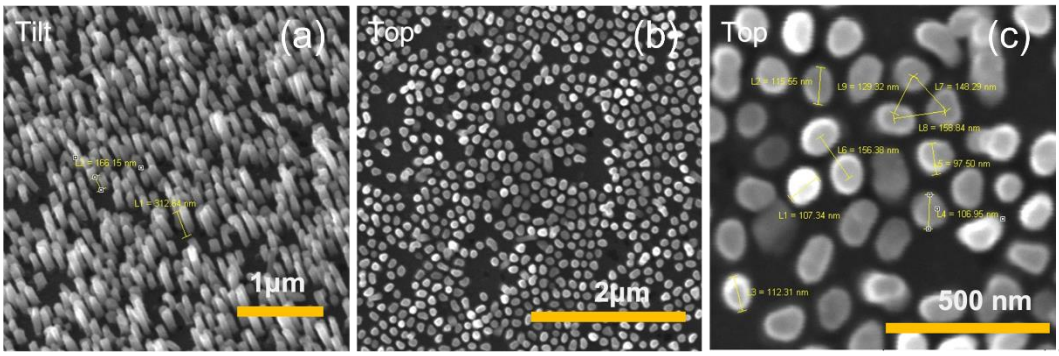


Figura 4 Caracterizarea morfologică a nanofirelor de Cu crescute prin sinteză electrochimică. (a) Vederea înclinată a nanostructurilor ce permite estimarea lungimilor nanofirelor de Cu. (b,c) Vederi de deasupra ale matricei dense de nanofire de Cu, la două măriri diferite, ce permit evaluarea parametrilor geometrici, cum ar fi diametrul mediu al nanofirelor și distanța medie între centrele a două nanofire adiacente.

2.2. Depunerea stratului absorbant anorganic peste matricea de nanofire

Conform planului de realizare al **Etapei 2** (**Act. 2.6** și **Act. 2.7**, vezi **Tabelul 1**), s-au desfășurat studii preliminare de depunere a stratului absorbant anorganic al celulei solare vizate peste matricea de nanofire de Cu dezvoltată anterior. Experimentele au avut ca scop principal umplerea cât mai uniformă a spațiului dintre nanofire cu materialul absorbant, pentru a crea o interfață electrod-de-spate (NBEs) / strat absorbant cât mai eficientă din punct de vedere mecanic, structural, dar și cu proprietăți electrice bune care să permită o colectare eficientă a sarcinilor electrice de către NBEs.

În acest context, studii preliminare sunt încă în curs de desfășurare, angajând pentru început ca strat absorbant Telurura de Cadmiu (CdTe) cunoscută pentru proprietățile ei excepționale ce o fac utilizabilă pe scară largă la celulele solare bazate pe compuși A^{II}-B^{VI}. Mai mult decât atât, alegerea unei metode de depunere adecvată a stratului absorbant este foarte importantă în situația de față, deoarece aceasta trebuie să faciliteze pătrunderea CdTe printre nanofirele de Cu. Din aceste motive, se studiază în prezent trei metode de depunere a CdTe: (i) evaporarea termică în vid (TVE); (ii) pulverizarea catodică în plasmă cu magnetron, în regim de radio-frecvență (RF-MS); și (iii) depunerea electrochimică prin cronoamperometrie (ECD-CA). Se încearcă așadar optimizarea parametrilor procesului de depunere în fiecare caz, prin efectuarea unor caracterizări structurale, optice, morfologice și electrice ale interfețelor NBEs (nanofire de Cu) / strat absorbant obținute. Aceste rezultatele vor fi prezentate mai pe larg la următoarea raportare UEFISCDI. Merită de asemenea menționat că o parte din rezultatele obținute până în prezent fac obiectul unui articol științific în curs de tehno-redactare, ce va fi în curând trimis spre publicare către o revistă cotată ISI.

Studii de optimizare ale procesului de depunere a unor filme subțiri de Telurură de Zinc (ZnTe) sunt de asemenea în desfășurare, o prezentare succintă a acestora fiind inclusă în secțiunea 2.3. Așadar, într-o etapă ulterioară, condițiile optime descoperite se vor aplica pentru depunerea unui strat absorbant de ZnTe peste matricea de nanofire de Cu preparată anterior.

2.3. Construcția și caracterizarea celulelor solare convenționale

Conform planului de realizare al **Etapei 2** (**Act. 2.3**, **Act. 2.4** și **Act. 2.5**, vezi **Tabelul 1**), s-au preparat structuri de celulă solară multi-strat convenționale (fără electrod-de-spate bazat pe nanofire de Cu aliniate vertical pe suprafața electrodului), pentru a fi ulterior caracterizate în regim de fotoelement, și folosite ca referință de comparație pentru celulele cu electrod-de-spate bazat pe nanofire ce vor fi construite în **Etapa 3** a proiectului NANODELL. Pentru început, sunt în desfășurare studii de caracterizare morfo-structurală și optică a componentelor constituente (stratul absorbant de ZnTe și stratul fereastră de ZnSe), rezultatele obținute fiind prezentate pe scurt în cele ce urmează.

2.3.1. Depunerea filmelor subțiri de ZnTe, ca strat absorbant

Filme subțiri de Telurură de Zinc (ZnTe) au fost depuse prin pulverizare catodică în plasmă asistată de magnetron, în regim de radio-frecvență (RF-MS), pe un substrat de sticlă optică. Condițiile de depunere a stratului de ZnTe au fost următoarele: distanța țintă-sursă de 9 cm, temperatura substratului de 200°C, presiunea de lucru în jur de $2.5 \cdot 10^{-2}$ mbar, puterea de lucru fixată la 50 W, iar timpul de depunere a fost variat între 5 min și 20 min pentru a obține diferite grosimi ale filmului de ZnTe. Așadar, studiile au vizat influența grosimii filmului asupra unor proprietăți fizice ale acestuia.

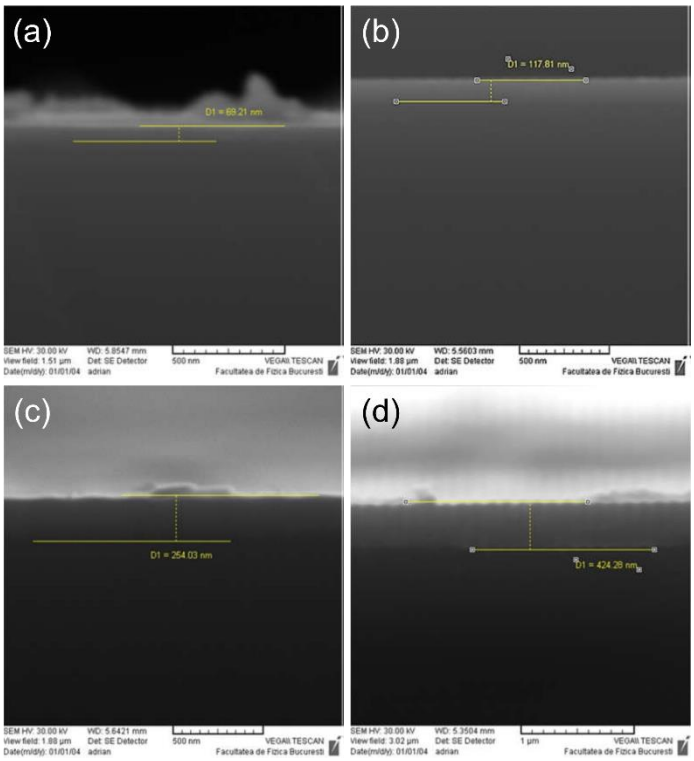


Figura 5 Imagini SEM (vedere în secțiune) ale filmelor de ZnTe pulverizate în condiții date, pentru (a) 5 min, (b) 10 min, (c) 15 min și (d) 20 min. Analiza oferă informații legate de aspectul morfologic precum și de grosimea filmelor depuse.

Analiza morfologică realizată cu ajutorul unui microscop cu baleiaj de electroni (SEM) relevă o suprafață compactă a filmului, având un nivel de compactitate ridicat. În plus, pe baza analizei în secțiune a filmelor (vezi Figura 5) a fost evaluată grosimea filmelor, variind între ~70 nm și ~430 nm, în funcție de timpul de pulverizare în condiții date. În continuare, caracterizarea structurală a filmelor de ZnTe folosind difracția de fraze X (vezi Figura 6) demonstrează prezența filmului de ZnTe cu o calitate cristalină ce se îmbunătățește cu creșterea timpului de depunere.

