UNIVERSITATEA DE STAT DIN MOLDOVA

Departamentul Fizică Aplicată şi Informatică

Cu titlu de manuscris

C.Z.U. 537.311.322:539.21 (043.3)

AL QASSEM AMJAD

STUDIUL PROCESELOR FIZICE ÎN HETEROSTRUCTURILE FOTOSENSIBILE BAZATE PE STRATURI SUBȚIRI DE CdTe

Specialitatea

134.01 FIZICA ŞI TEHNOLOGIA MATERIALELOR

Rezumatul

tezei de doctor în ştiinţe fizice

CHIŞINĂU, 2025

Teza este elaborată în cadrul Departamentului „Fizică Aplicată și Informatică”, Laboratorul de cercetare științifică „Fizica Semiconductorilor”, Universitatea de Stat din Moldova.

Conducător științific:
GAȘIN P.A., Doctor habilitat în științe fizico-matematice, profesor

Consultant științific:
ACHIMOVA E.A., Doctor habilitat în științe fizice, conferențiar cercetător

Referenți oficiali:
ȚURCAN Vladimir, doctor habilitat în ştiinţe fizico-matematice, mem.-corr. AȘM
VERLAN Victor, doctor în ştiinţe fizico-matematice, conferențiar cercetător

Componența Consiliului Științific Specializat:
NEDEOGLO Dumitru, președinte, doctor habilitat în ştiinţe fizico-matematice, profesor universitar
COJOCARU Ion, secretar științific, doctor în ştiinţe fizico-matematice
CULIUC Leonid, doctor habilitat în ştiinţe fizico-matematice, acad. AȘM
ZALAMAI Victor, doctor în ştiinţe fizico-matematice, conferențiar cercetător
ȘIKIMAKA Olga, doctor în ştiinţe fizico-matematice, conferențiar cercetător
CURMEI Nicolai, doctor în ştiinţe fizice.

Susținerea tezei va avea loc la data de 24 . iunie . 2025, la ora 15.00 , în cadrul ședinței Consiliului Științific Specializat D 134.01-25-18 în cadrul Institutul de Fizica Aplicată al Universității de Stat din Moldova (str. Academiei 5, aud. 230, Chișinău, MD-2028, Moldova).

Cu teza de doctorat și cu autoreferatul se poate face cunoștință la Biblioteca Universității de Stat din Moldova (str. A. Mateevici 60, Chișinău, MD-2009, Moldova) și pe site-ul C.N.A.A. (www.cnaa.md).
Autoreferatul a fost expediat la data de 23 . mai. 2025

Secretarul științific al Consiliului Științific Specializat,
doctor în științe fizico-matematice **Cojocaru I.**
Conducător științific,
doctor habilitat în științe fizico-matematice, profesor universitar **Gașin P.**
Consultant științific,
doctor habilitat în științe fizice, conferențiar cercetător **Achimova E.**

Autor: **AL QASSEM AMJAD**

© AL QASSEM AMJAD, 2025

CUPRINS

CUPRINS……3

CARACTERISTICA GENERALĂ A LUCRĂRII……4

CONȚINUTUL TEZEI.....8

CONCLUZII PRINCIPALE..... 21

RECOMANDĂRI……..23

BIBLIOGRAFIE.....24

LISTĂ LUCRĂRILOR PUBLICATE LA TEMA TEZEI ……..26

ADNOTARE.....27

АННОТАЦИЯ…… 28

SUMMARY…..……..29

CARACTERISTICA GENERALĂ A LUCRĂRII

Actualitate și importanță

Problema dezvoltării energiei solare are un caracter global și reprezintă o sarcină de mare actualitate pentru cercetare. Implementarea pe scară largă a energiei solare terestre este posibilă doar în condițiile reducerii semnificative a costului energiei electrice obținute prin conversia radiației solare. Tehnologia pe bază de straturi subțiri are un potențial considerabil pentru reducerea costului modulelor solare. Rata de scădere a costului de producție al modulelor solare pe bază de straturi subțiri este semnificativ mai mare decât în cazul celor pe bază de siliciu monocristalin. În prezent, pe lângă siliciul amorf hidrogenat și siliciul microcristalin, au fost dezvoltate mai multe tipuri de celule fotovoltaice cu straturi subțiri, aflate atât în stadiu de cercetare și testare, cât și deja utilizate cu succes în diverse domenii ale activității umane. Încă din anii 1950, telurura de cadmiu (CdTe) este cunoscută ca un material promițător pentru energia solară. Are lățimea benzii interzise aproape ideală (1,45 eV, 300 K) și o capacitate foarte mare de absorbție a radiației solare ($> 10^5$ cm^{-1}) [1]. Câteva decenii mai târziu, s-a descoperit că un strat subțire de sulfură de cadmiu (CdS), aplicat pe suprafața stratului de CdTe, duce la creșterea eficienței de la 5% până la 8% [2,3]. Straturile subțiri de CdTe sunt relativ ieftine de produs. Creșterea eficienței celulelor solare CdS/CdTe este un obiectiv important pentru toți specialiștii din domeniul energiei alternative [4]. În prezent, pentru a crea elemente solare cu straturi subțiri CdS/CdTe mai competitive, este necesară rezolvarea mai multor probleme legate de: (a) timpul scurt de viață al purtătorilor de sarcină minoritari, cauzat de recombinarea perechilor electron-gol în centrele de defecte din stratul de CdTe, la interfața dintre CdS și CdTe; (b) transparența insuficientă a stratului de oxid conductor (TCO) și a straturilor de CdS; (c) lipsa unui contact ohmic bun între straturile de CdTe și contactele posterioare; și (d) posibilitatea dopării stabile a straturilor de tip p-CdTe [5]. Conform rapoartelor First Solar, Inc., a fost atins un nivel record de eficiență de 22,1% pentru celulele solare și 18,2% eficiență pentru modulele solare [6,7]. Calculul teoretic pentru astfel de elemente este de 28–30% [8,9]. La fabricarea celulelor solare bazate pe heterojoncțiuni subțiri (HJ) de tip n-CdS/p-CdTe devine actuală problema proprietăților interfeței. Determinarea parametrilor interfeței este o parte esențială a cercetărilor orientate spre creșterea eficienței de conversie a celulelor solare de acest tip.

Scopul principal al lucrării constă în dezvoltarea unei tehnologii de obținere a celulelor solare pe bază de straturi subțiri din compuși ai grupei A_2B_6 și realizarea unui studiu complex al

proprietăților interfețelor, în vederea identificării metodelor de creștere a eficienței conversiei energiei solare în energie electrică.

Pentru atingerea scopului formulat al tezei de doctorat, a fost necesară rezolvarea următoarelor sarcini:

1. Studierea particularităților epitaxiei prin metoda volumului cuasi-închis pentru compușii semiconductori din grupa A_2B_6 și elaborarea metodelor de optimizare a regimurilor de obținere a straturilor subțiri de CdS și CdTe.
2. Investigarea principalelor procese electrofizice, care influențează eficiența celulelor solare.
3. Elaborarea tehnologiei de creare a unui strat izolator subțire de CdO la interfața CdS/CdTe.
4. Cercetarea proprietăților electrice ale heterojoncțiunilor CdS/CdTe și CdS/CdO/CdTe, utilizând o abordare complexă ce include analiza caracteristicilor volt-faradice (U-C), volt-amperice (I-U) și admitanței spectroscopice la diferite temperaturi și frecvențe ale semnalului alternativ.
5. Studierea influenței stratului izolator subțire de CdO asupra parametrilor fotoelectrici ai celulelor solare CdS/CdTe.

Obiecte și metode de cercetare

Obiectele cercetării sunt structura, proprietățile optice și procesele electronice în straturile subțiri semiconductoare de CdS, CdTe, CdO, precum și proprietățile fotoelectrice ale celulelor solare bazate pe acestea. Metodele principale de cercetare includ: analiza structurii prin difracție cu raze X la difractometrul Empyrean (PANalytical), microscopia electronică de scanare (SEM) la microscopul electronic MERLIN (Carl Zeiss, Germania), analiza spectrofotometrică (transparența, absorbția) la spectrofotometrul UV-Vis Cary 300 (Varian, SUA) în intervalul de lungimi de undă λ = 190–1100 nm, măsurarea caracteristicilor volt-amperice (I-U) și volt-faradice (U-C), atât în întuneric cât și la iluminare, utilizând sistemul de măsurare Keithley 2400, precum și spectroscopia de admitanță cu analizorul de impedanță Agilent E4980A. Prelucrarea matematică a rezultatelor cercetării a fost realizată utilizând programul Origin 9.5. Metoda principală de evaluare a veridicității rezultatelor calculate a constat în compararea acestora cu datele experimentale și cele disponibile în literatura de specialitate.

Noutatea științifică și originalitatea rezultatelor

1. Au fost determinate regimurile optime (temperatura substratului, temperatura tratamentului termic, temperatura evaporatorului, grosimea) pentru obținerea straturilor subțiri de CdS și CdTe cu

structură microcristalină de înaltă calitate, caracterizată prin dimensiuni ale granulelor cristaline de 2–10 μm și orientarea lor dominantă de-a lungul direcțiilor cristalografice [002] și [111], respectiv.

