

**UNIVERSITATEA DE STAT DIN MOLDOVA**

Cu titlu de manuscris

C.Z.U: 621.315.592

**CUZNEȚOVA SNEJANA**

**CERCETAREA PROCESELOR FIZICE ÎN CRISTALE ȘI  
STRATURI SUBȚIRI DE  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$   
ȘI HETEROJONȚIUNI ÎN BAZA LOR**

**134.01 – FIZICA ȘI TEHNOLOGIA MATERIALELOR**

Autoreferatul  
tezei de doctor în științe fizice

**CHIȘINĂU 2015**

Teza a fost elaborată în LCȘ “Fizica semiconductorului”, la catedra “Fizica Aplicată și Informatica” a Universității de Stat din Moldova

### Conducător științific:

**Gașin Petru**, doctor habilitat în științe fiz.-mat., profesor universitar, Laureat al Premiului de Stat al Republicii Moldova, USM

### Referenți oficiali:

**Gheorghita Eugen**, doctor habilitat în științe fiz.-mat., profesor universitar, Șeful catedrei “Fizica teoretică și experimentală”, UST

**Iovu Mihai**, doctor habilitat în științe fiz.-mat., conferențiar cercetător, Șef de laborator, IFA AȘM

### Componența consiliului științific specializat:

**Simașchevici Alexei**, președinte, doctor habilitat în științe fiz.-mat., profesor universitar, academician, IFA AȘM

**Șerban Dormidont**, secretar științific, doctor habilitat în științe fiz.-mat., profesor universitar, IFA AȘM

**Nedeoglo Dumitru**, doctor habilitat în științe fiz.-mat., profesor universitar, șeful catedrei „Fizica Aplicată și Informatica”, USM

**Rusu Emil**, doctor habilitat în științe tehn., conferențiar universitar, IEN “D. Ghițu” AȘM

**Cliucanov Alexandr**, doctor habilitat în științe fiz.-mat., profesor universitar, USM

**Dorogan Valerian**, doctor habilitat în științe fiz.-mat., profesor universitar, Șef de laborator, UTM

Susținerea va avea loc la **06. 05. 2015** la ora **15<sup>00</sup>** în ședința Consiliului științific specializat D30.134.01-03 din cadrul Universitatea de Stat din Moldova, adresa str. A. Mateevici 60, MD-2009, or. Chișinău, Republica Moldova

Teza de doctor și autoreferatul pot fi consultate la biblioteca Universității de Stat din Moldova și la pagina web a CNAA ([www.cnaa.md](http://www.cnaa.md)).

Autoreferatul a fost expedit la 31.03.2015.

Secretar științific al Consiliului științific specializat  
D30.134.01-03,

doctor habilitat în științe fiz.-mat.,

profesor universitar, IFA AȘM

 **Șerban D.**

Conducător științific,

doctor habilitat în științe fiz.-mat., profesor universitar,  **Gașin P.**

USM

Autor

 **Cuznețova S.**

© Cuznețova Snejana, 2015

## REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

### Actualitatea temei

Una din problemele actuale a societății este ecologia și poluarea mediului înconjurător. Luînd în considerație folosirea intensă și, prin urmare, o epuizare foarte rapidă a resurselor naturale, surse tradiționale de energie, în ultimul timp o atenție deosebită se acordă transformării energiei solare în cea electrică.

Soluționarea acestei probleme presupune folosirea convertoarelor de energie pe bază de celule solare din siliciu și din compușii grupelor  $A^3B^5$  [1]. Deasemenea, o perspectivă deosebită pentru această menire au compușii semiconductori  $A^2B^6$ . Calculele teoretice și cercetările experimentale demonstrează, că din compușii  $A^2B^6$  telurura de cadmiu constituie un material ideal, care, avînd lărgimea benzii interzise de 1,5 eV, poate furniza o eficiență de 27,5 % [2]. O elaborare a celulelor solare ce au la bază materiale semiconductoare  $A^2B^6$  cu perspectivă sunt heterojoncțiunile. Semiconductorul cu o bandă interzisă largă are funcția de “fereastră” și protejează regiunea fotoactivă a celulei solare de la influența stărilor de suprafață.

Condițiile necesare le îndeplinesc compușii tripli MnTe-CdTe. Acest tip de aliaj formează o serie de soluții solide de tipul  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  ( $0 < x < 1$ ) structura zincblende, care face parte din clasa de materiale “semiconductori semimagnetici” sau “semiconductori diluați”.

Prezența ionilor de Mn în rețeaua cristalină de CdTe conduce la apariția noilor proprietăți electrice, fotoelectrice, optice și magnetice. La formarea acestor soluții solide se păstrează forma cubică a rețelei cristaline a telururii de cadmiu, însă constanta rețelei cristaline se modifică, micșorîndu-se de la 6,48 Å pentru CdTe pînă la 6,40 Å pentru  $Cd_{0,5}Mn_{0,5}Te$  [3].

Acest compus este comod prin faptul că permite în mod corespunzător să se varieze cu lărgimea benzii interzise [4], totodată atomii de Mn deobicei sunt localizați în nodurile rețelei cristaline, evitînd regiunea din intenoduri [5] și formează o soluție “ideală” de semiconductori, fapt ce a condiționat utilizarea  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  pentru formarea structurilor de barier în structurile bidimensionale de semiconductor [6]. Mult mai detaliat acest material a fost folosit în calitate de obiect de cercetare cu proprietăți magnetice puternic foarte accentuate datorită posibilității unice de a obține în acest sistem a probelor cu concentrații a purtătorilor de sarcină mobilă și a atomilor magnetici din rețea ușor ajustabili [4,5].