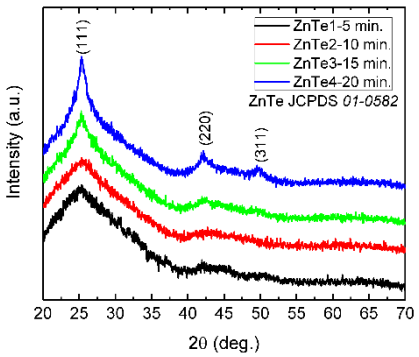


Figura 6 Difractogramele de raze X corespunzând filmelor de ZnTe de grosimi diferite.

Caracterizările optice de transmisie efectuate ulterior au permis evaluarea grosimii filmelor de ZnTe obținute. De exemplu, Figura 7a prezintă spectrul de transmisie al filmului subțire de ZnTe obținut prin RF-MS după un timp de 20 min. În acest caz, valoarea grosimii a fost evaluată la ~437 nm, valoare ce este în concordanță cu valoarea obținută în urma măsurătorilor SEM (vezi Fig. 5d). Mergând mai departe, caracteristicile optice de absorbție au permis estimarea energiei benzii interzise a compusului. Figura 7b reprezintă caracteristica filmului obținut prin pulverizare după 20 min, obținându-se o valoare a benzi interzise de 2.01 eV. Comparând această valoare cu valoarea teoretică pentru ZnTe bulk (~2.26 eV) se constată o mică diferență. O posibilă explicație a acestei variații poate fi nivelul de contaminare asociat fiecărei sesiuni de depunere, ce conduce la formarea de defecte prin doparea structurii cristaline a compusului, având un impact asupra proprietăților electrice ale filmului, în special în reducerea rezistivității nete și în consecință a energiei benzii interzise a ZnTe în această situație.

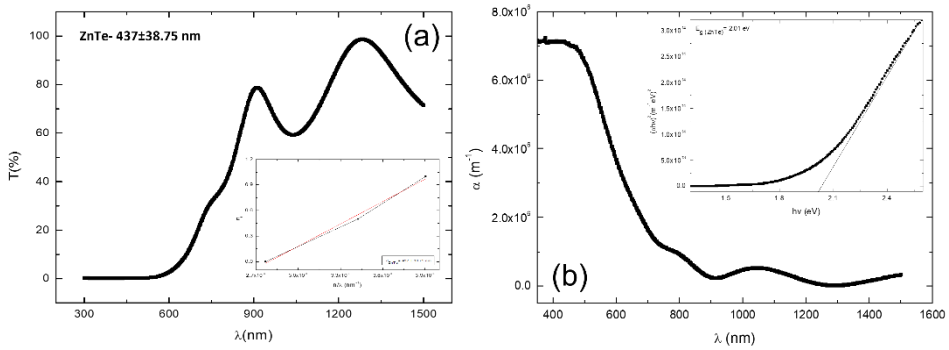


Figura 7 (a) Spectrul de transmisie al filmului subțire de ZnTe depus prin RF-MS. Inset-ul este reprezentarea liniară cu ajutorul căreia se face evaluarea grosimii; (b) Spectrul de absorbție obținut pentru filmul ZnTe, absorbanța ca dependență de lungimea de undă incidentă. Inset-ul reprezintă determinarea valorii experimentale a energiei benzii interzise pentru ZnTe, Eg = 2.01 eV.

Rezultatele experimentale obținute în urma caracterizărilor morfologice (SEM și AFM), structurale (XRD) și optice (absorbție și transmisie) sunt prezentate în **Tabelul 2**. De asemenea, merită menționat că aceste studii sunt prezentate în extenso, prin intermediul unei publicații recente într-o revistă cotată ISI (**Nanomaterials, IF 5.076**) [9].

Tabel 2 Parametrii morfo-structurali ai filmelor subțiri de ZnTe obținute prin RF-MS cu timp de depunere variind între 5 min și 20 min. Banda interzisă (E_g) obținută este de asemenea indicată. RMS denotă rugozitatea superficială a filmelor, obținută prin Microscopie de Forță Atomică (AFM).

Probe analizate	**Grosime (nm)**	**Dimensiunea cristalitelor (nm)**	**RMS (nm)**	**E_g (eV)**
ZnTe (5 min)	~69	NA	4.1	2.72
ZnTe (10 min)	~118	NA	3.5	2.26
ZnTe (15 min)	~254	5.0	3.3	2.35
ZnTe (20 min)	~424	9.1	3.0	2.19

2.3.2. Depunerea filmelor subțiri de ZnSe, ca strat „fereastră”

Filme subțiri de Selenură de Zinc (ZnSe) au fost depuse prin pulverizare catodică în plasmă asistată de magnetron, în regim de radio-frecvență (RF-MS), pe un substrat de sticlă optică. Condițiile de depunere a stratului de ZnTe au fost următoarele: distanța țintă-sursă de 9 cm, temperatura substratului de 220°C, presiunea de lucru în jur de $8.6 \cdot 10^{-3}$ mbar, timpul de pulverizare fixat la 20 min, iar puterea de lucru a fost variantă între 60 W și 120 W. Așadar, s-au obținut filme de ZnSe având grosimi diferite, studiile axându-se practic pe efectele puterii asupra proprietăților fizice ale filmelor de ZnSe astfel obținute.

Pentru început, analiza structurală a fost realizată într-o configurație de incidență razantă (GIXRD) la unghi de 1°, alegerea acestei metode fiind bazată pe faptul că se înregistrează un semnal mai bun din partea filmelor subțiri și are loc minimizarea semnalului dat de substrat. Figura 8 prezintă spectrele GIXRD aferente. În Figurile 8b-8d se poate observa un peak de difracție intens corespunzător planului (111) al structurii cubice a ZnSe, alături de peak-uri mai puțin intense din partea planelor (220) și (311). De asemenea, potrivit studiilor desfășurate, în ce privește efectul pe care îl are puterea de lucru în timpul depunerii prin RF-MS asupra proprietăților (morfologice, structurale, optice) filmului de ZnSe, odată cu mărirea puterii de depunere se îmbunătățește și calitatea cristalină a straturilor subțiri, filmul depus la o putere de 100 W prezentând cea mai bună cristalinitate. Parametrii structurali ai probelor determinați prin analiza celui mai intens plan reflectat (111) în geometria Bragg-Brentano teta-teta (vezi Figura 9) sunt prezentați în **Tabelul 3**. Dimensiunea efectivă a cristalitelor (D_{ef}), micro-stresul ($\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$) și constanta de rețea (a) sunt calculați pe baza informațiilor obținute după fitarea datelor experimentale folosind profile Voigt. Se poate așadar observa cu ușurință că pe măsura ce puterea de lucru în timpul pulverizării catodice crește, se îmbunătățește texturarea și calitatea structural a filmelor de ZnSe.

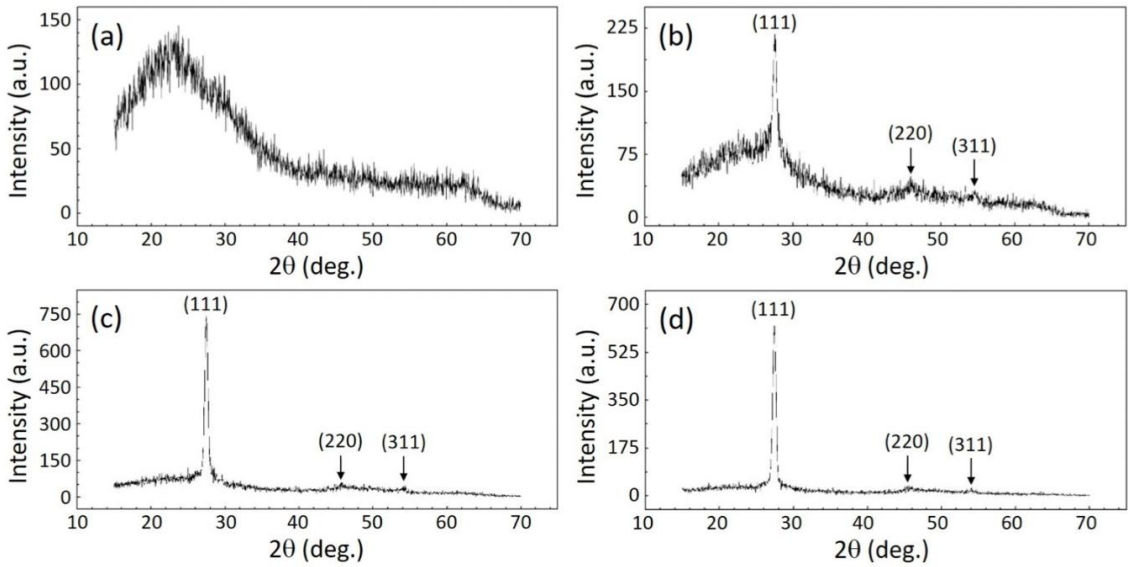


Figura 8 Analiza structurală în geometria GIXRD a filmelor de ZnSe depuse prin RF-MS pe sticlă optică în aceleași condiții, dar la puteri de lucru diferite: 60 W (a), 80 W (b), 100 W (c) și 120 W (d).