2. A fost elaborat un regim tehnologic (presiune parțială a oxigenului >10 mol%, temperatura substratului 100°C) pentru obținerea stratului izolator subțire de CdO prin pulverizare magnetron, fiind determinată grosimea optimă a acestuia pentru realizarea celulelor solare cu strat subțire cu curenți de scurtcircuit și tensiune în circuit deschis cu 25% mai mari comparativ cu cele fără stratul subțire.
3. Introducerea unui strat izolator subțire de CdO, cu grosimea de 8–10 nm, prin pulverizare magnetron între stratul frontal de CdS și stratul absorbant de CdTe, reduce densitatea stărilor de suprafață de la $N_{ss} = 3{,}5 \cdot 10^{14}$ cm^{-2} eV^{-1} pentru heterojoncțiunea CdS/CdTe până la $N_{ss} = 9{,}2 \cdot 10^{13}$ cm^{-2} eV^{-1} pentru heterojoncțiunea CdS/CdO/CdTe, crescând densitatea curentului de scurtcircuit de la 15,7 mA/cm² până la 26,5 mA/cm² și tensiunea de circuit deschis de la 0,66 V până la 0,77 V, astfel îmbunătățind eficiența de conversie de la 3,8% până la 8,9%.

Principala sarcină științifică rezolvată în teza de doctorat constă în faptul că, pentru prima dată, a fost realizat un complex larg de cercetări electrice asupra heterojoncțiunii CdS/CdTe și a fost demonstrat că una dintre metodele de creștere a concentrației de goluri libere pentru ionizarea defectelor (creșterea concentrației defectelor acceptoare proprii de cadmiu, V_{Cd}) este introducerea unui strat izolator subțire de CdO la interfața CdS/CdTe a heterojoncțiunii fotoconvertoare.

<u>Tezele înaintate spre susținerea tezei</u>

1. Pentru creșterea eficienței celulelor solare pe bază structurii CdS/CdO/CdTe, au fost determinate grosimile optime ale straturilor componente: stratul frontal de CdS - 480 nm, stratul dielectric de i-CdO - 8÷10 nm și stratul absorbant de CdTe - 8÷10 μm, care au fost obținute prin optimizarea regimurilor de depunere a compușilor binari folosind tehnologia volumului cuasi-închis.
2. Au fost stabiliți parametrii fotovoltaici ai celulelor solare CdS/CdO/CdTe în funcție de grosimea stratului de i-CdO, obținut prin pulverizare magnetron, indicând că stratul optim de i-CdO se depune la presiunea parțială a oxigenului de $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ Torr și T = 100°C. Creșterea ulterioară a presiunii parțiale a oxigenului și a temperaturii substratului în timpul depunerii straturilor duce la schimbarea structurii de la amorfă la policrocristalină cu dimensiuni mici ale cristalitelor.
3. Aplicarea unui strat dielectric subțire de CdO la interfața CdS/CdTe, cu presiunea parțială a oxigenului de $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ Torr, temperatura substratului de 100°C și grosimea de 8÷10 nm, contribuie

la creșterea curentului de scurtcircuit și a tensiunii de circuit deschis cu 20 - 25 %, crescând astfel eficiența conversiei energiei solare în energie electrică de la 3,8 % până la 8,9 %.

4. A fost stabilit, printr-o cercetare complexă a caracteristicilor volt-amperice, volt-faradice și amitanței spectroscopice la diferite temperaturi și frecvențe, că transportul purtătorilor de sarcină în celulele solare CdS/CdO/CdTe, realizat prin mecanismul generare-recombinare, este caracterizat de următoarele energii de activare: 0,45 eV și 0,27 eV pentru CdS/CdTe și 0,25 eV pentru CdS/CdO/CdTe.

Valoarea practică

Au fost elaborate regimurile optimale (temperaturile substratului, tratamentului termic și evaporatorului) pentru obținerea straturilor subțiri de CdS și CdTe cu compoziție stoechiometrică și structură microcristalină de înaltă calitate, precum și regimul tehnologic pentru obținerea stratului izolator de CdO prin pulverizare magnetron pentru fabricarea celulelor solare subțiri cu caracteristici funcționale îmbunătățite. Această tehnologie poate fi aplicată cu succes pentru crearea de celule solare subțiri semiconductoare fotosensibile pe substraturi din sticlă și suporți flexibili. Aceste celule solare, realizate pe substraturi flexibile, datorită valorilor record ale puterii electrice pe unitatea de greutate a structurii dispozitivului, pot fi utilizate pentru alimentarea autonomă a unor dispozitive electronice cu dimensiuni reduse (puncte automate ale sistemului de comunicații, sisteme de monitorizare meteorologică, sisteme de monitorizare și control al traficului pe autostrăzi, semne de navigație și semnalizare etc.).

Aprobarea rezultatelor

Principalele rezultate ale tezei de doctorat au fost discutate în cadrul seminarelor științifice în cadrul Universității de Stat din Moldova, precum și prezentate la următoarele conferințe științifice:

1. Conferința științifică a Universității de Stat din Moldova „Integrare prin cercetare și inovare”, Chișinău, Moldova, 26-28 septembrie 2013, 128-129. ISBN 978-9975-71-417-4.
2. A 7-a Conferință Internațională de Știința Materialelor și Fizica Materiei Condensate, MSCMP, Chișinău, Moldova, 16-19 septembrie 2014 (Abstracts book of the 7th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, MSCMP, Chisinau, Moldova, September 16-19, 2014, p. 273).
3. A 36-a Conferință Europeană și Expoziție de Energie Solară Fotovoltaică, Franța, 2019 (The 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, France 2019).

4. Conferința Internațională de Nanotehnologii și Inginerie Biomedicală ICNBME 2019: 4th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering pp 707-711, Conference paper First Online: 18 September 2019, 910 Accesses, Part of the IFMBE Proceedings book series (IFMBE, volume 77).
5. Conferința științifică „Integrare prin cercetare și inovare", Chișinău, Moldova, 10-11 noiembrie 2020, 290-293. CZU: 538.975.621.383.
6. Virtual Conference, Spring Meeting 2022 "Sputtered CdO nanolayer as an interface engineering approach to CdTe solar cells", European Materials Research Society.

Pe baza materialelor tezei de doctorat au fost publicate 8 lucrări științifice, inclusiv două articole în reviste naționale recomandate de ANACEC și 4 în volumele conferințelor internaționale. Lista este anexată la sfârșitul tezei.

Structura tezei.

Teza de doctor este scrisă în limba rusă și este alcătuită din introducere, cinci capitole, concluzii generale, anexe și lista lucrărilor citate. Teza are în total 132 pagini și conține 68 imagini, 12 tabele, 65 formule și 171 referințe bibliografice, incluzând lucrările în care au fost publicate rezultatele acestei teze.

Cuvinte cheie: Sulfură de cadmiu (CdS), telurură de cadmiu (CdTe), heterojoncțiune (HJ), celulă solară (CS), volum cuasi-închis, oxid de cadmiu (CdO).

CONȚINUTUL TEZEI

În I**ntroducere** este prezentată actualitatea temei tezei, scopul principal al acesteia și sarcinile care trebuie rezolvate, precum și noutatea științifică și valoarea practică a rezultatelor obținute, de asemenea și principalele teze înaintate spre susținere.

În primul capitol al tezei de doctor sunt analizate datele din literatură privind structura, proprietățile fizice ale straturilor subțiri semiconductoare de CdS și CdTe, precum și metodele de obținere ale acestora, împreună cu heterojoncțiunile pe baza lor. Sunt discutate principalele proprietăți fizico-chimice ale straturilor subțiri de CdS și CdTe (structura cristalină, lățimea benzii interzise, tranzițiile optice), obținute prin cercetări experimentale. Paragrafe separate sunt dedicate metodelor tehnologice de obținere a acestor straturilor subțiri, heterojoncțiunilor pe baza lor, și metodelor de investigare a proprietăților electrice și fotoelectrice. În prezent, pentru crearea unor celule solare pe bază de straturi subțiri de CdS/CdTe mai competitive, este necesară soluționarea unei serii de probleme legate de: timpul scurt de viață al purtătorilor de sarcină minoritari, cauzat de

recombinarea perechilor electron-gol în centrele de defecte din stratul de CdTe la interfața dintre CdS și CdTe; transparența insuficientă a stratului de oxid conductor (TCO) și a straturilor de CdS; lipsa unui contact ohmic bun între stratul de CdTe și contactul din spate. Obținerea unei concentrații de goluri p> 10^{17} cm^{-3} în straturile de p-CdTe reprezintă una dintre condițiile necesare pentru fabricarea celulelor solare eficiente. Tehnologia volumului cuasi-închis (CSS) este una dintre cele mai eficiente metode de creștere a straturilor de CdTe și CdS cu caracteristici fizice reproductibile.

Al doilea capitol este dedicat metodologiei și tehnicii experimentale pentru obținerea straturilor subțiri de CdS, CdTe și CdO, justificând alegerea metodelor de CSS și pulverizarea magnetron pentru obținerea acestor straturi. În Figura 1 este prezentat blocul schematic al tehnologiei volumului cuasi-închis.

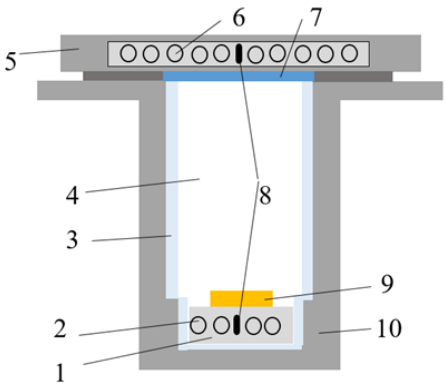


Figura 1. Sistemă modificată a metodei CSS pentru fabricarea straturilor subțiri de CdS și CdTe. 1 - blocul sursei; 2 - încălzitorul sursei; 3 - tub de cuarț; 4 - volum închis; 5 - blocul substratului; 6 - încălzitorul substratului; 7 - substrat; 8 - termocuplu; 9 - CdS sau CdTe; 10 - bloc de grafit.