Lărgimea benzii interzise a acestor compuși se mărește lent de la 1,5 eV pentru CdTe ( $x=0$ ) pînă la 2,25 eV pentru  $Cd_{0,5}Mn_{0,5}Te$ . Constanta rețelei cristaline și coeficientul de dilatare termică a semiconductorului sunt parametrii de bază care permit determinarea perspectivității utilizării tehnice a materialului. În conformitate cu roentgenogramele compușilor a unei serii de soluții solide de  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  constanta rețelei cubice se micșorează odată cu mărirea

concentrației a Mn se micșorează cu aproximativ 8%, clasificând aceste materiale în grupa semiconductorilor cu o întrebuințare largă pentru obținerea structurilor multistrat și a suprarețelor.

În ultimul deceniu cercetările telururii de cadmiu și magneziu au căpătat un interes deosebit în legătură cu încercările de a realiza dispozitive pentru “spintronică” [7]. Posibilitățile susnumite, pe care potențial le deține acest material, face de a avea o mare perspectivă de utilizare pentru aceste întrebuințări.

### **Scopul și obiectivele lucrării**

Scopul tezei constă în studiul complex a proprietăților electrice, optice și de luminescență a cristalelor și straturilor subțiri de  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ , determinarea structurii de benzi, a parametrilor electrice și fotoelectrice în dependența de compoziție și tipul impurităților introduse, determinarea mecanismelor de transport al curentului și a efectului fotovoltaic în heterojoncțiunile nCdS-p $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ .

Pentru atingerea scopului general au fost puse următoarele obiective:

- Cercetarea proprietăților electrice, optice și de fotoluminescență a cristalelor  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $0 < x \leq 0,5$ ) în intervalul de temperaturi 78 K – 400 K.
- Cercetarea proprietăților mecanice și magnetice a cristalelor  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ .
- Cercetarea influenței tratării termice în vapori de Cd, Te și dopării cu cupru asupra proprietăților electrice și de luminescență a cristalelor  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ .
- De elaborat tehnologia de obținere a straturilor subțiri de  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  și de cercetat proprietățile optoelectronice.
- De obținut heterojoncțiunile nCdS-p $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  și nCdTe-p $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  și de cercetat proprietățile lor electrice și fotoelectrice.

### **Noutatea științifică a rezultatelor obținute:**

• Din analiza spectrelor de reflexie a cristalelor  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $x=0,01 \div 0,5$ ), în intervalul de energii 6,2 ÷ 1,0 eV la 78 K și 293 K sunt determinate intervalele energetice dintre extremitățile benzilor de valență și conducție în punctele  $\Gamma$ , L și X în funcție de compoziție.

• Din analiza funcțiilor optice  $\epsilon_1(\hbar\omega)$  și  $\epsilon_2(\hbar\omega)$  s-a determinat energia despicerii spin-orbitală a benzii de valență în p. G -  $\Delta_G=0,92$  eV și p. X -  $\Delta_X=0,32$  eV.

• Pentru cristalele de  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ , dopate cu Cu, energia de activare este 0,35 eV pentru compoziția cu  $x=0,5$  și 0,18 eV - cu  $x=0,13$ , iar mecanismul de împrăștiere este împrăștierea pe

oscilațiile termice ale rețelei cristaline. Atomii de Cu ocupă locurile vacante de Cd, rezultând o micșorare a concentrației defectelor intrinseci și mărirea fotosensibilității materialului.

- Pentru prima dată a fost studiată microduritatea cristalelor  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $x=0,13$ ,  $x=0,5$ ). S-a constatat că prin mărirea concentrației de mangan microduritatea se mărește.

- Pentru prima dată a fost confecționată HJ cu straturi subțiri  $n\text{CdS-pCd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ , folosind metoda volumului cvasi-închis, depunând consecutiv straturi de CdS și  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  pe substraturi de sticlă, acoperite cu un strat conductor și transparent de  $\text{SnO}_2$ .

- Pe baza unui studiu complex al proprietăților electrice și fotoelectrice s-au determinat regularitățile de bază ale mecanismelor de transport al curentului în HJ  $n\text{CdS-pCd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  și  $n\text{CdTe-pCd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ .

- Tensiunea de circuit deschis ( $U_{cd}$ ), curentul de scurtcircuit ( $I_{sc}$ ) și distribuția spectrală a fotosensibilității se determină prin generarea perechilor electron-gol în materialele componente. La temperatura 300 K și puterea luminii de  $100 \text{ mW/cm}^2$   $U_{cd}=0,79-0,83 \text{ V}$ ,  $I_{sc}=24,5-26,6 \text{ mA/cm}^2$ .