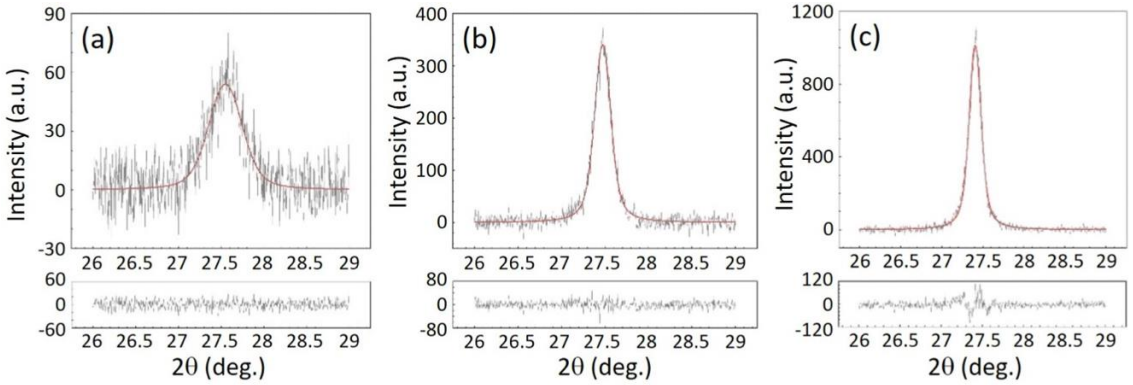


Figura 9 Profilele XRD înregistrate pentru peak-ul (111) în geometria Bragg-Brentano teta-teta pentru filmele de ZnSe depuse prin RF-MS la puteri de lucru diferite: 80 W (a), 100 W (b) și 120 W (c).

Tabel 3 Parametrii structurali ai filmelor de ZnSe depuse prin pulverizare catodică în plasmă tip magnetron în regim de radio-frecvență (RF-MS) la puteri RF diferite: 80 W, 100 W, 120 W.

Puterea de depunere a probei de ZnSe (P-RF)	$D_{ef}^{(111)}\ nm$	$\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$	a (Å)
80 W	51.8	$5.39 \cdot 10^{-3}$	5.603
100 W	79.7	$2.31 \cdot 10^{-3}$	5.619
120 W	107.4	$2.19 \cdot 10^{-3}$	5.628

Topografia suprafeței filmelor de *ZnSe* a fost analizată prin intermediul microscopiei de forță atomică (AFM) în modul non-contact ("tapping-mode"). Imaginile 2D din Figura 10 au permis evaluarea parametrilor statistici precum rugozitatea superficială RMS, parametrii Skewness și Excess Kurtosis, pentru o arie de scanare de $5 \times 5\ \mu m^2$. Conform Figurii 10, filmele de ZnSe prezintă un aspect uniform și o suprafață granulară ce variază cu puterea, valoarea RMS având o valoare mică în fiecare caz. Aceste rezultate, alături de alte observații experimentale, întăresc faptul că parametrii de depunere aferenți metodei pulverizării catodice în plasmă pentru ZnSe sunt optimi pentru a obține un film subțire de înaltă calitate, cu o densitate de defecte scăzută, suprafață netedă și plată, potrivit ca strat „fereastră" în aplicațiile de tipul celor vizate în studiul nostru, și anume strat „fereastră" într-un dispozitiv fotovoltaic în configurație tip substrat. Mai mult, filmul depus la 100 W prezintă o calitate morfologică excepțională, cu următorii parametrii statistici, considerați mai departe ca referință: RMS = 1 nm, Skewness (Ssk) de 0.3, și Excess Kurtosis (Sk) de 0.1.

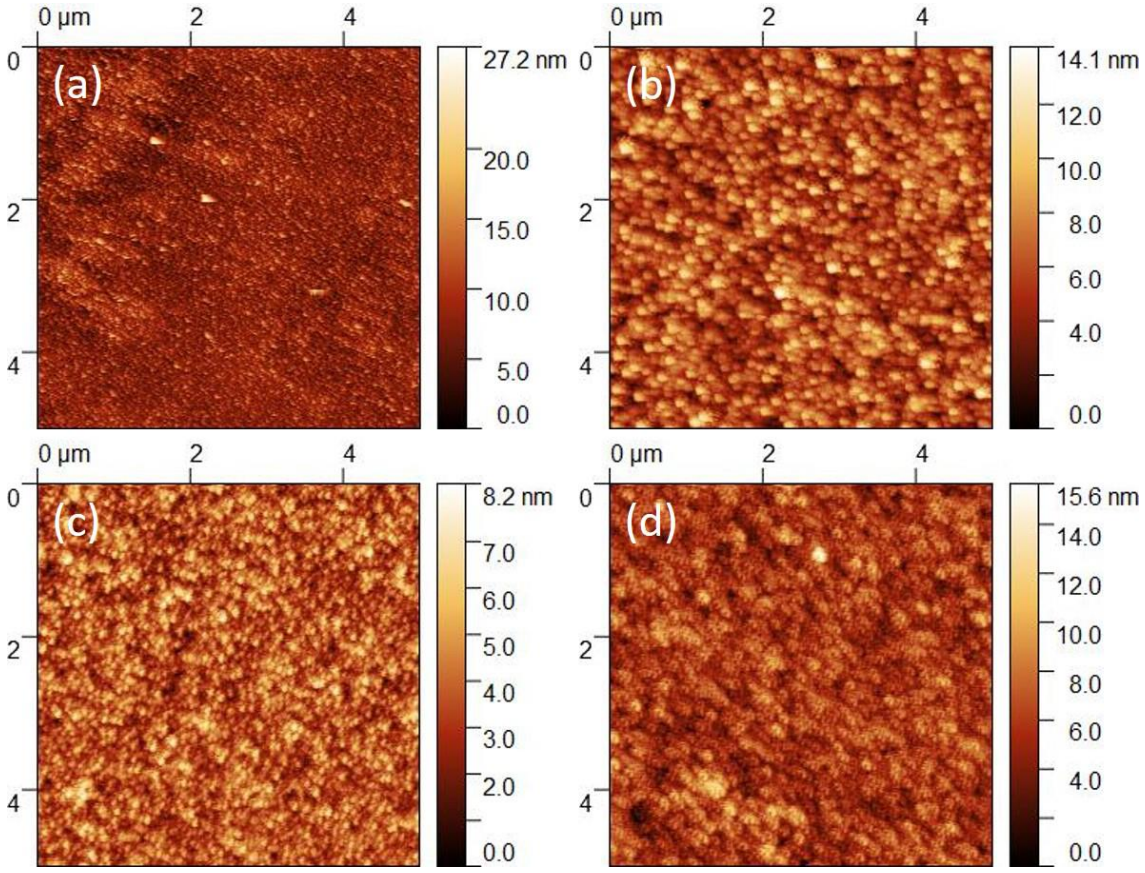


Figura 10 Imagini AFM 2D în modul non-contact (tapping) a filmelor de ZnSe depuse prin RF-MS la diferite puteri: (a) 60 W, (b) 80 W, (c) 100 W și (d) 120 W. Evaluarea parametrilor morfologici s-a făcut cu ajutorul software-ului Gwyddion.

Analiza SEM în secțiune a filmelor de ZnSe obținute la diferite puteri relevă o suprafață compactă a filmului, având un nivel de compactitate ridicat. Pe baza acestor imagini au fost evaluate grosimile filmelor variind între 37 nm și 351 nm (vezi Figura 11).