Metoda CSS are o serie de avantaje față de alte metode, cum ar fi: a) rate mari de depunere, ceea ce o face atractivă pentru scopuri de producție; b) temperaturile procesului de pulverizare (ale sursei și ale substratului) care nu duc la difuzia componentelor în heterojoncțiunea CdS/CdTe, ceea ce ar putea deteriora calitatea limitei de separare; c) volumul închis al camerei limitează ieșirea componentelor compusului din zona procesului termodinamic; d) volumul mic al camerei închise asigură o densitate mare a vaporilor, îmbunătățind stoechiometria și structura cristalină a straturilor subțiri [10]. În sistemul reactorului este prevăzut un control precis al temperaturilor evaporatorului și al substratului, ceea ce asigură un regim reglat de obținere al straturilor subțiri semiconductoare.

Pentru obținerea straturilor subțiri de CdO a fost utilizată metoda de pulverizare a magnetronului de la ținta de cadmiu. Gazul de lucru era introdus direct către țintă printr-un canal

special în corpul camerei, iar presiunea gazului (O_2) era controlată printr-un dispozitiv special. În Figura 2 este prezentată incinta pentru obținerea straturilor subțiri de CdO prin metoda de pulverizare magnetron.

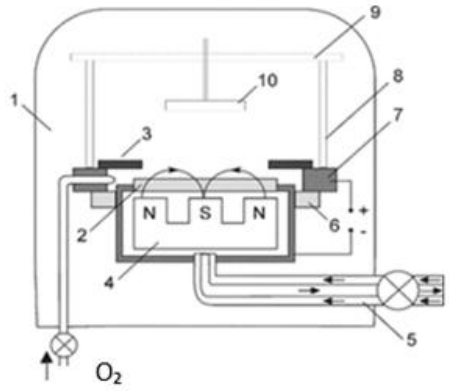


Figura 2. Schema blocului dispozitivului de pulverizare magnetron. 1 - corpul; 2 - catod-țintă; 3 - anod; 4 - sistemul magnetic; 5 - sistemul de evacuare; 6 - garnituri; 7 - masă de lucru; 8 - cameră din sticlă de cuarț; 9 - capac; 10 - substrat.

Sunt descrise metodele de cercetare a morfologiei suprafeței prin intermediul unui microscop cu forță atomică și a microscopiei electronice de scanare și analiza prin difracție de raze X (XRD) pentru investigarea structurii substanței. De asemenea, este prezentată metodologia de măsurare a caracteristicilor volt-amperice (I-U) și a caracteristicilor volt-faradice (U-C) ale heterojoncțiunilor. O metodă eficientă de caracterizare a heterostructurilor este spectroscopia de admitanță, care include profilarea statică volt-faradică și spectrele de conductivitate în funcție de temperatură. Utilizarea acestor metode de obținere a stratului și a metodelor de cercetare a proprietăților acestora permite formularea următoarelor concluzii:

1. Metoda CSS utilizată permite creșterea straturilor subțiri în condiții aproape de echilibru și obținerea unui grad înalt de cristalinitate. Metoda CSS este mai economică și mai reproductibilă.
2. Principalii parametri ai procesului de pulverizare magnetronică sunt temperatura substratului, distanța țintă-substrat și raportul între tensiunea de descărcare și presiunea gazului de pulverizare U/P. La un curent de descărcare dat, viteza de creștere a straturilor corelează semnificativ cu tensiunea, care la rândul său este determinată de concentrația de oxigen din stratul de suprafață al țintei.

3. Pentru determinarea proprietăților electrofizice ale straturilor se utilizează diverse metode și aparate. Microscopul cu forță atomică și microscopul electronic de scanare sunt utilizate pentru investigarea morfologiei suprafeței straturilor. Metoda difracției de raze X este necesară pentru studierea structurii materiei. Spectroscopia optică este utilizată pentru cercetarea structurii interne a atomilor și moleculelor substanței.
4. Măsurarea caracteristicilor volt-amperice (I-U) în întuneric și la iluminare și a caracteristicilor volt-faradice (U-C) sunt metodele principale pentru studiul proprietăților electrice ale heterojoncțiunilor. Din analiza acestor caracteristici se poate evalua potențialul heterojoncțiunilor pentru crearea celulelor solare de înaltă eficiență.
5. Spectroscopia de admitanță, care include profilarea volt-faradică staționară și spectrele de temperatură ale conductivității, este o metodă eficientă de caracterizare a heterostructurilor. Această metodă permite determinarea cu mare precizie a tuturor parametrilor principali ai heterostructurilor: discontinuitatea zonelor energetice, nivelurile energetice ale electronilor, concentrația purtătorilor de sarcină, profilul părții inferioare a zonei de conducție și a zonei de valență.

În al treilea capitol sunt prezentate rezultatele cercetărilor privind straturile de CdS, CdTe și CdO. Straturile de CdS reprezintă fereastră optică pentru structurile de barieră bazate pe CdTe. Cercetările principale ale straturilor de CdS, fabricate prin metoda volumului cuasi-închis, au fost realizate din perspectiva transmitanței optice. În Figura 3 sunt prezentate spectrele de transmitanță ale CdS cu grosime diferită.

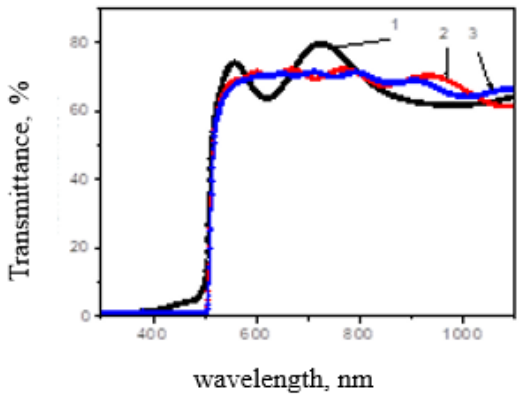
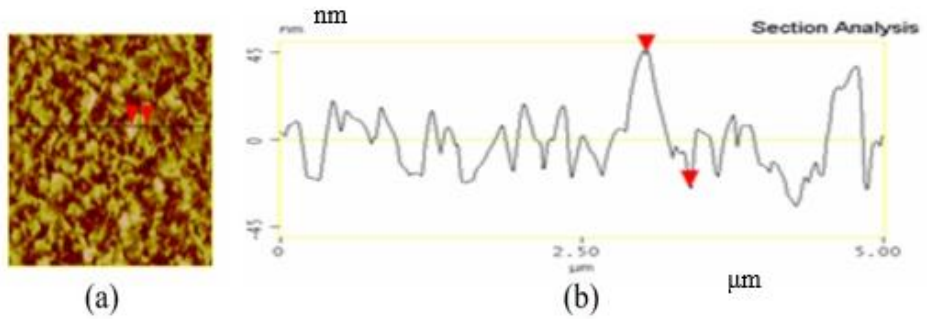


Figura 3. Spectrele de transmitanță ale straturilor de CdS cu grosimi diferite, d, μm: 1 - 0,48; 2 - 1,04; 3 - 1,37.

Transmitanță maximă (T) de 80% este atinsă pentru stratul de CdS cu grosimea de 0,48 μm. Suprafața stratului de CdS nu este netedă, iar imaginea obținută cu ajutorul unui microscop cu forță atomică a arătat că grosimea maximă a variațiilor de-a lungul stratului de CdS este de 70 nm (Figura 4).



Distanța pe suprafață: 373,56 nm Distanța orizontală (L): 361,33 nm

Distanța verticală: 69,931 nm Unghi: 10,954º

Figura 4. Imaginea suprafeței stratului de CdS obținută cu ajutorul unui microscop cu forță atomică (a) profilul suprafeței stratului, evidențiind curba corespunzătoare rugozității.

Stratul de CdTe, obținut și el prin metoda volumului cuasi-închis, este stratul activ principal al heterostructurii studiate, deoarece toate procesele fizice care determină eficiența dispozitivului au loc în acest strat. Studiul influenței temperaturii sursei și substratului asupra proprietăților electrofizice a permis determinarea regimurilor tehnologice optime pentru straturile de CdS și CdTe, temperaturii pentru CdS T_{surs}= 630°C, T_{sub}= 340°C, iar pentru CdTe, T_{surs}= 580°C, T_{sub}= 340°C. Un aspect important pentru straturile subțiri de CdTe este tratarea cu cloruri, care duce la creșterea dimensiunii cristalitelor stratului de CdTe, reducerea semnificativă a rezistenței specifice și creșterea sensibilității fotovoltaice a straturilor. Au fost estimate timpul și temperaturile necesare stabilizării proprietăților straturilor după tratarea cu cloruri. Pe baza tehnologiei elaborate pentru obținerea straturilor de CdS și CdTe, a fost realizată heterojoncțiunea CdS/CdTe.

A fost elaborată tehnologia de obținere a straturilor de CdO prin metoda pulverizare magnetron a unei plăci de cadmiu într-o atmosferă de oxigen la curent continuu.

Tabelul 1 Parametrii de depunere a straturilor subțiri de CdO

Distanța țintă-substrat	30-35 mm
Presiunea de pulverizare	Presiunea gazului de lucru în camera de lucru (3-4) x 10^{-3} mm Hg
Amestecul de gaze	O_2
Curentul de pulverizare	10-15 mA/cm²
Tensiunea catodului	100-150 V
Temperatura substratului	100^{o} C
Timpul de pulverizare	10-20 s

Straturile de CdO au fost transparente în intervalul (330-1000) nm cu o lățime a benzii interzise de 3,75 eV. Grosimea stratului de CdO a fost controlată prin timpul de pulverizare și calculată folosind o curbă de calibrare în dependență de grosimea stratului de timpul de pulverizare. Viteza de creștere a stratului era de 5 Å/s.

Conform tehnologiilor dezvoltate pentru obținerea straturilor, stratul nanometric de CdO a fost aplicat între straturile de CdS și CdTe, acoperind jumătate din suprafața stratului de CdS. Ca rezultat, au fost obținute două structuri ITO/CdS/CdTe/Ni și ITO/CdS/CdO/CdTe/Ni (Figura 5).