### **Rezultatele științifice principale înaintate spre susținere.**

1. Mărirea concentrației de Mn conduce la micșorarea liniară a despicării spin-orbitală  $\Delta_0$  a benzii de valență în punctul  $\Gamma$  de la 1,06 eV ( $x=0$ ) până la 0,42 eV ( $x=0,5$ ) la temperatura 293 K, iar despicarea  $\Delta_1$  în punctul L se micșorează de la 0,6 eV ( $x=0$ ) până la 0,42 eV ( $x=0,13$ ) și cu mărirea concentrației de Mn rămâne constantă.
2. Scăderea temperaturii de la 293 K până la 78 K duce la schimbarea poziției maximelelor de energie a benzilor de valență  $E_0$ ,  $E_1$  și  $E_0+\Delta_0$ ,  $E_1+\Delta_1$  spre energii mai mari, cu coeficientul termic egal cu  $\sim 3 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ .
3. Tratarea termică în topitură de Cd la temperaturi de  $600^\circ\text{C}$  și  $650^\circ\text{C}$  conduce la schimbarea tipului de conductivitate din p- în n- și apariția a două nivele cu energia de activare de  $\sim 0,15 \text{ eV}$  legate cu existența unui complex, constând din atomi din grupa I în subrețeaua de cadmiu ( $\text{Cu}_{\text{Cd}}$ ,  $\text{Ag}_{\text{Cd}}$ ) și repartizarea alături a atomilor de Mn, și  $\sim 0,37 \text{ eV}$  determinat de vacanțele de cadmiu în  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ .
4. Mărirea concentrației de Mn în soluțiile solide de  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  mărește microduritatea, care crește de la 190 MPa pentru CdTe la 730 MPa pentru  $\text{Cd}_{0,5}\text{Mn}_{0,5}\text{Te}$  cu un efort pe indenter de  $\sim 0,1 \text{ N}$ .
5. Mecanismul de transportarea curentului în HJ  $n\text{CdS-pCd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  se determină prin procesul de recombinare la polarizare directă și de generare la polarizare inversă procesului

prin nivelul impurităților cu o energie de activare  $\Delta E=0,63$  eV, determinat de vacanțele de Cd în complex cu atomii impuritari (centre de tipul A).

### **Semnificarea teoretică și valoarea aplicativă a lucrării constă în următoarele:**

- Rezultatele cercetărilor efectuate dau posibilitatea de a lămuri specificul proprietăților fotoelectrice a semiconductorului  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  și a structurilor de diferite tipuri în baza lor și legătura cu câmpurile magnetice exterioare.

- A fost determinat că tratarea termică a cristalelor  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  în atmosfera de cadmiu permite schimbarea tipului de conductivitate, iar doparea cu Cu mărește fotosensibilitatea probelor.

- Proprietățile magnetice ale cristalelor  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  depind de concentrația manganului: pentru concentrații mici  $x \leq 0,3$  ele manifestă proprietăți de spin-sticlă, iar pentru  $x=0,5$  – antiferomagnetice.

- Este elaborată tehnologia fabricării celulelor solare bazată pe HJ cu straturi subțiri CdS- $Cd_{1-x}Mn_xTe$ , care sunt sensibile în regiunea de lungimi de undă 0,52-0,86  $\mu m$  și randamentul cuantic de 0,55-0,6, sensibilitatea după curent de 1,2 mA/mW și după tensiune - 3,2 V/mW, la iluminare de 100 mW/cm<sup>2</sup> și temperatura 300 K eficiența de conversie a energiei luminoase în energie electrică este de 11,2-11,49 %.

### **Aprobarea rezultatelor științifice.**

Rezultatele principale din teza au fost prezentate și discutate la conferințe: A VI-lea Colocviu Național de Fizica și Tehnologia Materialelor Cristaline și Amorfe, Iași, România, 2000; 1<sup>st</sup> International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, MSCMP, Chisinau, Moldova, 2001; Colocviului Internațional de Fizică «Evrika!», Ediția a IX-a, Chișinău, Moldova, 2002; 2<sup>th</sup> National Conference of the Rom. Phys. Soc. Tîrgu-Mureș, România, 2002; Conferința corpului didactico-științific, Chișinău, Moldova, 2003; Conferința Științifică Internațională dedicată jubileului de 60 ani ai USM, Chișinău, Moldova, 2006; 5<sup>th</sup> International Conference on “Microelectronics and Computer Science”, ICMCS, Chișinău, Moldova, 2007; Conferința fizicienilor din Moldova, CFM-2007, Chisinau, Moldova, 2007; 4<sup>th</sup> International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, MSCMP, Chisinau, Moldova, 2008; Conferința Științifică cu Participare Internațională consacrată aniversării a 65-a a USM, Chișinău, Moldova, 2011; The Xth International Conference, OPROTEH-2013, Bacău, România, 2013; Conferința științifică “Integrare prin cercetare și

inovare”, Chişinău, Moldova, 2013; The 9<sup>th</sup> International Conference on Industrial Power Engineering, Bacău, România, 2014.

### **Publicații.**

Rezultatele principale sunt sistematizate în 20 lucrări științifice.

### **Structura tezei**

Teza este scrisă în limba rusă și constă din introducere, patru capitole, concluzii generale, și o lista bibliografică. Teza conține 140 pagini, 81 figuri, 14 tabele, 28 de formule și 88 referiri la publicațiile citate, inclusiv lucrări în care au fost publicate rezultatele acestei teze.

**Cuvinte cheie:** structura de benzi, antiferomagnetic, impuritate, conductivitate, luminiscentă, straturi subțiri, heterojuncțiuni, sensibilitate spectrală.

## CUPRINSUL LUCRĂRII

**În introducere** este argumentată actualitatea temei de cercetare, sunt formulate scopurile și obiectivele lucrării, noutatea științifică, importanța practică și tezele științifice de bază care urmează a fi susținute. Este descrisă succint structura tezei de doctor.

**În primul capitol** al tezei se prezintă rezultatele din literatura de specialitate despre compușii semiconductori de  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ , deasemenea și straturi subțiri, heterojoncțiuni pe baza lor.