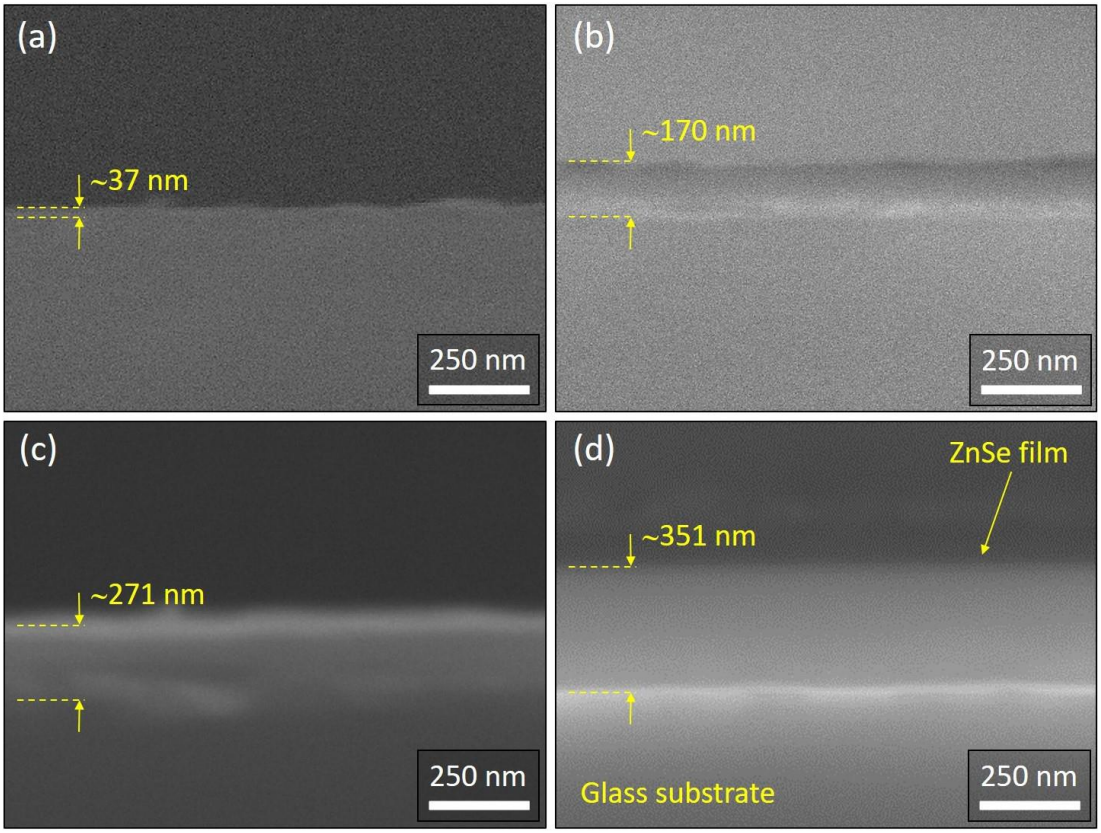


Figura 11 Analiza SEM (în secțiune) a filmelor subțiri de ZnSe depuse prin RF-MS pe un substrat de sticlă optică, în condiții date, la diferite puteri: (a) 60 W, (b) 80 W, (c) 100 W și (d)120 W. Grosimea măsurată a filmelor este indicată.

Nu în ultimul rând, caracterizările optice de transmisie demonstrează o bună transparentă a filmelor de ZnSe obținute, cu o tendință de scădere a transparenței cu creșterea grosimii filmelor cum este de așteptat. De asemenea, prin intermediul spectrelor de absorbție, s-au determinat valorile benzilor interzise, ce se apropie de valoarea bulk a ZnSe. **Tabelul 4** rezumă rezultatele obținute. Merită menționat și că aceste studii sunt prezentate în extenso, prin intermediul a două publicații recente în reviste cotate ISI (**Nanomaterials, IF 5.076**, respectiv, **Proceedings of the Romanian Academy, Series A, IF 1.523**) [10,11].

Tabel 4 Parametrii morfo-structurali ai filmelor subțiri de ZnSe obținute prin RF-MS la diferite puteri. Banda interzisă (E_g) obținută este de asemenea indicată. RMS denotă rugozitatea superficială a filmelor, obținută prin Microscopie de Forță Atomică (AFM).

Probe analizate	**Grosime (nm)**	**RMS (nm)**	**E_g (eV)**
ZnSe (60 W)	37	2.4	2.54
ZnSe (80 W)	170	1.8	2.59
ZnSe (100 W)	271	1.0	2.60
ZnSe (120 W)	351	1.6	2.65

2.3.3. Construcția și caracterizarea celulelor solare convenționale

În continuare au fost preparate structuri fotovoltaice pe bază de heterojoncțiuni ZnTe/ZnSe, de forma BSs/ZnTe/ZnSe/(ZnO)/TCO, unde BSs a fost reprezentat de sticlă acoperită de Au sau aliaj Ag:In, iar TCO-ul a fost un film subțire de ITO (oxid de staniu dopat cu indiu) sau AZO (oxid de zinc dopat cu aluminiu) depus pe sticlă. Motivația folosirii ITO stă în multitudinea de studii experimentale în care este integrat ca oxid transparent și conductor (TCO), ceea ce a dus la optimizarea condițiilor de depunere, prin urmare pentru a testa interfețele și performanțele celulelor ce folosesc materiale despre care nu există un număr foarte mare de studii la nivelul comunității, este important să menținem cât mai mulți factori și elemente cunoscute, în primă fază.

1. Celule solare de tip: Au/ZnTe/ZnSe/ZnO/ITO

Electrodul de spate se bazează pe aur (Au), depus prin evaporare termică în vid (TVE) în următoarele condiții: temperatura sursei de 1000°C, o presiunea de $3 \cdot 10^{-5}$ Torr, viteza de depunere de 20 Å/s, temperatura substratului de 100°C. În acest condiții, filmul de Au a avut o grosime de 100 nm, evaluată în timp real cu ajutorul QCM-ului. Condițiile de depunere a filmelor active precum și a electrodului fereastră de ITO sunt prezentate în **Tabelul 5**.

Tabel 5 Condiții de depunere prin RF-MS a filmelor active și a electrodului fereastră de ITO.

Gaz de lucru/atmosfera din incintă: Argon (Ar) Distanța țintă-substrat: 9 cm					
Film	Puterea de lucru (W)	Presiunea de lucru (mbar)	Timp de depunere (min)	Temperatura substratului (°C)	Grosime evaluată via Transmisie Optică (nm)
ZnTe	50	$2.5 \cdot 10^{-3}$	60	200	437
ZnSe	100	$8.6 \cdot 10^{-3}$	20	220	237
ZnO	50	$7.4 \cdot 10^{-3}$	35	RT	-
ITO	80	$8.6 \cdot 10^{-3}$	40	RT	275

Reprezentarea grafică a răspunsului electric în cazul structurii la polarizare directă și inversă cu tensiuni între -1.5 V și 1.5 V la întuneric (dark) implică [12]:

- Trasarea caracteristicii ambipolare I = f(V) și fitarea acesteia cu ajutorul ecuației Schockley-Reed modificată (vezi Figura 12a):

$$I = I_0 \left[e^{\frac{q(U - IR_{serie})}{nk_BT}} - 1 \right] + \frac{U - IR_{serie}}{R_{șunt}}$$

- Trasarea caracteristicii $\ln(I_{dark}) = f(V)$ pe porțiunea polarizării directe (0 V – 1.5 V), vezi Figura 12b.

Se poate observa în Figura 12b existența unei regiuni liniare pentru tensiuni între 0.1 V și 0.58 V, corespunzătoare nivelelor de injecție scăzute. Totodată, efectele rezistențelor serie și șunt asupra caracteristicii $I_{dark} – U_{dark}$ sunt vizibile: la valori mari ale tensiunii este evidențiată curbarea către un platou a dependenței în scară semilogaritmică a curentului de întuneric de tensiunea de întuneric, datorată rezistenței serie a dispozitivului. În intervalul de valori scăzute ale tensiunii la polarizare

directă precum și la polarizare inversă, rezistența șunt acționează asupra caracteristicii prin aplatizarea acesteia tot către un platou. Evaluarea factorului de idealitate al diodei (n = 5.44), precum și a valorii curentului de saturație la polarizare inversă $I_0 = 6.93\,nA$, duc la rezultate puternic afectate de efectele rezistenței serie și șunt ale structurii, de aceea se impun corecții pentru eliminarea acestor influențe pentru a putea determina parametrii cu o precizie ridicată.