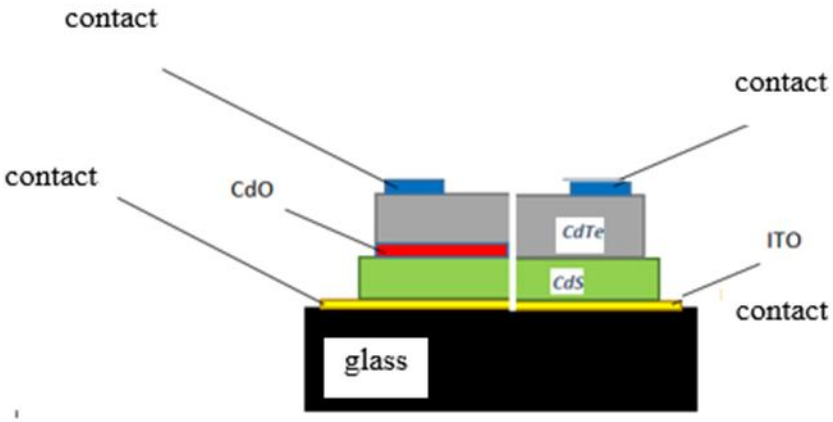
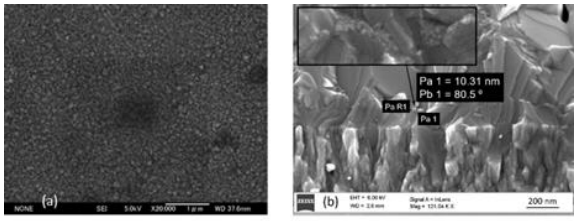


Figura 5. Imagine schematică a două heterojoncțiuni (CdS/CdO/CdTe) și (CdS/CdTe).

Stratul subțire de CdO aplicat pe CdS, cu o grosime de aproximativ 8-10 nm, acoperă suprafața stratului de CdS, netezind relieful suprafeței, făcând-o mai uniformă și ajutând la blocarea difuziei impurităților din CdS în stratul de CdTe.



(a) (b)

Figura 6. Imagine SEM a stratului de CdO aplicat pe stratul subțire de CdS (a), și imaginea secțiunii transversale a structurii TCO/CdS/CdO/CdTe (b). În inserția imaginii secțiunii transversale a heterostructurii CdS/CdO/CdTe se observă acumularea neregulată de CdO la interfață.

Contactele ohmice utilizate pentru studierea proprietăților electrofizice ale structurilor au fost straturile de Ni și Sb_2Te_3/Ni. Astfel, a fost dezvoltat un traseu tehnologic pentru obținerea în etape a celulelor solare cu configurație pe partea din spate, pe baza structurii sticlă/ITO/*n*-CdS/CdO/*p*-CdTe/Sb_2Te_3/Ni.

În capitolul patru sunt prezentate cercetările proprietăților electrice ale heterojoncțiunilor CdS/CdTe și CdS/CdO/CdTe în intervalul temperaturilor de funcționare. Studiul caracteristicilor volt-amperice (I-U) a arătat că această dependență este caracteristică pentru mecanismul de generare-recombinare Saha-Noyce-Shockley în regiunea sarcinii spațiale (RSS) a structurii de tip diodă, conform căreia curentul direct este determinat de recombinarea prin nivelurile impurităților (defectelor) și este descris pe baza modelului Saha-Noyce-Shockley, prin formula (1):

$$I_{gr} = I_{gr}^{0}\left[exp\left(\frac{eV}{nKT}\right) - 1\right] \quad (1)$$

unde I^0_{gr} este curentul de saturație de generare-recombinare la tensiunea U = 0.

$$I_{gr}^{0} = \frac{q\alpha n_i}{\tau_{0t}} \quad (2)$$

unde n_i — concentrația proprie a purtătorilor de sarcină în CdTe (n_i = 1,2·10^{12} cm^{-3} la T = 300 K) [11]), $\alpha = kT/qE$ — lățimea eficientă a regiunii de recombinare, E — intensitatea câmpului electric în joncțiunea p-n. Au fost determinate curenții de saturație, care la 303 K sunt: 1,5·10^{-10} A pentru CdS/CdTe și 1,35·10^{-10} A pentru CdS/CdO/CdTe. Conform expresiei (2) duratele de viață la introducerea nanostratului de i-CdO nu se modifică semnificativ ceea ce indică faptul că toate procesele fizice de transfer a curentului au loc în stratul de CdTe, iar nanostratul de CdO acționează ca un fel de stabilizator de pierderi a purtătorilor de curent minoritari.

Studiul caracteristicilor volt-amperice (I-U) la diferite temperaturi (77-333 K) a arătat că coeficientul n variază, ceea ce sugerează o concentrație semnificativă a centrelor de captare în regiunea de sarcină a structurii de tip diodă [12]. Dependența de temperatură a înălțimii barierei de potențial a heterojoncțiunilor CdS/CdTe și CdS/CdO/CdTe este bine descrisă de ecuația (3):

$$\varphi_0(T) = \alpha_0(0) - \alpha_\varphi T \quad (3)$$

unde α_0 = 3,92 x 10^{-3} eV·K^{-1} și α_ϕ = 3,44 x 10^{-3} eV K^{-1} sunt coeficienții de temperatură. Valorile mari ale α_ϕ și $\alpha_0(0)$ se datorează concentrației ridicate a stărilor de suprafață (N_{ss}) la interfața heterojoncțiunii. Odată cu creșterea temperaturii, înălțimea barierei de potențial scade liniar pentru ambele structuri în intervalul temperaturilor mai mari temperaturii camerei. Valorile mari ale concentrației stărilor de suprafață determină valori mari ale curentului de saturație. Dependența curentului de saturație de temperatură $\ln(I_o) = f(10^3/T)$ pentru heterojoncțiunile CdS/CdTe și CdS/CdO/CdTe este prezentată în Figura 7. Profunzimea localizării nivelurilor energetice, calculată din dependența temperaturii $\ln(I_o) = f(10^3/T)$, corespunde energiilor de activare de 0,45 eV și 0,27 eV pentru CdS/CdTe și 0,25 eV pentru CdS/CdO/CdTe.

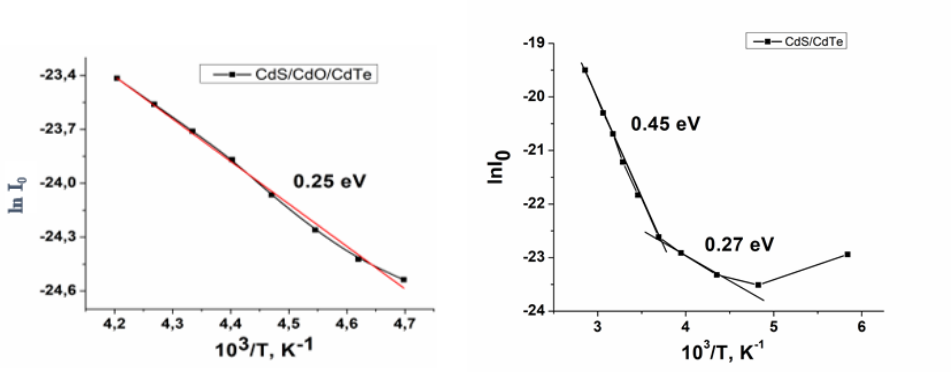


Figura 7. Dependența curentului de saturație de temperatură $\ln(I_o) = f(10^3/T)$ pentru heterojoncțiunile CdS/CdTe și CdS/CdO/CdTe.

Analiza caracteristicii volt-amperice (I-U) în ambele tipuri de structuri sugerează existența unui centru de recombinare cu două niveluri pentru CdS/CdTe și a unui centru cu un singur nivel pentru CdS/CdO/CdTe [13].

Măsurătorile capacitive au fost efectuate pentru a determina: concentrația impurității de aliere în stratul activ al heterostructurilor; înălțimea barierei de potențial a joncțiunii p-n; grosimea joncțiunii p-n; intensitatea câmpului electric în joncțiunea p-n; parametrii nivelurilor de suprafață. S-au studiat dependențele capacității față de frecvență în întuneric, la 300 K, la tensiunea V = 0 și V = 0,5 V (Figura 8). Pentru frecvențe de la 100 kHz până la 2 MHz capacitatea practic nu depinde de frecvență.

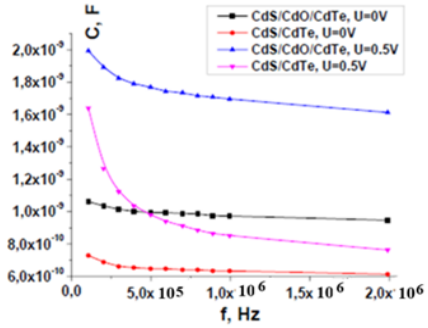


Figura 8. Caracteristicile de frecvență ale heterojoncțiunilor CdS/CdTe și CdS/CdO/CdTe la temperatura camerei.

Capacitatea heterojoncțiunei CdS/CdO/CdTe arată valori mai mari în comparație cu heterojoncțiunea CdS/CdTe. Reducerea capacității pe măsură ce crește frecvența indică existența unor nivele de suprafață în regiunea de separare CdS/CdTe.

Din măsurătorile caracteristicilor volt-faradice (U-C) au fost calculate parametrii electrici ai heterojoncțiunilor la frecvențe înalte (Tabelul 2).

Tabelul 2. Parametrii electrici pentru heterojoncțiunile CdS/CdO/CdTe și CdS/CdTe la frecvențe joase și înalte.