În primul paragraf se descrie proprietățile fizico-chimice de bază a compușilor  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  (structura cristalină, lărgimea benzii interzise, tranzițiile optice) și este demonstrată dependența lărgimii benzii interzise de componența compusului și temperatură [3].

În paragrafele doi și trei se demonstrează că, folosirea cristalelor de  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  este limitată de prezența unei concentrații înalte a defectelor punctiforme proprii și a impurităților necontrolabile, distribuției neuniforme a substanțelor dizolvate, prezența activării fazei secundare, tensiunilor mecanice ș. a. S-a demonstrat, că prelucrarea termică a cristalelor în vapori ce conțin elementele componente micșorează numărul defectelor și în rezultat stabilizează proprietățile electrofizice. Sunt analizate proprietățile magnetice a cristalelor cercetate. Se atrage atenție la faptul că cristalele de  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  aparțin categoriei semiconductoarelor semimagnetice (SSM) și proprietățile lor magnetice depind de conținutul cantitativ al componentei magnetice (Mn) și temperatură [8].

În paragraful patru sunt prezentate rezultatele cercetării proprietăților optice și fotoelectrice a cristalelor de  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ . Se evidențiază prezența liniei excitonice în spectrele de reflexie și fotoconductibilității măsurate la temperaturi de 77 K și 4,2 K, poziția căreia depinde de cantitatea de mangan și temperatură [9]. În spectrele de luminescență se observă prezența mai multor benzi [10].

În paragraful cinci este inclusă o prezentare generală a cercetării straturilor subțiri de  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  și se demonstrează dependența structurii și proprietăților acestora de temperatura suportului și temperatura tratării termice. Tot aici sunt prezentate rezultatele cercetării heterojoncțiunilor și se demonstrează legătura parametrilor heterojoncțiunilor obținute de concentrația Mn în componența materialului sursă.

Din analiza rezultatelor publicate în literatura de specialitate s-au formulat scopurile și obiectivele prezentei teze și s-au stabilit metodele prin intermediul cărora acestea pot fi atinse.

**În capitolul doi** sunt prezentate rezultatele cercetărilor proprietăților electrice, optice, luminescente și magnetice a cristalelor  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ .



În primul paragraf sunt prezentate difractogramele soluțiilor solide  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  ( $0 \leq x \leq 0,5$ ) și s-a concluzionat despre continuitatea acestor soluții. Au fost studiate proprietățile mecanice a cristalelor  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ , ce a demonstrat că odată cu creșterea concentrației de Mn (de la  $x=0,13$  la  $x=0,5$ ) microdurețea crește, iar cu creșterea sarcinei aplicate microdurețea ambelor cristale scade. Sunt prezentate fotografiile formelor urmelor și a reliefului în jurul acestora pentru diferit modul al sarcinei aplicate, asupra indectorului.

În paragraful doi este descrisă metodică cercetării proprietăților optice, electrice, galvanomagnetice și luminescente a cristalelor analizate.

Paragraful trei conține rezultatele cercetării dependenței de temperatură a electroconductibilității și fotoconductibilității. S-a demonstrat că odată cu mărirea temperaturii de la 78 K la 350 K are loc creștere conductibilității cu mai mult de 2 ordine. Tot aici sunt prezentate tabelar valorile numerice a energiei de activare a impurităților, care au fost calculate din dependența  $\ln \sigma (10^3/T)$  de unde se concludă că în banda interzisă sunt prezente două nivele de recombinare, cu energiile 0,36 eV și 0,2 eV.

În paragraful patru sunt descrise proprietățile magnetice a cristalelor  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  cu  $x = 0,13$ ; 0,3; 0,5. În Figura 1 este prezentată dependența de temperatură a susceptibilității magnetice a cristalelor cercetate, de unde se vede, că pentru toate probele la încălzirea acestora de la 1,79 K până la 400 K are loc micșorarea susceptibilității magnetice conform legii Curie-Weiss. Pentru proba cu  $x=0,5$  dependența  $\chi(T)$  fiind o excepție. Pentru această probă, la

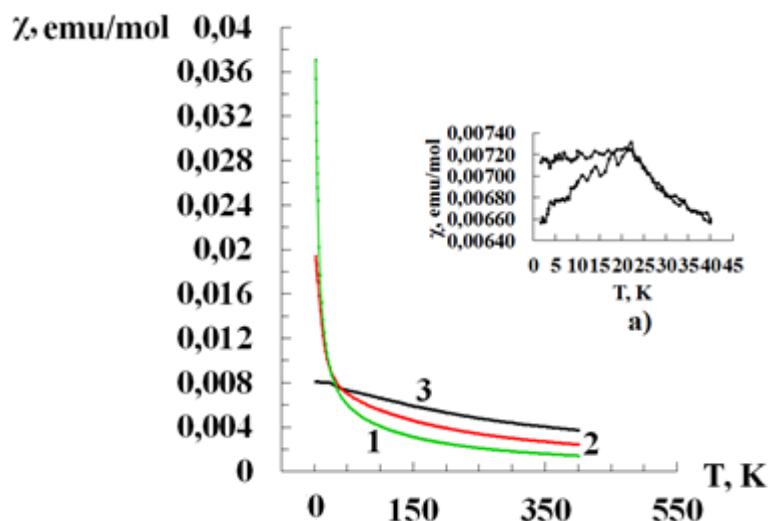


Fig. 1. Dependența de temperatură a susceptibilității magnetice a cristalelor  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  la intensitatea câmpului magnetic  $H = 10\ 000$  Oe (1-  $x=0,13$ ; 2- $x=0,3$ ; 3-  $x=0,5$ ); a - dependența de temperatură a susceptibilității magnetice a cristalelor  $Cd_{0,5}Mn_{0,5}Te$  la temperaturi joase (intensitatea câmpului magnetic  $H = 20$  Oe).