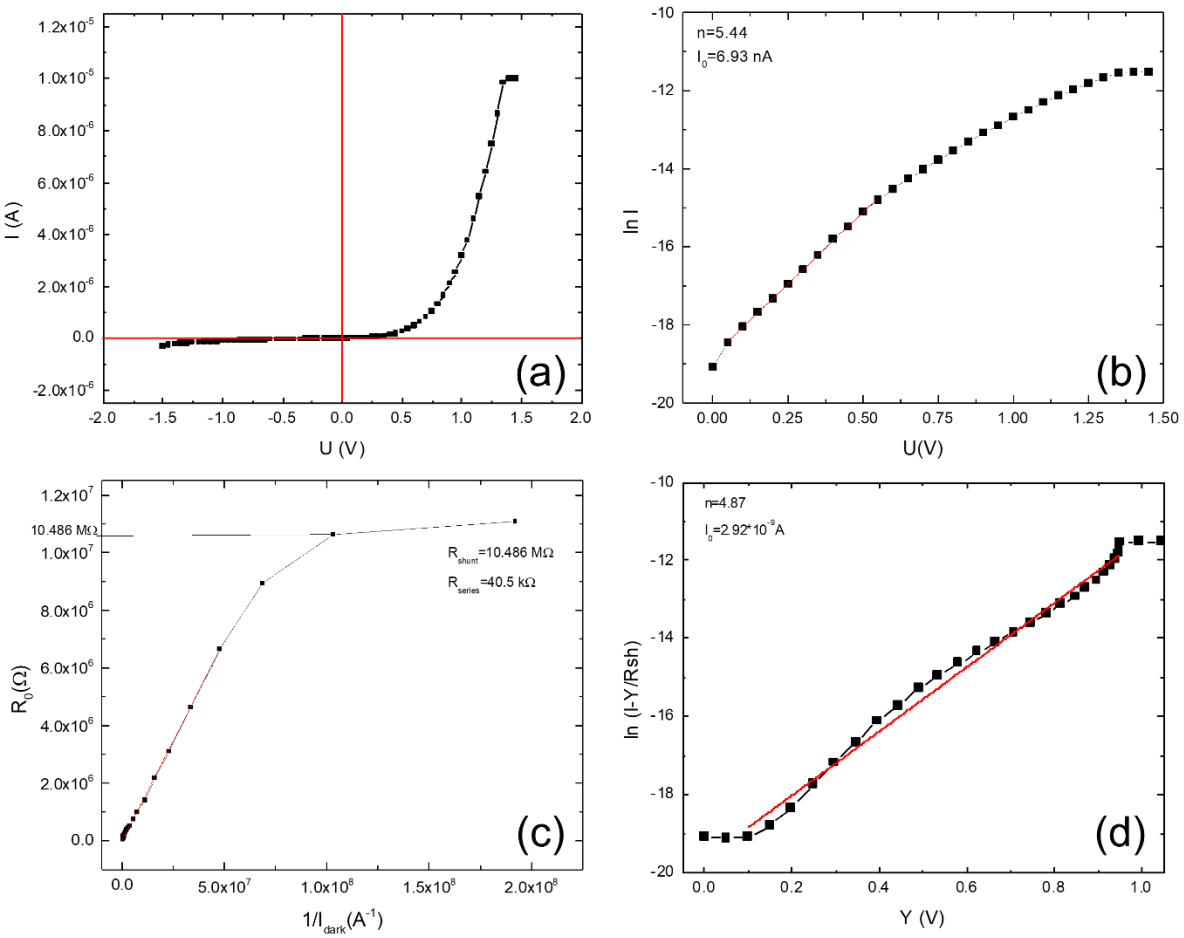


Figura 12 (a) Reprezentarea caracteristicii ambipolare curent-tensiune la întuneric pentru polarizarea între -1.5 V și 1.5 V a structurii Au/ZnTe/ZnSe/ZnO/ITO; (b) Reprezentarea în scară semilogaritmică a caracteristicii curent-tensiune la polarizare directă a dispozitivului; (c) Dependența rezistenței heterojoncțiunii (R_0) de inversul intensității curentului ce străbate structura ($1/I_{dark}$). Se remarcă prezența a două regiuni: regiunea de creștere liniară a dependenței, de unde se evaluează rezistența serie (R_{serie}), respectiv domeniul de platou, regiune specifică estimării rezistenței șunt ($R_{șunt}$); (d) Reprezentarea în scară semilogaritmică a curentului de întuneric la polarizare directă ce permite evaluările factorului de idealitate al diodei și curentului de saturație la polarizare inversă după eliminarea efectelor rezistenței serie și șunt. De asemenea, intervalul de linearitate al caracteristicii a fost extins de la [0.1 V – 0.58 V] la [0.1 V – 0.92 V].

- Calculul rezistenței serie și șunt aferente structurii (trasarea caracteristicii rezistență a heterojoncțiunii *versus* inversul intensității curentului ce străbate structura, $R_0 = f(1/I_{dark})$ precum și evaluarea factorului de idealitate (n) al structurii conform relației (unde $\beta = q/nk_BT$):

$$R_0 = \frac{dU}{dI} = R_s + \frac{1}{\{\beta I_0 \exp[\beta(U - IR_s)] + 1/R_{sh}\}}$$

Astfel, prin fitarea liniară a primei regiuni (vezi Figura 12c) se obține valoarea rezistenței serie: $R_{serie} = 10^6\ \Omega = 1\ M\Omega$, în timp ce domeniul de platou al caracteristicii oferă chiar valoarea rezistenței șunt (prin prelungirea domeniului de platou până la intersecția cu axa Oy corespunzătoare rezistenței heterojoncțiunii), $R_{șunt} \sim 83 \cdot 10^6\ \Omega = 83\ M\Omega$.

- În urma efectelor puternice ale rezistenței serie și șunt asupra structurii, se impune eliminarea influențelor celor două rezistențe, îmbunătățind astfel linearitatea caracteristicii $\ln(I_{dark}) = f(U_{dark})$. Se face următoarea schimbare de variabilă $Y = U\text{-}IR_s$, unde Y este căderea de tensiune de pe heterojoncțiunea formată de ZnTe/ZnSe, astfel că ecuația Schockley Reed modificată, devine:

$$I = I_0[\exp(\beta Y) - 1] + \frac{Y}{R_{sh}}$$

Așadar, prin reprezentarea grafică a $\ln(I\text{-}Y/R_{sh})$ *vs.* Y (vezi Figura 12d) se îmbunătățește linearitatea caracteristicii curent-tensiune, iar intervalul de tensiuni pentru zona liniară este extins la 0.1 V – 0.92 V. De asemenea, valoarea factorului de idealitate al diodei scade de la 5.44 la 4.87, în timp ce curentul de saturație la polarizare inversă I_0 are valoarea 2.92 nA.

- La iluminarea structurii Au/ZnSe/ZnTe/ZnO/ITO cu lungimea de undă 550 nm a fost trasat spectrul de acțiune (dependența coeficientului eficienței cuantice a structurii EQE de lungimea de undă a radiației incidente în domeniul 300-900 nm). Conform Figurii 13 procesul de foto-generare a purtătorilor de sarcină ia loc la lungimi de undă mici. Pentru stratul subțire de ZnSe absorbția sa maximă se petrece la 459 nm, în timp ce pentru ZnTe are loc la 548 nm. Faptul că în spectrul de acțiune nu sunt prezente peak-uri la aceste 2 lungimi de undă, sugerează că această dependență este puternic translatată către domeniul lungimilor de undă din ultraviolet (UV). Prin urmare, bariera de la interfața ZnSe/ZnTe este mutată la interfața ZnO/ZnSe, având în vedere peak-ul maxim obținut la 450 nm, lungimea de undă de absorbție caracteristică ZnSe.

Pe baza acestor rezultate, putem afirma că structura fabricată Au/ZnTe/ZnSe/ZnO/ITO este potrivită și pentru aplicații ce se bazează pe senzori sensibili în domeniul UV.

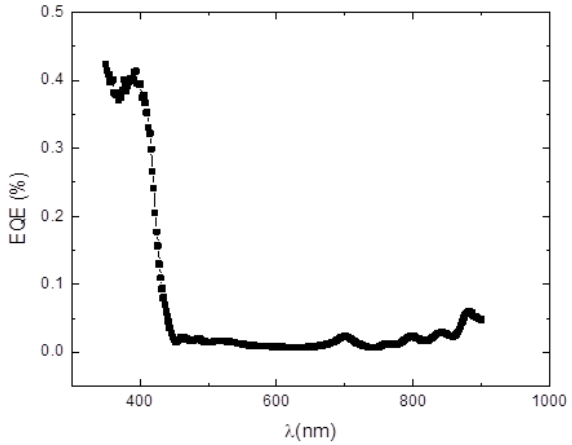


Figura 13 Spectrul de acțiune al structurii Au/ZnTe/ZnSe/ZnO/ITO. Se remarcă o deplasare puternică a răspunsului structurii în domeniul lungimilor de undă din ultraviolet (UV).

2. Celule solare de tip: Ag:In/ZnTe/ZnSe/AZO

De această dată electrodul de spate se bazează pe un aliaj Argint-Indiu (Ag:In) depus prin evaporare termică în vid (TVE) în următoarele condiții: temperatura sursei de 900°C, o presiunea de $3 \cdot 10^{-5}$ Torr, temperatura substratului de 100°C și un timp de evaporare de 2 min. Condițiile de depunere a filmelor active precum și a electrodului fereastră de AZO sunt prezentate în **Tabelul 6**.