	0,1 MHz			**1 MHz**		
Proba	**U_{pc} B**	**N_{cv} cm^{-3}**	**W, µm**	**U_{pc} B**	**N_{cv} cm^{-3}**	**W, µm**
15G17 CdS/CdTe	0,51	1,1 x 10^{13}	5,3	0,83	4,5 x 10^{13}	5,6
6G87 CdS/CdO/CdTe	0,58	3,8 x 10^{13}	5,0	1,02	5,3 x 10^{13}	4,7
16G87 CdS/CdTe	0,54	2,4 x 10^{13}	5,2	0,87	4,5 x 10^{13}	4,9

Din caracteristicile volt-faradice (U-C) a fost calculat profilul distribuției concentrației impurităților ionizate pentru două heterojoncțiuni: CdS/CdTe și CdS/CdO/CdTe (Figura 9).

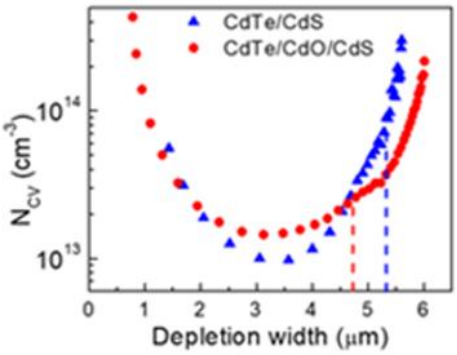


Figura 9. Compararea profilurilor de distribuție a purtătorilor de sarcină pentru heterojoncțiunile CdS/CdO/CdTe și CdS/CdTe, obținute din măsurătorile (U-C) la diferite temperaturi la frecvență de 1 MHz.

Creșterea concentrației de impurități ionizate în heterojoncțiunile CdS/CdO/CdTe este asociată cu scăderea densității de stări în regiunea de separare datorită stratului de CdO. A fost evaluată densitatea stărilor de suprafață: N_{ss} = 3,5·10^{14} cm^{-2} eV^{-1} pentru heterojoncțiunea CdS/CdTe și N_{ss} = 9,2·10^{13} cm^{-2} eV^{-1} pentru heterojoncțiunea CdS/CdO/CdTe, iar timpul de reîncărcare a fost τ = 3,35 μs și τ = 1,25 μs, respectiv. Pentru heterojoncțiunea CdS/CdO/CdTe, densitatea stărilor la interfața CdS/CdO și CdO/CdTe scade datorită saturării legăturilor rupte ale atomilor de pe suprafață cu atomi de oxigen.

A fost aplicată metoda spectroscopiei de admitanță în funcție de temperatură și frecvență, care ia în considerare caracteristicile dinamice ale nivelurilor de impurități. Spectrele de admitanță în funcție de temperatură ale heterojoncțiunii CdS/CdO/CdTe (Figura 10) prezintă un maxim, care este determinat de tranziția de la regimul de măsurare la frecvențe joase la cel de măsurare la frecvențe înalte.

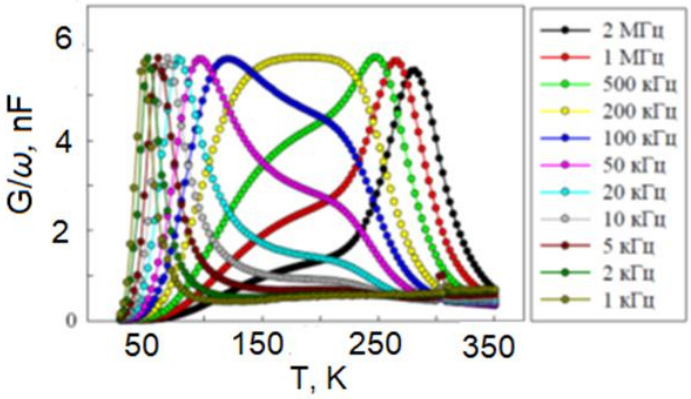


Figura 10. Dependența conductivității de temperatură și frecvență pentru heterojoncțiunea CdS/CdO/CdTe.

Poziția maximului este determinată de relația $2\pi f_0\tau = 1$. Construirea dependenței $\ln(\omega_0/T^2)$ în funcție de 1/T a permis determinarea energiei de ionizare a impurității (Figura 11).

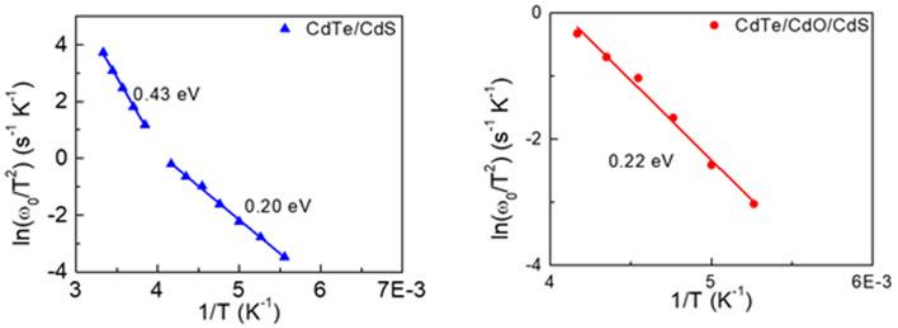


Figura 11. Graficele Arrhenius, construite pe baza dependenței temperaturale a frecvenței $\ln(\omega_0/T^2)$ = f(1/T) pentru HJ CdS/CdTe și HJ CdS/CdO/CdTe.

Din datele dependențelor, au fost identificate două niveluri de defecte pentru CdS/CdTe și un singur nivel de defecte pentru dispozitivele CdS/CdO/CdTe. S-a determinat că în HJ CdS/CdTe există două niveluri cu energii de ionizare: 0,20 eV și 0,43 eV, iar în HJ CdS/CdO/CdTe se observă doar un nivel de defecte cu energia de 0,2 eV, care sunt în acord cu datele din literatură.

Concentrațiile tipice de dopare sunt ~10^{13}–10^{14} cm^{-3} pentru CdTe policristalin, fiind limitate de cantitatea de V_{Cd} prezentă în CdTe [14].

În capitolul cinci sunt studiate proprietățile fotoelectrice ale heterostructurilor CdS/CdTe și heterojoncțiunilor CdS/CdO/CdTe în modul de conversie fotovoltaică și realizată o analiză comparativă a parametrilor heterojoncțiunii investigate. Studiile caracteristicilor volt-amperice (I-U) arată că introducerea unui nanostrat dielectric CdO între straturile de CdS și CdTe duce la o creștere semnificativă a curentului de scurtcircuit, precum și a tensiunii de circuit deschis și, prin urmare, la creșterea eficienței. Creșterea factorului de umplere (FF) indică îmbunătățirea condițiilor de separare a purtătorilor la interfața dintre CdS și CdTe. Grosimea nanostratului de CdO joacă un rol important (Figura 12). Grosimea optimă a stratului de CdO de (8-10) nm este cea mai bună pentru HJ CdS/CdTe.

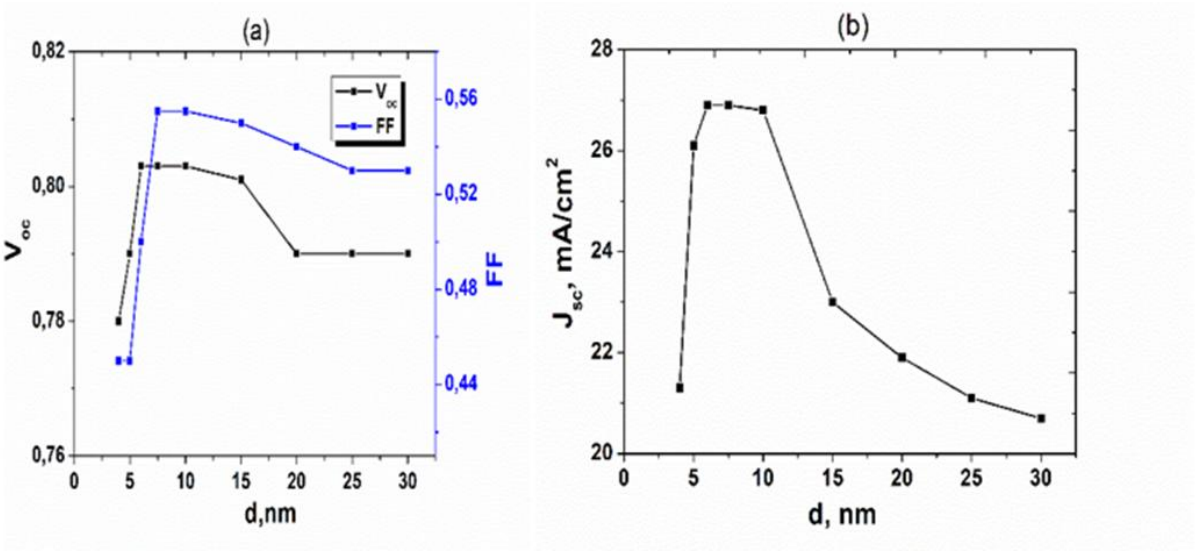


Figura 12. Dependența empirică U_{CD} (a) și J_{sc}, (b) de grosimea nanostratului de CdO. La un curent de descărcare de 10 mA și grosimi de 8-12 nm, au fost obținute celule solare cu strat CdO cu următorii parametri: U_{CD} = 0,800-0,824 V, J_{sc} = 25-26 mA/cm², FF = 0,490-0,590, η = 9,8-13,3%.