temperaturi joase ( $1,79 \text{ K} < T \leq 45 \text{ K}$ ) se observă un cot caracteristic antiferomagneticilor [11], în timp ce pentru probele cu  $x=0,13$  și  $0,3$  la aceste temperaturi se observă trecerea la starea de spin sticlă. Deosebire se observă și în dependența magnetizării compușilor cercetați de intensitatea câmpului magnetic, determinată la temperatura de  $2 \text{ K}$ .

În paragraful cinci sunt prezentate dependențele spectrale a fotoconductibilității pentru compușii  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$   $x=0; 0,3; 0,45; 0,5$ , obținute la temperatura de  $293 \text{ K}$ . În aceste dependențe se observă maximuri bine pronunțate, poziționarea cărora a permis calculul localizării nivelului impuritar. A fost analizată dependența timpului de viață a purtătorilor de sarcină de compoziție și temperatură. Din înclinarea dependenței  $\tau_1(10^3/T)$  pentru temperatura  $T > 200 \text{ K}$  a fost posibilă determinarea unui nivel de recombinare cu energia: pentru  $x=0,05 - 0,36 \text{ eV}$ ;  $x=0,3 - 0,24 \text{ eV}$ ;  $x=0,5 - 0,2 \text{ eV}$ .

În paragraful șase sunt prezentate cercetările proprietăților optice a cristalelor  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ . În urma analizei dependenței spectrale a coeficientului de absorbție, obținută la temperaturile de  $78 \text{ K}$  și  $293 \text{ K}$ , s-a determinat că la temperatura de  $78 \text{ K}$  are loc interacțiunea exciton-fononică, care demonstrează prezența unei benzi înguste localizate la marginea absorbției fundamentale. Odată cu creșterea concentrației de mangan în compus are loc deplasarea maximului liniei excitonice  $n=1$  în regiunea lungimilor de undă scurte, iar cu creșterea temperaturii marginea de absorbție fundamentală se deplasează în direcția energiilor mai mici. În baza spectrelor de absorbție și de reflexie a fost calculată detaliat structura de benzi a unui șir de soluții solide  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $0 \leq x \leq 0,5$ ) și dependența acesteia de compoziție și temperatură. În Figurile 2 și 3 sunt prezentate spectrele de reflexie a cristalurilor cercetate la temperaturile  $293 \text{ K}$  și  $78 \text{ K}$  respectiv. În figuri se vede, odată cu creșterea concentrație de Mn are loc deplasarea maximului de absorbție fundamentală în regiunea energiilor mari.

Din spectrele de reflexie au fost calculate dispiciările spin-orbitale a benzii de valență în punctele  $\Gamma - \Delta_0$  și  $L - \Delta_1$  și dinamica schimbării intervalului energetic dintre marginile benzii de valență și benzii de conducție în punctele  $\Gamma$ ,  $L$  și  $X$  în dependență de compus. În Figurile 4 și 5 sunt prezentate aceste dependențe. Cum se vede din Figura 4, creșterea conținutului de Mn în soluția solidă  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  pînă la  $x=0,5$  duce la micșorarea liniară a parametrului  $\Delta_0$  de la valoarea de  $1,06 \text{ eV}$  pentru  $\text{CdTe}$  pînă la  $0,42 \text{ eV}$  pentru  $\text{Cd}_{0,5}\text{Mn}_{0,5}\text{Te}$ , iar parametrul  $\Delta_1$  se micșorează de la  $0,6 \text{ eV}$  pentru  $\text{CdTe}$  pînă la  $0,42 \text{ eV}$  pentru  $\text{Cd}_{0,87}\text{Mn}_{0,13}\text{Te}$  și cu creșterea a conținutului de Mn acesta rămîne constant –  $0,42 \text{ eV}$ . Din analiza spectrelor de reflexie au fost analizate dependența de temperatura a parametrilor  $\Delta_0$  și  $\Delta_1$ . Pentru micșorarea influenței fonului, spectrul de reflexie a fost obținut în regim de modulare după lungimile de undă.

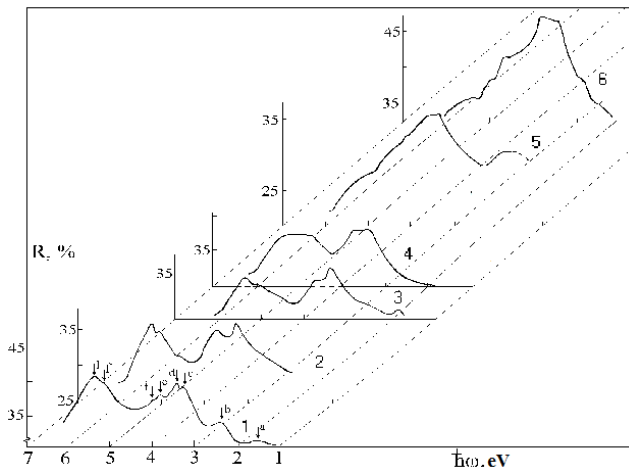


Fig. 2. Spectrele de reflexie a cristalelor  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  ( $0 \leq x \leq 0,5$ ) la  $T = 293$  K: 1 –  $x = 0$ ; 2 –  $x = 0,05$ ; 3 –  $x = 0,13$ ; 4 –  $x = 0,3$ ; 5 –  $x = 0,4$ ; 6 –  $x = 0,5$ .