Tabel 6 Condiții de depunere prin RF-MS a filmelor active și a electrodului fereastră de AZO.

Depunerea filmului de ZnTe prin TVE în două etape				
Film	Temperatura sursei (°C)	Presiunea de lucru (Torr)	Timp de evaporare (min)	Temperatura substratului (°C)
ZnTe	450	$5 \cdot 10^{-4}$	30	250
	Tratament termic la 300°C, presiunea $5.8 \cdot 10^{-4}$ Torr, timp de 10 min			
	650	$5 \cdot 10^{-4}$	30	200
	Tratament termic la 250°C, presiunea $5.4 \cdot 10^{-4}$ Torr, timp de 30 min			
Depunerea filmelor de ZnSe și AZO prin RF-MS Gaz de lucru/atmosfera din incintă: Argon (Ar) Distanța țintă-substrat: 9 cm				
	Puterea de lucru (W)	Presiunea de lucru (mbar)	Timp de depunere (min)	Temperatura substratului (°C)
ZnSe	80	$8.6 \cdot 10^{-3}$	30	220
	Tratament termic la 200°C, presiunea $4.6 \cdot 10^{-3}$ mbar, timp de 45 min			
AZO	50	$8.6 \cdot 10^{-3}$	45	220

- Caracteristicile I-V ale răspunsului electric înregistrate pentru mai multe puteri de iluminare ale structurii (de la 100 mW/cm^2 până la 20 mW/cm^2) în condiții de iluminare A.M 1.5, sunt prezentate în Figura 14.

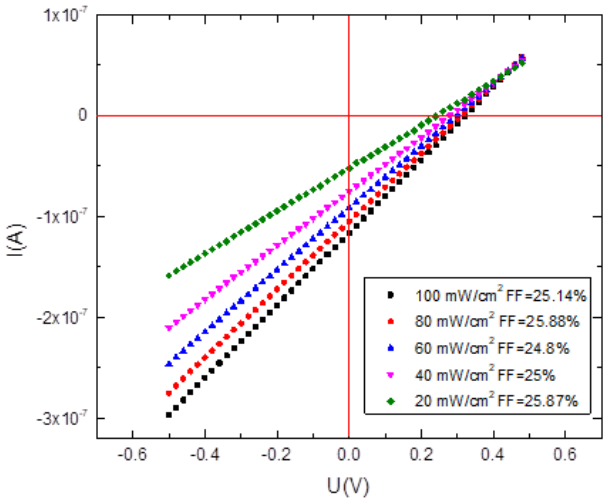


Figura 14 Caracteristica I-V la iluminarea în condiții A.M 1.5 pentru diferite puteri ale iluminării (100 mW/cm^2 – 20 mW/cm^2) a structurii Ag:In/ZnTe/ZnSe/AZO. Se remarcă sensibilitatea caracteristicii cu puterea de iluminare.

Se remarcă cadranul IV al reprezentării, iar parametrii ce îl delimitează: curentul de scurt circuit I_{sc} și tensiunea de funcționare în gol U_{oc} au fost utilizați în calculul factorului de umplere (FF – fill factor) al cadranului IV, pentru fiecare dintre cele 5 situații ale puterii de iluminare, folosind expresia:

$$FF = \frac{I_{max} * U_{max}}{I_{sc} * U_{oc}}$$

În continuare, caracterizarea electrică a celulelor fotovoltaice astfel preparate, la polarizare directă și inversă cu tensiuni între -1 V și 1 V la întuneric (dark) a implicat un protocol asemănător cu cel descris anterior [12]. În particular:

- Trasarea caracteristicii ambipolare I = f(V) și fitarea acesteia cu ajutorul ecuației Schockley-Reed modificată (vezi Figura 15a).

- Trasarea caracteristicii $\ln(I_{dark}) = f(V)$ pe porțiunea polarizării directe (0 V – 1 V), vezi Figura 15b.

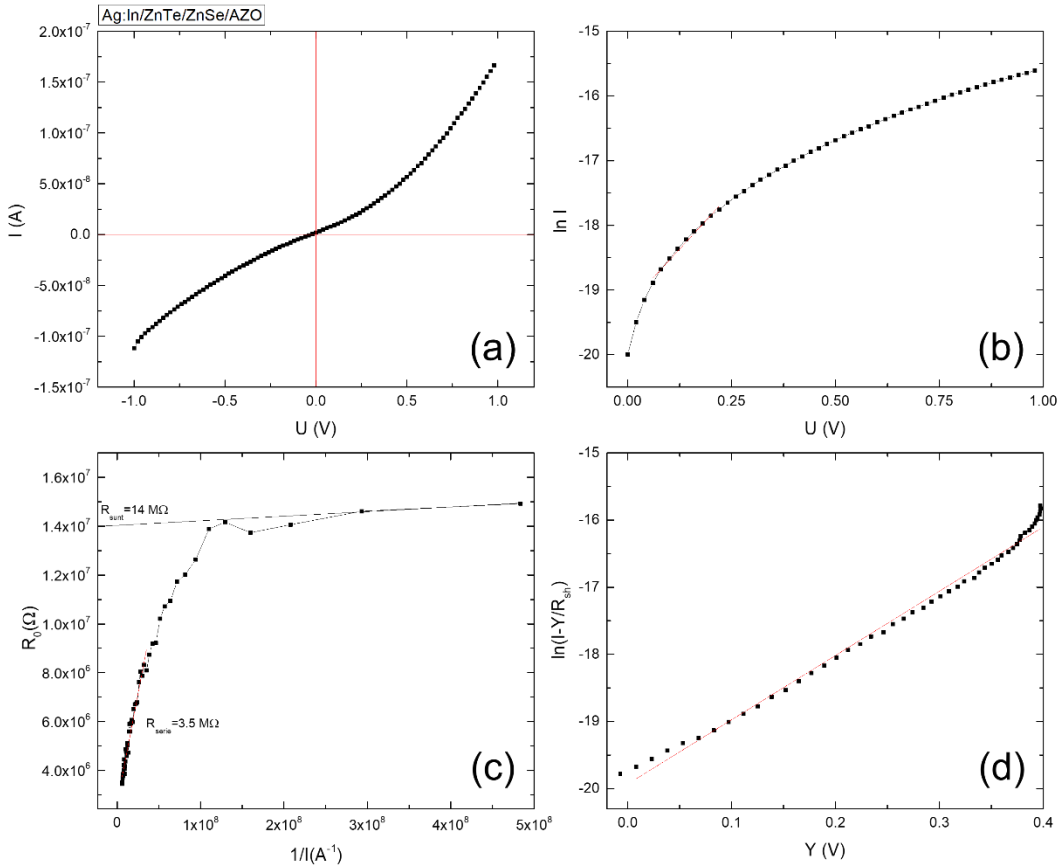


Figura 15 (a) Caracteristica curent-tensiune de întuneric a structurii Ag:In/ZnTe/ZnSe/AZO la polarizare între -1 V și 1 V; (b) Reprezentarea în scară semilogaritmică a caracteristicii curent-tensiune la întuneric aferentă dispozitivului; (c) Dependența rezistenței R_0 a heterojoncțiunii ZnTe/ZnSe *versus* inversul curentului de întuneric ce străbate structura. Se remarcă cele două regiuni: cea de creștere liniară, prin fitul căreia se determină valoarea rezistenței serie și zona de platou, a cărei intersecție cu axa Oy permite evaluarea rezistenței șunt; (d) Reprezentarea în scară semilogaritmică a curentului de întuneric la polarizare directă ce permite evaluările factorului de idealitate al diodei și curentului de saturație la polarizare inversă după eliminarea efectelor rezistenței serie și șunt.

În acest caz, este evidențiată porțiunea liniară cuprinsă între 0.06 V și 0.22 V. Evaluările factorului de idealitate al diodei, n = 5.74, și al curentului de saturație la polarizare inversă, I_0 = 4.42 nA, sunt influențate de efectele puternice ale rezistențelor serie și șunt.

- Calculul rezistenței serie și șunt aferente structurii, prin trasarea caracteristicii rezistenței heterojoncțiunii versus inversul intensității curentului ce străbate structura, $R_0=f(1/I_{dark})$. Din porțiunea de creștere liniară a dependenței se estimează valoarea rezistenței serie R_{serie} = 3.5 MΩ, iar din zona de platou este evaluată rezistența șunt $R_{șunt}$ = 14 MΩ (vezi Figura 15c).