A fost studiată caracteristica volt-faradică (U-C) a structurii CdS/CdO/CdTe la iluminare 100 mW/cm² și la o frecvență a semnalului de 1 MHz. Prezența unei zone de saturație în U-C a permis estimarea grosimii eficiente a stratului de CdO. Cea mai mare modificare a capacității la iluminarea probelor se observă la o tensiune directă nulă sau foarte mică. Acest comportament al foto-capacității este caracteristic efectului capacitiv de suprafață [15]. În acest caz, efectul de suprafață se referă la interfața CdS/CdO/CdTe. Astfel, la interfața CdS/CdO/CdTe există o concentrație destul de mare de stări de suprafață, care provoacă acest efect. Din dependența $1/C^2 = f(U)$ se poate calcula concentrația purtătorilor de sarcină conform ecuației (4):

$$N(W) = -\frac{2}{q\varepsilon A^2}\left[\frac{d\left(\frac{1}{C^2}\right)}{dV}\right]^{-1} \quad (4)$$

unde A este aria elementului, $\varepsilon = \varepsilon_r\varepsilon_0$ este permitivitatea dielectrică, ε_r(CdTe) = 10,6, ε_0 = $8{,}85\cdot10^{-14}$ F/m, iar q este sarcina electronului. Valoarea obținută pentru N(W) este $(1{,}07\text{-}2{,}35)\cdot10^{13}$ cm^{-3}. Aceasta reprezintă concentrația purtătorilor de sarcină în zona sarcinii volumetrice, dar întreaga zonă de sarcină volumetrică se află în stratul de CdTe, ceea ce înseamnă că aceasta este concentrația din stratul de CdTe aproape de interfața CdS/CdO/CdTe. Sensibilitatea spectrală a structurilor se extinde în domeniul 0,5-0,86 μm (Figura 13).

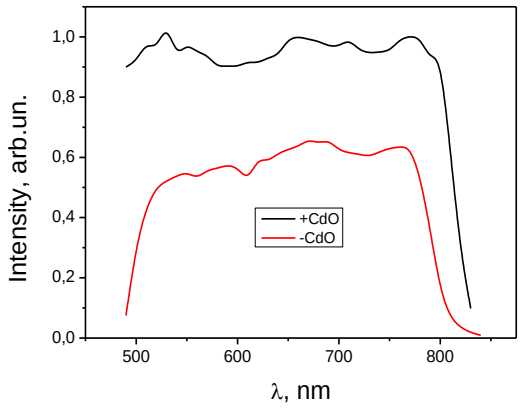


Figura 13. Dependența spectrală a fotosensibilității heterojoncțiunilor CdS/CdTe și CdS/CdO/CdTe în funcție de lungimea de undă.

Introducerea unui strat subțire de CdO crește semnificativ valoarea absolută a răspunsului fotoelectronic, schimbând ușor domeniul de sensibilitate, care este limitat de lățimile benzii interzise a CdS ΔE=2,44 eV și lățimea benzii interzise a CdTe ΔE=1,45 eV. Pentru structura CdS/CdO/CdTe a fost calculat randamentul cuantic, care variază de la 0,53 la 0,80, în funcție de puterea radiației, la lumină monocromatică cu λ=532 nm.

Pe baza cercetărilor efectuate asupra heterojoncțiunilor CdS/CdO/CdTe, au fost obținuți parametrii acestora, care permit construirea diagramei energetice (tabelul 3).

Tabelul 3 Parametrii componentelor heterojoncțiunii, care permit construirea diagramei benzii

Parametrii componentelor HJ	**CdS**	**CdTe**	**CdO**
Lățimea benzii interzise, Eg, eV	2,44	1,45	3,75
Afinitatea electronică, χ, eV	4.5	4.28	
Masa efectivă, m*	0.17 m_0	0.6 m_0 [	
Constanta rețelei, a, A°	4.137	6.477	
Concentrarea donorilor necompensați, N_d, cm^{-3}	$2{,}1\cdot10^{18}$		
Concentrarea acceptorilor necompensați N_a, cm^{-3}		$3.7\cdot10^{13}$	
Permitivitatea dielectrică, ε	10	9.6	
$\delta_1=E_C-E_f$, eV	0.12		
$\delta_2=E_F-E_V$, eV		0.31	
Înălțimea barierei potențiale, Δφ, eV			0.82

Pe baza datelor prezentate, a fost construită diagrama energetică (Figura 14).

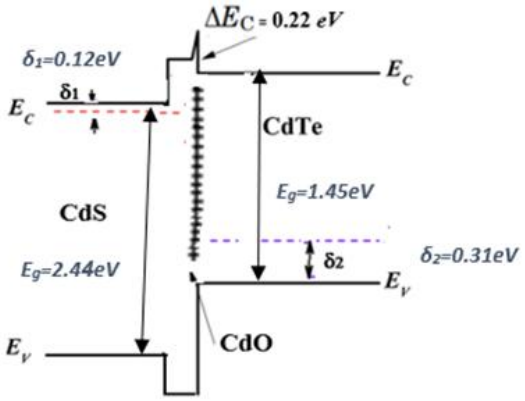


Figura 14. Diagrama energetică a heterojoncțiunei CdS/CdTe la iluminare.

Rolul nanostratului de CdO este determinat în principal de netezirea activă a suprafeței stratului de CdS, reducând astfel numărul centrelor active de recombinare a purtătorilor de sarcină la interfața CdS/CdO/CdTe.

CONCLUZII PRINCIPALE

În cadrul acestei lucrări au fost analizate proprietățile electrofizice ale straturilor subțiri de CdS, CdTe, obținute prin metoda volumului cuasi-închis, și celulelelor solare pe baza acestora cu introducerea unui strat subțire izolator *i*-CdO la interfața CdS/CdTe, obținut prin pulverizare magnetron, pentru îmbunătățirea eficienței lor. Principalele rezultate obținute în cadrul tezei de doctor:

1. Pe baza cercetărilor de difracție cu raze X, optice, morfologice și electrofizice, au fost determinate regimurile optime de obținere ale straturilor subțiri de CdS și CdTe prin metoda volumului cuasi-închis, care asigură o structură policristalină de înaltă calitate a straturilor studiate. Regimurile tehnologice optime pentru stratul de CdS: T_{surs} = 630 °C, T_{sub} = 340 °C, iar pentru CdTe, T_{surs} = 580 °C, T_{sub}= 340 °C.
2. A fost elaborată o metodă de formare a celulei solare CdS/CdTe, care constă dintr-un strat transparent conductiv pe bază de oxid de indiu-staniu (ITO), un strat de CdS cu grosimea de 200–500 nm, un strat activ de bază CdTe cu grosimea de 8–10 μm și contactul din spate pe bază de Te/Ni sau Sb_2 Te_3 /Ni.
3. A fost elaborată o metodă de obținere a unui strat dielectric de CdO prin pulverizare magnetron la curent continuu din ținta de Cd într-o atmosferă de oxigen pur. Viteza de depunere a stratului subțire de CdO este de 5 Å/s. Regimul optim de depunere a stratului subțire de CdO este $I_{descărcare}$ = 10 mA, presiunea O_2 în cameră 10^{-3} mbar, iar timpul de depunere a stratului este de 18-20 s.

4. A fost elaborat un proces tehnologic pentru obținerea pe etape, a celulelor solare cu configurație dorsală pe baza structurii sticlă/ITO/*n*-CdS/CdO/*p*-CdTe/Ni.
5. A fost dezvoltat un proces tehnologic pentru producerea pe etape a unei celule solare cu configurație spate, bazată pe structura sticlă/ITO/n-CdS/CdO/p-CdTe/Ni.
6. A fost optimizat regimurile de tratament cu clorură și tratament termic al CdTe, care permite obținerea de straturi cu structură cubică de tip zinc blendă și cu dimensiuni ale cristalitelor cu un ordin (de la câteva zeci până la câteva sute de nanometri) mai mari decât în cazul absenței acestui tratament. Drept rezultat, procesul de clorurare duce la creșterea eficienței celulelor solare.
7. Au fost investigate caracteristicile volt-amperice în întuneric și caracteristicile volt-faradice ale celulelor solare obținute. Potențialul de difuzie capacitiv este ușor mai mare decât cel determinat prin măsurători de curent, atât pentru CS CdS/CdTe, cât și pentru CdS/CdO/CdTe. S-a demonstrat că concentrația de impurități acceptoare necompensate în CdS/CdO/CdTe la o frecvență de 0.1 MHz este de $3.8 \cdot 10^{13}$ cm^{-3}, iar pentru heterojoncțiunea CdS/CdTe este de $1.1 \cdot 10^{13}$ cm^{-3}, densitatea stărilor de suprafață fiind N_{ss} = $3.5 \cdot 10^{14}$ cm^{-3} pentru HJ CdS/CdTe și N_{ss} = $9.2 \cdot 10^{13}$ cm^{-3} pentru HJ CdS/CdO/CdTe.
8. Mecanismul de transport al curentului în cazul tensiunilor directe pentru heterojoncțiunile CdS/CdTe și CdS/CdO/CdTe este determinat de generarea-recombinarea purtătorilor de sarcină în zona de sarcină volumetrică, iar în cazul tensiunilor inverse, curentul este determinat de scurgerile de suprafață.
9. Spectroscopia de admitanță relevă pentru CdS/CdTe două niveluri de defecte cu energii de ionizare de 0,20 eV și 0,43 eV, iar pentru heterostructura CdS/CdO/CdTe este prezent doar un nivel cu energia de 0,22 eV.
10. S-a stabilit că introducerea unui strat subțire de CdO între straturile de CdS și CdTe duce la creșterea parametrilor fotovoltaici (în special al curentului de scurtcircuit și a tensiunii de circuit deschis) cu 25-30% și la creșterea ieșirii cuantice externe în intervalul 0,80-0,75 în heterostructura CdS/CdO/CdTe.