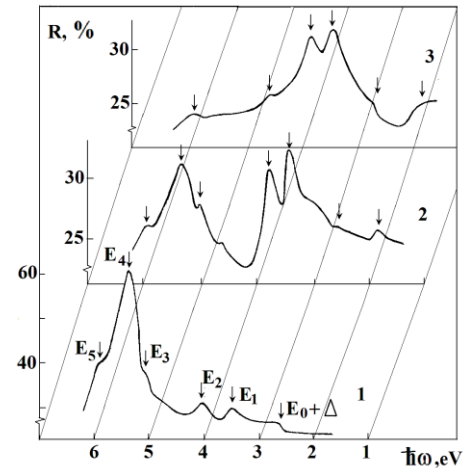


Fig. 3. Spectrele de reflexie a cristalelor  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  la  $T = 78$  K: 1 –  $x = 0,01$ ; 2 –  $x = 0,13$ ; 3 –  $x = 0,5$ .

După poziția minimurilor absolute a dependențelor  $dR/d\lambda = f(\hbar\omega)$  au fost determinate energiile tranzițiilor independente de forma liniilor pentru diferite tipuri de puncte Van Hove. Comparînd spectrele de reflexie cu dependențele  $dR/d\lambda = f(\hbar\omega)$  a fost posibilă observarea unor nivele noi. Natura acestor niveluri a fost determinată din analiza dependențelor spectrale a funcțiilor optice  $\varepsilon_1(\hbar\omega)$ ,  $\varepsilon_2(\hbar\omega)$  și funcției de pierderi  $I_m\varepsilon_1^{-1}$ .

În paragraful șapte sunt prezentate spectrele de luminescență a cristalelor  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  măsurate la temperatura de 78 K. Caracteristic pentru toate spectrele este prezența unei benzi relativ înguste în regiunea marginii de absorbție fundamentală. În urma comparării energiei maximurilor, ce corespund acestor benzi înguste cu energia excitonilor liberi, determinată din spectrul de absorbție și reflexie s-a observat o coincidență cu precizia de  $5 \div 7$  meV. Un factor major, ce influențează asupra formei benzii excitonice, poate fi interacțiunea excitonilor cu centrele impuritate, concentrația cărora crește odată cu creșterea conținutului de Mn în soluția solidă. În regiunea lungimilor de undă mari se observă o bandă largă slab conturată, care este asociat prezenței impurităților proprii în cristal.

În paragraful opt au fost analizate influența tratării termice asupra proprietăților optice și galvanomagnetice a cristalelor  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  ( $x = 0,13$  și  $x = 0,5$ ). Tratarea termică a avut loc în topitura de Cd și în atmosferă de Te, și deasemenea probele au fost dopate cu Cu. Este descrisă metoda de tratare și de dopare. S-a arătat, că tratarea termică în topitură de Cd schimbă tipul conductibilității și mărește conductibilitatea probelor obținute de aproximativ  $10^4$  ori. Schimbarea tipului conductibilității se datorează faptului că tratarea termică face ca atomii de Cd

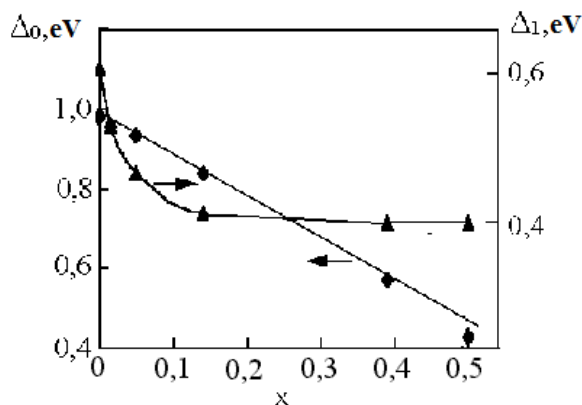


Fig. 4. Dependenta a dispicării spin-orbitale a benzii de valență în punctul  $\Gamma$  ( $\Delta_0$ ) și  $L(\Delta_1)$  în funcție de compoziție  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $0 \leq x \leq 0,5$ ).

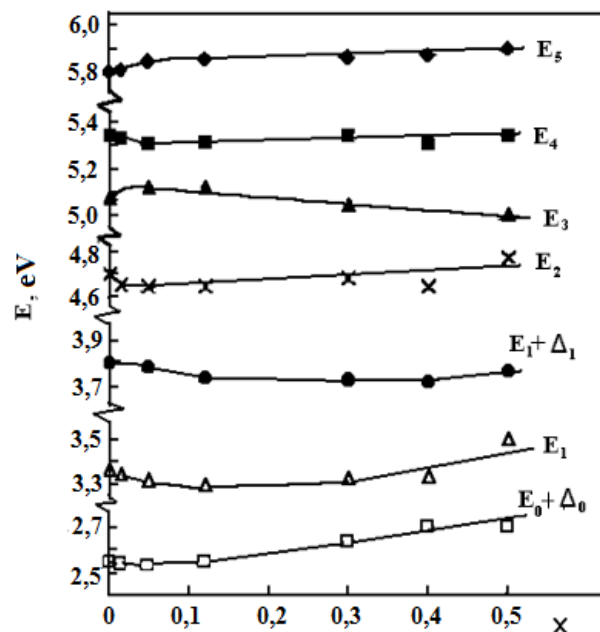


Fig. 5. Dependenta intervalului energetic dintre marginile benzii de valență și benzii de conducție în punctele  $\Gamma$  ( $E_0 + \Delta_0$ ),  $L$  ( $E_1$  și  $E_1 + \Delta_1$ ,  $E_2$ ) și  $X$  ( $E_3$ ,  $E_4$ ,  $E_5$ ).