- În urma efectelor puternice ale rezistenței serie și șunt asupra structurii, se impune eliminarea influențelor celor două rezistențe, îmbunătățind astfel linearitatea caracteristicii $\ln(I_{dark}) = f(U_{dark})$. Se face următoarea schimbare de variabilă $Y = U-IR_s$, unde Y este căderea de tensiune de pe heterojoncțiunea formată de ZnTe/ZnSe, astfel că ecuația Schockley Reed modificată, devine:

$$I = I_0[\exp(\beta Y) - 1] + \frac{Y}{R_{sh}}$$

Prin reprezentarea grafică a $\ln(I-Y/R_{sh})$ *vs.* Y se îmbunătățește linearitatea caracteristicii curent-tensiune (vezi Figura 15d), iar intervalul de tensiuni aferent zonei liniare se extinde de la [0.06 V – 0.22 V] la [0.02 V – 0 39 V]. Valorile factorului de idealitate și a curentului de saturație la polarizare inversă sunt mai corecte în lipsa efectelor produse de R_{serie} și $R_{șunt}$: $n = 4.18,\ I_0 = 2.25\ nA.$

Pe baza rezultatelor experimentale prezentate și a analizei comportamentului electric al structurii Ag:In/ZnTe/ZnSe/AZO putem afirma că aceasta înregistrează performanțe satisfăcătoare în funcționarea ca fotoelement și mai cu seamă ca fotodiodă.

3. Concluzii și Perspective

Concluzionând, rezultatele obținute până în prezent demonstrează fezabilitatea structurilor de tip BSs/ZnTe/ZnSe/(ZnO)/TCO de a funcționa ca fotoelement dar și ca foto-diodă (foto-detector UV). Avem în vedere continuarea studiilor comparative de optimizare a acestor structuri, precum și testarea de noi configurații de celule solare tip BSs/ZnTe/ZnSe/(ZnO)/TCO, pentru identificarea configurației optime ce poate fi utilizată mai degrabă ca fotoelement.

În același timp, sunt în desfășurare experimente de optimizare a electrozilor de spate bazați pe nanofire (NBEs), precum și studii de material vizând alegerea unei metode optime de depunere a stratului absorbant de ZnTe care să pătrundă uniform printre nanofire, contribuind la eficientizarea transportului sarcinilor electrice la interfața electrod colector/strat absorbant. În etapa următoare vom viza în principal construcția unor celule solare *„prototip”* având electrozi-de-spate bazați pe matrici dense de nanofire aliniate-vertical pe suprafața electrodului.

Se poate așadar observa că planul de realizare aferent **Etape 2** a proiectului NANODELL a fost atent urmărit, toate acțiunile menționate fiind finalizate sau în curs de finalizare. Trei articole științifice publicate recent [9-11] sunt în strânsă legătura cu tematica abordată în proiectul NANODELL și conțin detalii suplimentare despre experimentele prezentate în acest raport tehnico-științific. De asemenea, un nou articol științific este în curs de tehno-redactare (vezi secțiunea 4).

4. Managementul Proiectului și Acțiuni de Diseminare

În această perioadă s-au desfășurat multiple acțiuni de diseminare și popularizare a rezultatelor (**Act. 2.8**, vezi **Tabelul 1**), în care s-a menționat suportul financiar adus de proiectul NANODELL implementat la Universitatea din București, cu sprijinul direct al UEFISCDI:

- Articole publicate în reviste cotate ISI (*Autor principal; ♣Membru în echipă):
  - O. Toma, **V. A. Antohe*♣**, A. M. Panaitescu♣, S. Iftimie♣, A. M. Răduță♣, A. Radu, L. Ion and Ș. Antohe*, *"Effect of RF Power on the Physical Properties of Sputtered ZnSe Nanostructured Thin Films for Photovoltaic Applications"*, *Nanomaterials* **11(11)**, 2841 (October 2021), **IF 5.719**, doi: 10.3390/nano11112841;
  - D. Manica, **V. A. Antohe♣**, A. Moldovan, R. Pascu, S. Iftimie♣, L. Ion, M. P. Suchea* and S. Antohe*, *"Thickness Effect on Some Physical Properties of RF Sputtered ZnTe Thin Films for Potential Photovoltaic Applications"*, *Nanomaterials* **11(9)**, 2286 (September 2021), **IF 5.719**, doi: 10.3390/nano11092286;
  - L. Ion, S. Iftimie, A. Radu. **V. A. Antohe♣**, O. Toma, S. Antohe*, *"Physical Properties of RF-Sputtered ZnSe Thin Films for Photovoltaic Applications: Influence of Film Thickness"*, *Proceedings of the Romanian Academy, Series A* **22(1)**, 27-36 (March 2021), **IF 0.734**.
- Articole în curs de tehno-redactare (*Autor principal; ♣Membru în echipă):
  - A. M. Panaitescu*♣, … and **V.A. Antohe*♣**, *„Preparation and Characterization of Cadmium Telluride-Embedded Copper Nanowire Interfaces for Photovoltaic Applications"*, in preparation.
- Conferințe naționale și internaționale:
  - **V. A. Antohe** and S. Antohe*, *"Study of the RF-sputtered ZnSe thin films for electronic and optoelectronic applications"*, Conferința Științifică de Toamnă a Academiei Oamenilor de Știință din România (AOSR), November 18-19, 2021, Bucharest, Romania (Oral presentation, Online);
  - A. M. Panaitescu, A. M. Răduță, **V. A. Antohe**, S. Iftimie, L. Ion, A. Radu and Ș. Antohe, *"Physical properties of ultra-thin heterojunctions based on Cd and Cd free A^{II}-B^{VI} compounds for electronic and optoelectronic applications"*, TIM 20-21 Physics Conference, Condensed Matter Physics, Timișoara, November 11-13, 2021, Timișoara, Romania (Oral presentation, Online);
  - A. M. Panaitescu, **V. A. Antohe**, S. Iftimie, A. M. Răduță, A. Radu, L. Ion and Ș. Antohe, *"Physical properties of ultra-thin photovoltaic structures based on AII-BVI compounds"*, 4th Autumn School on Physics of Advanced Materials (PAMS-4), September 24-30, 2021, Sant Feliu de Guixols, Spain (Poster, Online);
  - A. M. Panaitescu, **V. A. Antohe**, S. Iftimie, O. Toma, L. Ion, A. Radu and Ș. Antohe, *"Effect of RF power on structural, morphological, optical and electrical properties of RF – sputtered ZnSe thin films for electronic and optoelectronic applications"*, 2021 Annual Scientific Conference, Solid State Physics and Materials Science, June 18, 2021, Faculty of Physics, University of Bucharest, Bucharest-Măgurele, Romania (Oral presentation, Online);
  - A. M. Răduță, S. Iftimie, **V. A. Antohe**, C. Locovei, A. Radu, L. Ion and Ș. Antohe, *"Effect of working power and thermal treatment on physical properties of RF-sputtered CdTe thin films for photovoltaic applications"*, 2021 Annual Scientific Conference, Solid State Physics and Materials Science, June 18, 2021, Faculty of Physics, University of Bucharest, Bucharest-Măgurele, Romania (Oral presentation, Online);
  - **V. A. Antohe** and S. Antohe, *"Effect of the applied power on the physical properties of RF-sputtered ZnSe thin films"*, Conferința Științifică de Primăvară a Academiei Oamenilor de Știință din România (AOSR), June 10, 2021, Bucharest, Romania (Oral presentation, Online);
  - S. Iftimie, D. Coman, C. Locovei, A. Rad, **V. A. Antohe**, A. Dumitru, M. Manica, C. Radu, L. Ion, and S. Antohe, *"Effects of in-situ and ex-situ thermal annealing on the physical properties of RF sputtered indium tin oxide thin films"*, E-MRS 2021 Spring Meeting, Substitution and recycling of critical raw materials in optoelectronic, magnetic and energy devices III (Symp. S), May 31-June 04, 2021, Strasbourg, France (Oral presentation, Online);
  - A. M. Panaitescu, O. Toma, A. Radu, A. M. Răduță, D. Manica, L. Dan, L. Ion, Ș. Antohe and **V. A. Antohe**, *"Effect of the applied power on the structural, morphological, optical and electrical properties of RF-sputtered ZnSe thin films"*, E-MRS 2021 Spring Meeting, Thin film chalcogenide photovoltaic materials (Symp. A), May 31-June 4, 2021, Strasbourg, France (Poster, Online);
  - S. Iftimie, C. Locovei, A. G. Șovăială, O. D. Baban, A. M. Răduță, A. M. Panaitescu, A. Radu, **V. A. Antohe**, A. Dumitru, L. Ion and Ș. Antohe, *"A comparison between substrate and superstrate photovoltaic structures based on CdTe/CdS heterojunction"*, E-MRS 2021 Spring Meeting, Thin film chalcogenide photovoltaic materials (Symp. A), May 31-June 4, 2021, Strasbourg, France (Poster, Online).
- Activități de popularizare tehnico-științifică către publicul larg:
  - Actualizarea și popularizarea pe rețelele sociale a paginilor Web dedicate proiectului NANODELL (mdeo.eu/MDEO/Proiecte/TE115/ și ava.myasustor.com/nanodell), unde sunt prezentate mai multe informații despre proiect, rezultatele științifice obținute, precum și acțiunile de diseminare științifică și publică desfășurate până în prezent;
  - Implicarea în cadrul evenimentului: *„Școala Altfel"* (Iunie 2021).
  - Implicarea în cadrul unei *Școli de Vară* pentru elevi (UBSU) organizată de ASUB (15-16 Iulie 2021).
- Managementul proiectului:
  - S-au organizat întâlniri frecvente între membrii echipei pentru stabilirea priorităților, precum și a gradului de implicare al fiecăruia;
  - S-au achiziționat echipamente și instrumente de laborator necesare implementării proiectului, după cum urmează:
    - Un Potențiostat/Galvanostat (Stanford Research Systems, SRS EC301) cu accesoriile aferente;
    - Un echipament de produs apă deionizată pură și ultra-pură (Merck, Direct-3Q UV) cu accesoriile aferente;
    - O baie de ultra-sonare (Elmasonic P60 H, dual-frequency unit, 37 kHz and 80 kHz);
    - Două interfețe GPIB cu accesoriile aferente, necesare controlului asistat de calculator;
  - S-a realizat prezentul raport tehnico-științific, precum și raportul financiar al **Etapei 2** a proiectului.