RECOMANDĂRI

Având în vedere concluziile de mai sus, se pot face următoarele recomandări:

Celulele solare pe baza straturilor subțiri de CdS/CdTe sunt promițătoare pentru aplicarea pe scară largă în mediul terestru datorită rezistenței acestui compus semiconductor la degradare, eficienței ridicate în conversia fotoelectrică a energiei solare, precum și costurilor reduse de materiale și energie în producția lor industrială. Panourile solare CdS/CdTe sunt deosebit de potrivite pentru proiecte solare de mari dimensiuni, oferind o combinație convingătoare de eficiență economică, performanță bună, apropiată de cea a produselor pe bază de siliciu, și un proces de fabricație mai simplu, care asigură producția rapidă în masă.

Panourile solare CdS/CdTe sunt, de asemenea, ideale pentru a funcționa în condiții de temperaturi ridicate.

BIBLIOGRAFIE

1. JENNY, D.A., BUBE, R. H. Semiconducting Cadmium Telluride. In: *Physical Review*. 1954, nr 96(5), pp. 1190–1191. DOI:10.1103/physrev.96.1190
2. CUSANO, D.A. CdTe solar cells and photovoltaic heterojunctions in II–VI compounds. In: *Solid-State Electronics*. 1963, nr 6(3), pp. 217–232. DOI:10.1016/0038-1101(63)90078-9
3. ROMEO, A., ARTEGIANI, E. CdTe-Based Thin Film Solar Cells: Past, Present and Future. In: *Energies*. 2021, nr 14(6), pp. 1684. DOI:10.3390/en14061684
4. MOHAMED, H.A., HADIA, N.M.A. Improvement in the Efficiency of Thin Film CdS/CdTe Solar Cells Using Different TCO Materials. In: *International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials (ENEFM2013)*. 2014, pp. 107–118. DOI: 10.1007/978-3-319-05521-3_14
5. FANG, Z., WANG, X.C., WU, H.C., ZHAO, C.Z. Achievements and Challenges of CdS/CdTe Solar Cells. In: *International Journal of Photoenergy*. 2011, pp. 1–8. DOI: 10.1155/2011/297350
6. HE, S., LU, H., LI, B., ZHANG, J., ZENG, G., WU, L., … FENG, L. Study of CdTe/ZnTe composite absorbing layer deposited by pulsed laser deposition for CdS/CdTe solar cell. In: *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2017, nr 67, pp. 41–45. DOI: 10.1016/j.mssp.2017.05.009
7. *The 10 Stories That Defined Energy Storage in 2017*. Disponibil: https://www.greentechmedia.com/articles/read/first-solar-hits-record%2022.1conversion%20efficiency%20for%20CdTe%20solar%20cell
8. SZE, S. *Physics of Semiconductor Devices*. New York: JOHN WILEY & SONS, INC., 1981. 392 p. ISBN 978-0470-53794-7
9. КОСЯЧЕНКО, Л. А., САВЧУК, А.И., ГРУШКО, Е.В. Влияние толщины поглощающего слоя на эффективность солнечного элемента CdS/CdTe. In: *ФТП*. 2009, nr 43(8), pp.1060-1064.
10. БУБНОВ, Ю., ЛУРЬЕ, М., СТАРОС, Г., ФИЛАРЕТОВ, Г. *Вакуумное нанесение пленок в квазизамкнутом объеме*. Москва: Советское радио, 1975, 160 pp.
11. SONG, T., KANEVCE, A., SITES, J. R. Emitter/absorber interface of CdTe solar cells. In: *Journal of Applied Physics*. 2016, nr 119(23), pp. 233104. DOI: 10.1063/1.4953820
12. BONNET, D. THE CdTe THIN FILM SOLAR CELL - AN OVERVIEW. In: *International Journal of Solar Energy*. 1992, nr 12(1-4), pp. 1–14. DOI: 10.1080/01425919208909746
13. РЫВКИН С. М. *Фотоэлектрические явления в полупроводниках*. Москва, 1963. 494

14. BECERRIL, M., ZELAYA-ANGEL, O., VARGAS-GARCÍA, J. R., RAMÍREZ-BON, R., & GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, J. Effects of Cd vacancies on the electrical properties of polycrystalline CdTe sputtered films. In: *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2001, nr 62(6), pp. 1081–1085. DOI: 10.1016/s0022-3697(00)00284-5
15. ЛЕБЕДЕВ, А.А., СОБОЛЕВ, Н.А., ЭККЕ, В. Фотоемкость МДП структуры. In: *Физика и техника полупроводников.* 1981, nr 15(7), pp. 1438-1439.

LISTĂ LUCRĂRILOR PUBLICAȚII PE TEMA TEZEI

1. **AL-QASSEM, AMJAD**, ГАГАРА, Л., ГАШИН, П., ИНКУЛЕЦ, Й., ФЕДОРОВ, В. Фотоэлектрические параметры солнечных элементов CdS – CdTe с нанометрическим слоем CdO. In: *Integrare prin cercetare și inovare*. 2013, pp 128-129. ISBN 978-9975-71-417-4
2. **AL-QASSEM, AMJAD**, GASHIN, P., GAGARA, L., INCULETS, I., FEDOROV, V., CHETRUSH, P. Studies Of The Intermediate CdO Layer Influnce On Solar Energy Conversion In CdS/CdTe Heterojunction. In: *Abstracts book of the 7th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, MSCMP*. 2014, pp. 273.
3. **AL-QASSEM, AMJAD**, GASHIN, P., GAGARA, L., KETRUSH, P., INCULETZ, I., FIODOROV, V. Photoelectrical parametrs of nCdS-pCdTe thin- film solar cells with a CdO buffer layer. In: *Moldavian Journal of The Physical Sciences*. 2016, nr 15(1-2), pp. 54- 59
4. **AL-QASSEM AMJAD** Effect of heat treatment in presence of CdCl2 on the physical properties of pCdTe–nCdS heterojunction solar cells. In: *Studia Universitatis Moldaviae*. 2016, nr 7(97), pp. 166-169. ISSN 1857-2073, ISSN online 2345-1033
5. **AL-QASSEM, AMJAD**, FEDOROV, V., SUMAN, V., GAGARA, L., POTLOG, T. Improved photovoltaic parameters in CdTe solar cells by insertion of a i-CdO layer. In: *36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition Proceedings.* 2019, nr 1, pp. 673-677. ISBN: 978-1-7138-0353-9
6. **AL-QASSEM, AMJAD**, GAGARA, L., FEDOROV, V., POTLOG, T. Comparative Study of the p-CdS/n-CdTe Photovoltaic Devices with Depleted Intrinsic Layer. In: *4th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering Proceedings*. 2019, pp 707-711.
7. **AL-QASSEM, A.,** GAGARA, L., FEDOROV, V., LUNGU, I., POTLOG, T. The intermediate CdO layer influence on solar energy conversion in CdS/CdTe heterojunctions. In: *Integrare prin cercetare și inovare*. SNE. 2020 Chișinău. Republica Moldova 2020, pp 290-293. ISBN 978-9975-152-50-1
8. **AL-QASSEM, AMJAD**, SPALATU, N., FEDOROV, V., GAGARA, L., JOSEPSON, R., POTLOG,T. Sputtered CdO nanolayer as an interface engineering approach to CdTe solar cells. EMRS: 2022 Spring Meeting. https://www.european-mrs.com/thin-film-chalcogenide-photovoltaic-materials-emrs-2

ADNOTARE

AL QASSEM Amjad „Studiul proceselor fizice în heterostructurile fotosensibile bazate pe straturi subțiri de CdTe”. Teză pentru obținerea titlului de Doctor în Științe Fizice. Chișinău, Republica Moldova, 2025.

Structura tezei.: teza include o introducere, 5 capitole, concluzii generale și recomandări, o bibliografie cu 171 de titluri, 132 de pagini, 68 de figuri, 13 tabele și 65 de formule. Rezultatele sunt publicate în 8 publicații științifice.

Cuvinte cheie: sulfură de cadmiu CdS, telurură de cadmiu CdTe, heterojoncțiune HJ, celulă solară SC, volum cvasi-închis CSS, oxid de cadmiu CdO.

Scopul tezei: dezvoltarea tehnologiei de producție și studiul celulelor solare cu straturi subțiri bazate pe heterojoncțiunea CdS/CdTe (HJ) cu un strat dielectric CdO de grosime nanometrică. Pe baza studiilor măsurătorilor electrice și fotoelectrice, determinarea condițiilor tehnologice optime pentru producerea HJ din straturi subțiri de CdS/CdO/CdTe prin metoda CSS.

Obiectivele cercetării: studierea caracteristicilor epitaxiei prin metoda CSS a compușilor semiconductori A_2B_6 și dezvoltarea metodelor pentru optimizarea modurilor de obținere a straturilor subțiri de CdS și CdTe; dezvoltarea unei tehnologii pentru crearea unui nanostrat izolator de CdO la interfața CdS/CdTe; studierea proprietăților electrice ale HJ CdS/CdTe și CdS/CdO/CdTe utilizând o abordare cuprinzătoare care include analiza caracteristicilor C-V, I-V și spectroscopia de admitanță la diferite temperaturi și frecvențe alternative ale semnalului; studierea efectului nanostratului izolator de CdO asupra parametrilor fotoelectrici ai celulelor solare CdS/CdTe.

Noutatea și originalitatea științifică a lucrării constă în studiul sistematic al influenței stratului nanometric de CdO asupra parametrilor fotoelectrici, profilurilor de concentrație a purtătorilor de sarcină și energiei de ionizare a nivelurilor de impurități utilizând metodele C-V, I-V și spectroscopia de admitanță a HJ obținute.