să difundeze, ocupînd locurile vacante ale metalului. S-a demonstrat dependența parametrilor și de temperatura de tratare termică: odată cu creșterea temperaturii de la 600°C la 650 °C are loc micșorarea energiei de activare a impurităților donoare de la 0,39 eV la 0,15 eV, datorită creșterii temperaturii tratării are loc difuzia unei cantități mai mari de atomi de Cd în cristalul  $\text{Cd}_{0,5}\text{Mn}_{0,5}\text{Te}$ . Tratarea în vapori de Te duce la mărirea conductibilității cristalelor de aproximativ  $10^3$  ori. Creșterea temperaturii tratării duce la creșterea concentrației golurilor cu aproape trei ordine de mărime, dar forma dependenței concentrației golurilor de temperatură pentru toate probele este aceeași. Energia de activare a acceptorilor este 0,18 eV în raport cu energia maximă a benzii de valență, datorită existenței unui complex, constând din atomi din grupa I în subrețeaua de cadmiu ( $\text{Cu}_{\text{Cd}}$ ,  $\text{Ag}_{\text{Cd}}$ ) și repartizarea alături a atomilor de Mn [12]. Doparea cristalelor  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $x = 0,13$  și  $x = 0,5$ ) cu cupru a condus la o creștere a conductivității electrice a probelor cu 2 ordine de mărime. Concentrația golurilor a scăzut, ca urmare a ocupării de către atomii de cupru a vacanțelor de cadmiu, astfel micșorînd numărul de defecte proprii ale cristalului. Energia de activare a impurităților este de 0,34 eV (pentru  $x=0,5$ ) și 0,18 eV (pentru  $x=0,13$ ). Un rezultat semnificativ al dopării cu cupru constituie mărirea fotosensibilității probelor. Au fost analizate dependențele spectrale a fotoluminescenței a cristalelor  $\text{Cd}_{0,87}\text{Mn}_{0,13}\text{Te}$  și  $\text{Cd}_{0,5}\text{Mn}_{0,5}\text{Te}$  dopate cu cupru. În proba  $\text{Cd}_{0,87}\text{Mn}_{0,13}\text{Te}$  pînă la dopare s-au observat două

maximuri: la 1,625 eV și 1,775 eV. Primul maxim este determinat de tranzițiile intrazonale în ionii de  $Mn^{2+}$  și reprezintă o suprapunere de două regiuni B ( $\hbar\omega=1,62$  eV) și  $B^*$  ( $\hbar\omega=1,65$  eV). Energia de excitare a centrelor  $Mn^{2+}$  în cristalele date este  $\sim 1,62$  eV și nu depinde de prezența în cristal a impurităților necontrolate de Cu. Iar regiunea  $B^*$  corespunde nivelului impuritar, care se află la  $\sim 0,14$  eV mai sus de marginea benzii de valență și datorită existenței unui complex, constând din atomi de grupa I în subrețeaua de cadmiu ( $Cu_{Cd}$ ,  $Ag_{Cd}$ ) și repartizarea alături a atomilor de Mn. După dopare primul maxim practic nu-și schimbă poziția, însă devine mai mare după valoare absolută. Al doilea maximum, care corespunde benzii excitonice, se micșorează în valoare absolută, aceasta poate fi explicat prin faptul că după dopare proba conține mai multe defecte și apar niveluri care micșorează timpul de viață a excitonilor. În afară de aceasta, acest maxim este deplasat spre energii mai mari. Energia maximurilor este de 1,62 eV și 1,82 eV. E de menționat, că probele se tratau la temperaturi de 700°C, prin urmare a avut loc sublimarea materialului de pe suprafața cristalului. Luând în considerație că presiunea de vapori de cadmiu în raport cu alte componente a  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  are o valoare mai mare, atunci este firesc să presupunem că în acest caz s-a sublimat anume cadmiul. Acest fapt este confirmat pe deoparte de creșterea intensității primului maxim, pe de altă parte, neschimbării poziției acestuia.

În probele  $Cd_{0,5}Mn_{0,5}Te$  pînă la tratarea termică s-au observat două maximuri, poziționate la  $\sim 1,97$  eV și  $\sim 2,165$  eV. Se poate presupune, că primul maxim, deasemenea corespunde unui complex, este datorat, ca și în cazul  $Cd_{0,87}Mn_{0,13}Te$ , vacanțelor de cadmiu ( $E_g(x=0,5)=2,32$  eV), și tranzițiilor intracentrice în ionii de  $Mn^{2+}$ . Prin urmare, în raport cu marginea benzii de valență, energia nivelului impuritar constituie 0,35 eV, ceea ce corespunde datelor, obținute din cercetările galvanomagnetice, iar al doilea maximum este condiționat de excitoni. Doparea cu cupru la temperatura de 600°C nu a condus în cazul primului eșantion cu  $x=0,13$  la sublimarea de pe suprafață a materialului. Însă, deși intensitatea acestui maxim practic nu s-a schimbat, se observă o deplasare a acestuia în regiunea energiilor mai înalte. Pe de altă parte, acest vîrf este constituit din două componente. Una din acestea (pentru energii mai mici) se referă la vacanțe de cadmiu, cealaltă poate fi legată de substituția cu atomi de cupru a vacanței de cadmiu.