BIBLIOGRAFIE

[1] A. Pierret, M. Hocevar, S. L. Diedenhofen, R. E. Algra, E. Vlieg, E. C. Timmering, M. A. Verschuuren, G. W. G Immink, M. A. Verheijen and E. P. A. M. Bakkers, "Generic nano-imprint process for fabrication of nanowire arrays", *Nanotechnology* **21** 065305 (2010), doi: 10.1088/0957-4484/21/6/065305

[2] H. Cao, X. Li, B. Zhou, T. Chen, T. Shi, J. Zheng, G. Liu and Y. Wang, "On-Demand Fabrication of Si/SiO2 Nanowire Arrays by Nanosphere Lithography and Subsequent Thermal Oxidation", *Nanoscale Res. Lett.* **12**, 105 (2017), doi: 10.1186/s11671-017-1883-5

[3] H. S. Virk, K. Kishore, V. Balouria, "Fabrication of Copper Nanowires by Electrodeposition Using Anodic Alumina and Polymer Templates", *J. Nano Research* **10**, 63–67 (2010), doi: 10.4028/www.scientific.net/jnanor.10.63

[4] S. Mátéfi-Tempfli, M. Mátéfi-Tempfli, A. Vlad, V. A. Antohe, L. Piraux, "Nanowires and nanostructures fabrication using template methods: a step forward to real devices combining electrochemical synthesis with lithographic techniques", *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* **20**, S249 (2009), doi: 10.1007/s10854-008-9568-6

[5] V. A. Antohe, M. Mátéfi-Tempfli, A. Attout, S. Yunus, P. Bertrand, C. A. Duțu, A. Vlad, S. Melinte, S. Mátéfi-Tempfli, L. Piraux, "Nanowire-templated microelectrodes for high-sensitivity pH detection", *Applied Physics Letters* **94**, 073118 (2009), doi: 10.1063/1.3089227

[6] V. A. Antohe, A. Radu, S. Mátéfi-Tempfli, L. Piraux, "Circuit Modelling on Polyaniline Functionalized Nanowire-Templated Micro-Interdigital Capacitors for pH Sensing", *IEEE Trans. Nano.* **10(6)**, 1314-1320 (2011), doi: 10.1109/TNANO.2011.2136384

[7] M. K. Sahoo, P. Kale, "Integration of silicon nanowires in solar cell structure for efficiency enhancement: A review", *Journal of Materiomics* **5(1)**, 34-48 (2019), doi: 10.1016/j.jmat.2018.11.007

[8] C. Locovei, N. Filipoiu, A. Kuncser, A. E. Stanciu, Ș. Antohe, C. F. Florina, A. Costas, I. Enculescu, L. Piraux, V. Kuncser, V. A. Antohe, "Unidirectional Magnetic Anisotropy in Dense Vertically-Standing Arrays of Passivated Nickel Nanotubes", *Nanomaterials* **10**, 2444 (2020), doi: 10.3390/nano10122444

[9] D. Manica, V. A. Antohe, A. Moldovan, R. Pascu, S. Iftimie, L. Ion, M. P. Suchea and S. Antohe, "Thickness Effect on Some Physical Properties of RF Sputtered ZnTe Thin Films for Potential Photovoltaic Applications", *Nanomaterials* **11(9)**, 2286 (2021), doi: 10.3390/nano11092286

[10] O. Toma, V. A. Antohe, A. M. Panaitescu, S. Iftimie, A. M. Răduță, A. Radu, L. Ion and Ș. Antohe, "Effect of RF Power on the Physical Properties of Sputtered ZnSe Nanostructured Thin Films for Photovoltaic Applications", *Nanomaterials* **11(11)**, 2841 (2021), doi: 10.3390/nano11112841

[11] L. Ion, S. Iftimie, A. Radu. V. A. Antohe, O. Toma, S. Antohe, "Physical Properties of RF-Sputtered ZnSe Thin Films for Photovoltaic Applications: Influence of Film Thickness", *Proceedings of the Romanian Academy, Series A* **22(1)**, 27-36 (2021)

[12] A. E. Rakhshani, "Heterojunction properties of electrodeposited CdTe/CdS solar cells", *Journal of Applied Physics* **90**, 4265-4271 (2001), doi: 10.1063/1.1397279

[13] Electrodeposition Fabrication of Chalcogenide Thin Films for Photovoltaic Applications, S. Saha et al., Electrochem 2020, 1, 286-321; doi:10.3390/electrochem1030019

[14] Capacitive Sensors Based on Localized Nanowire Arrays. Nanotechnology & Device Integration Routes, Vlad-Andrei ANTOHE, 2013, Lambert Academic Publishing, Saarbrucken

[15] Chalcogenide Science in Romania, A. Lorinczi et al., Phys. Status Solidi B 2020; doi:10.1002/pssb.202000284

[16] R. N. Bhattacharya, K. Rajeshwar, "Electrodeposition of CdTe Thin Films", J. Electrochem. Soc. 131(9), 2032 (1984), doi: 10.1149/1.2116014

[17] ZnS nanostructures: From synthesis to applications, X.Fang et al., Elsevier Progress in Materials Science 56(2011), 175-287; doi:10.1016/j.pmatsci.2010.10.001

[18] Electrochemical Deposition, Optical Properties and Photoelectrochemical Behavior of CdTe Films, Makoto TAKAHASHI, Kohei UOSAKI, Hideaki KITA, Journal of the Electrochemical Society, 131(1984)

[19] Electrochemical deposition and characterization of CdTe polycrystalline thin films, Silvia BONILLA, Enrique A. DALCHIELE, Thin Solid Films, 204(1991), 397-403

[20] Heterojunction properties of electrodeposited CdTe/CdS solar cells, A.E. Rakhshani, Journal of Applied Physics, 90(2001), 4265-4271; doi: 10.1063/1.1397279

[21] Effects of growth temperatures on the structural and optoelectronic properties of sputtered zinc sulphide thin films for solar cell applications, Faiazul Haque et al., Springer, Optical and Quantum Electronics (2019), 51:278; https://doi.org/10.1007/s11082-019-1994-6

[22] Three-Layered Photovoltaic Cell with an Enlarged Photoactive Region of Codeposited Dyes, S. Antohe, V. Ruxandra, L. Tugulea, V. Gheorghe, D. Ionascu, Journal de Physique III, 6 (1996), 1133-1144

[23] Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage chracteristics,, S.K. Cheung, N.W. Cheung, Applied Physics Letter 49(1986), 85-87; doi:10.1063/1.97359

[24] Optical properties of pulsed laser deposited ZnO thin films, R.Bazavan et al., Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 11(2009), 425-426

[25] X. Mathew, G. W. Thompson, V. P. Singh, J. C. McClure, S. Velumani, N. R. Mathews, P. J. Sebastian, "Development of CdTe thin films on flexible substrates – a review", Solar Energy Materials and Solar Cells 76(3), 293-303 (2003), doi: 10.1016/S0927-0248(02)00281-7

Data:
09/12/2021

Director de Proiect:
Conf. Univ. Dr. Ing. Vlad-Andrei ANTOHE