Problema științifică importantă rezolvată este că, pentru prima dată, a fost efectuată o gamă largă de studii electrice ale HJ CdS/CdTe și s-a demonstrat că una dintre metodele de creștere a concentrației de goluri libere pentru ionizarea defectelor (creșterea concentrației de defecte acceptoare intrinseci ale locurilor vacante de cadmiu, V_{Cd}) este introducerea unui nanostrat izolator de CdO la interfața fotoconvertoarelor CdS/CdTe HJ. Introducerea unui nanostrat izolator de CdO, cu grosimea de 8-10 nm, prin pulverizare magnetronică între straturile frontale de CdS și CdTe absorbite crește curentul de scurtcircuit de la 15,7 mA/cm2 la 26,5 mA/cm2 și tensiunea de circuit deschis de la 0,66 V la 0,77 V, crescând eficiența de la 3,8% la 8,9%.

Semnificația teoretică a lucrării constă în stabilirea mecanismului de curgere a curentului în HJ CdS/CdTe controlat de două tipuri de niveluri de impuritate (~ 0,45 eV și ~ 0,27 eV), iar în HJ CdS/CdO/CdTe de un nivel (~ 0,25 eV).

Semnificația aplicativă a lucrării. Au fost dezvoltate condițiile optime (temperaturile substratului, de tratare termică și a evaporatorului) pentru obținerea de straturi CdS și CdTe cu compoziție stoichiometrică și o calitate ridicată a structurii policristaline, precum și un nanostrat izolator de CdO prin pulverizare magnetronică pentru obținerea de straturi subțiri SC cu caracteristici funcționale îmbunătățite.

Implementarea rezultatelor științifice. Tehnologia dezvoltată poate fi aplicată cu succes pentru a crea SC cu straturi subțiri semiconductoare fotosensibile. Astfel de SC, create pe substraturi flexibile, își pot găsi aplicații în dispozitivele electronice cu dimensiuni reduse cu alimentare autonomă (puncte de sistem automat de comunicații, sisteme de observare meteorologică, sisteme de monitorizare și control al traficului rutier, semne de navigație și semnalizare etc.).

АННОТАЦИЯ

АЛЬ КАССЕМ Амджад „Исследование физических процессов в фоточувствительных гетероструктурах на основе тонких слоев CdTe". Диссертация на соискание ученой степени Доктора Физических Наук, Кишинев, Республика Молдова, 2025 год.

Структура диссертации: диссертация включает введение, 5 глав, общие выводы и рекомендации, библиографию из 171 наименований, 132 страниц, 68 рисунков, 13 таблиц и 65 формул. Результаты опубликованы в 8 научных публикациях.

Ключевые слова: сульфид кадмия CdS, теллурид кадмия CdTe, гетеропереход ГП, солнечный элемент СЭ, квазизамкнутый объем CSS, оксид кадмия CdO.

Цель работы: разработка методики получения и исследование тонкопленочных СЭ на основе гетероперехода (ГП) CdS/CdTe с диэлектрическим слоем CdO, нанометрической толщины. На основании исследований электрических и фотоэлектрических измерений, определить оптимальные технологические условия для изготовления тонкопленочной гетероструктуры CdS/CdO/CdTe методом квазизамкнутого объёма.

Задачи исследования: изучить особенности эпитаксии методом CSS полупроводниковых соединений группы A_2B_6 и разработать способы оптимизации режимов получения тонких пленок CdS, CdTe; разработать технологию создания изолирующего нанослоя CdO на границе разделаCdS/CdTe; исследовать электрические свойства ГП CdS/CdTe и CdS/CdO/CdTe, используя комплексный подход, включающий анализ ВФХ, ВАХ и адмиттанс-спектроскопию при различных температурах и частотах переменного сигнала; изучить влиянии изолирующего нанослоя CdO на фотоэлектрические параметры СЭ CdS/CdTe.

Научная новизна и оригинальность работы состоит в систематическом исследовании влияния нанометрического слоя CdO на фотоэлектрические параметры, профили концентрации носителей заряда и энергии ионизации примесных уровней полученных гетероструктур методами ВФХ, ВАХ и адмиттансной спектроскопии.

Решенная важная научная проблема заключается в том, что впервые проведен широкий комплекс электрических исследований ГП CdS/CdTe и продемонстрировано, что одним из методов увеличения концентрации свободных дырок для ионизации дефектов (увеличения концентрации собственных акцепторных дефектов вакансии кадмия, V_{Cd}), является внедрение изолирующего нанослоя CdO на границе раздела CdS/CdTe ГП фотопреобразователей. Внедрение изолирующего нанослоя CdO, толщиной 8-10 нм, методом магнетронного распыления между фронтальным CdS и поглощаемым CdTe слоями повышает ток короткого замыкания с 15,7 мА/см^2 до 26,5 мА/см^2 и напряжение холостого хода с 0,66 В до 0,77 В, увеличивая коэффициент полезного действия с 3,8 % до 8,9 %.

Теоретическая значимость работы состоит в установлении механизма токопрохождения в ГП CdS/CdTe, контролируемого двумя типами примесных уровней (~ 0.45 эВ и ~ 0.27 эВ), а в ГП CdS/CdO/CdTe одним уровнем (~ 0.25 эВ).

Прикладная значимость работы. Разработаны оптимальные режимы (температуры подложки, термоотжига и испарителя) получения пленок CdS и CdTe стехиометрического состава с высоким качеством кристаллической структуры, и технологический режим для получения, изолирующего нанослоя CdO методом магнетронного распыления для получения тонкопленочных СЭ с улучшенными функциональными характеристиками.

Внедрение научных результатов. Разработанная технология может быть успешно применена для создания фоточувствительных полупроводниковых тонкопленочных СЭ. Такие СЭ, созданные на гибких подложках могут найти свое применение для работы небольших электронных устройств с автономным питанием (автоматические пункты системы связи, системы метеонаблюдений, системы наблюдения и контроля движения на автострадах, навигационные и сигнальные знаки и т.д.).

SUMMARY

AL QASSEM Amjad "Study of physical processes in photosensitive heterostructures based on thin CdTe layers". Thesis for the degree of Doctor of Physics Sciences. Chisinau, Republic of Moldova, 2025.

Thesis contents: the thesis includes an introduction, 5 chapters, general conclusions and recommendations, a bibliography of 171 titles, 132 pages, 68 figures, 13 tables and 65 formulas. The results are published in 8 scientific publications.

Keywords: cadmium sulfide CdS, cadmium telluride CdTe, heterojunction GP, solar cell SC, quasi-closed volume CSS, cadmium oxide CdO.

The goal of the thesis: development of the production technology and study of thin film solar cells based on the CdS/CdTe heterojunction (HJ) with a CdO dielectric layer of nanometric thickness. Based on the studies of electrical and photoelectric measurements, determine the optimal technological conditions for the production of a thin film CdS/CdO/CdTe HJ by the CSS method.

Research objectives: to study the features of epitaxy by CSS method of A_2B_6 semiconductor compounds and to develop methods for optimizing the modes of obtaining CdS and CdTe thin films; to develop a technology for creating an insulating CdO nanolayer at the CdS/CdTe interface; to study the electrical properties of CdS/CdTe and CdS/CdO/CdTe heterojunctions using a comprehensive approach that includes analysis of the C-V characteristics, I-V characteristics, and admittance spectroscopy at different temperatures and alternating signal frequencies; to study the effect of the insulating CdO nanolayer on the photoelectric parameters of CdS/CdTe solar cells.

The scientific novelty and originality of the work consists in the systematic study of the influence of the nanometric CdO layer on the photoelectric parameters, charge carrier concentration profiles and ionization energy of impurity levels using the methods of C-V, I-V and admittance spectroscopy of the obtained HJ.

The solved important scientific problem is that for the first time a wide range of electrical studies of CdS/CdTe HJ was carried out and it was demonstrated that one of the methods for increasing the concentration of free holes for ionization of defects (increasing the concentration of intrinsic acceptor defects of cadmium vacancies, V_{Cd}) is the introduction of an insulating CdO nanolayer at the interface of CdS/CdTe HJ photoconverters. The introduction of an insulating CdO nanolayer, 8-10 nm thick, by magnetron sputtering between the front CdS and absorbed CdTe layers increases the short-circuit current from 15.7 mA/cm2 to 26.5 mA/cm2 and the open-circuit voltage from 0.66 V to 0.77 V, increasing the efficiency from 3.8% to 8.9%.

The theoretical significance of the work consists in establishing the mechanism of current flow in the CdS/CdTe GP controlled by two types of impurity levels (~ 0.45 eV and ~ 0.27 eV), and in the CdS/CdO/CdTe GP by one level (~ 0.25 eV).

Applicative significance of the work. Optimal modes (temperatures of the substrate, thermal annealing and evaporator) for obtaining CdS and CdTe films of stoichiometric composition with a high quality of the crystalline structure, and an insulating CdO nanolayer by magnetron sputtering for obtaining thin film SC with improved functional characteristics have been developed.

Implementation of scientific results. The developed technology can be successfully applied to create photosensitive semiconductor thinfilm SC. Such SC, created on flexible substrates, can find their application for the operation of small electronic devices with autonomous power supply (automatic communication system points, meteorological observation systems, highway traffic monitoring and control systems, navigation and signal signs, etc.).

AL QASSEM AMJAD

STUDIUL PROCESELOR FIZICE ÎN HETEROSTRUCTURILE FOTOSENSIBILE BAZATE PE STRATURI SUBȚIRI DE CdTe

134.01 FIZICA ŞI TEHNOLOGIA MATERIALELOR

Autoreferatul

Teză de doctor în ştiinţe fizice

Aprobat pentru tipar: 19.10.2015	Format hârtie: 60×84 1/16
Hârtie offset. Tipar offset.	Tiraj: 10 exemplare
Coli de tipar: 1,7	Comanda nr. 61/25

Tipărit la tipografia Centrul Editorial-Poligrafic al USM

str. A. Mateevici 60, Chişinău, MD-2009, Moldova