Rezultatele obținute în capitolul doi sunt publicate în lucrările [13 - 21, 25, 28, 29, 31, 32].

**Capitolul trei** este dedicat metodei de obținere, cercetarea structurii și proprietățile optice ale straturilor subțiri de  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ .

În primul paragraf sunt descrise metodele de obținere a straturilor de  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ : metoda volumului cuasiînchis și „metoda scoicii”. Sunt prezentate spectrele de transmisie a straturilor

obținute prin metoda scoicii. Deasemenea sunt prezentate imaginile suprafeței straturilor, obținute pentru diferite temperaturi a suportului și evaporatorului.

În paragraful doi sunt prezentate spectrele de absorbție a straturilor de  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ , crescute prin metoda volumului cuasiînchis pe suport de sticlă la temperatura suportului  $610^\circ\text{C}$  și  $660^\circ\text{C}$ . S-a observat, că la temperaturile suportului  $610^\circ\text{C}$ - $630^\circ\text{C}$  au fost obținute straturi ce corespundeau după compoziție cu  $\text{CdTe}$ . Pentru temperatura suportului de  $660^\circ\text{C}$ , se obțin straturi din soluții solide  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  cu  $x=0,012$ . Studiul spectrelor de fotoluminescență a straturilor de  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  a arătat prezența benzilor largi, ce corespund luminescenței pe impurități. Din dependența spectrală a fotoconductibilității, la temperatura  $293\text{ K}$ , se observă o deplasare a maximumului odată cu creșterea temperaturii suportului de la  $1,39\text{ eV}$  la  $T_{\text{sup}}=630^\circ\text{C}$  până la  $1,44\text{ eV}$  la  $T_{\text{sup}}=660^\circ\text{C}$ .

Rezultatele din capitolul trei sunt publicate în lucrările [21, 23, 24, 26, 27].

**În capitolul patru** sunt prezentate rezultatele cercetării heterojuncțiunilor  $\text{nCdTe-pCd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  și  $\text{CdS-pCd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ .

În primul paragraf sunt descrise metodele de obținere a heterojuncțiunilor: metoda volumului cuasiînchis și metoda evaporării discrete.

În al doilea paragraf sunt cercetate proprietățile electrice a heterojuncțiunilor  $\text{nCdTe-pCd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  și  $\text{CdS-pCd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ . S-a demonstrat că la polarizarea directă a HJ  $\text{CdS-pCd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  curentul este determinat de procesele de recombinare în regiunea sarcinii spațiale prin intermediul nivelului impuritar cu energia de  $0,63\text{ eV}$ , determinat de vacanțele de  $\text{Cd}$  în complex cu atomii impuritari (centre de tipul A). La polarizări inverse de  $0,4$ - $0,5\text{ V}$  trecerea curentului este determinată de procesele de scurgere, iar la tensiuni mai mari are loc generarea termică de pe nivele adânci cu energia de  $\sim 0,63\text{ eV}$ . Curentul direct prin HJ  $\text{nCdTe-pCd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  este deasemenea condiționat de procesele de recombinare din regiunea de sarcină spațială, doar că prin intermediul nivelului impuritar cu energia de  $0,50\text{ eV}$ . La polarizări inverse de  $\leq 1\text{ V}$  în HJ  $\text{nCdTe-pCd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  predomină curenții de scurgere. Energia de activare determinată din dependența de temperatură a curentului de saturație este de  $0,41\text{ eV}$ . Dependența de putere a curentului de tensiune și cea exponențială de temperatură cu energia de activare mai mare este caracteristică mecanismului de tunelare a trecerii curentului prin HJ  $\text{nCdTe-pCd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ .

În paragraful trei sunt prezentate metodele de cercetare și rezultatele analizei proprietăților fotoelectrice a HJ  $\text{nCdS-pCd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ . În Figura 6 sunt reprezentate dependențele curent-tensiune ( $I$ - $U$ ) a HJ  $\text{SnO}_2\text{-nCdS-pCd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te-Ni}$ , măsurate la diferite iluminări. Forma

caracteristicii poate fi condiționată faptului că structura HJ cercetate reprezintă două diode, una din care este nCdS-pCd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te iar cealaltă – diodă Shottky Ni-CdTe, și sunt conectate una împotriva celeilalte [33]. Cum se observă din Figură 6, odată cu micșorarea densității de putere a fluxului luminos de la 100 mW/cm<sup>2</sup> la 25 mW/cm<sup>2</sup> curentul de scurtcircuit (I<sub>SC</sub>) se micșorează mai mult de 6 ori, iar tensiunea circuitului deschis (U<sub>CD</sub>) – de la 0,80 V la 0,74 V. Coeficientul de umplere FF se mărește de la 0,54 la 0,58. Eficiența conversiei energiei luminoase în cea electrică la temperatura de 300 K și densitatea de putere a fluxului luminos 100 mW/cm<sup>2</sup> (AM 1,5) constituie 11,49%. Odată cu creșterea intensității luminei I<sub>SC</sub> și fotocurentul I<sub>F</sub> pentru polarizări inverse a HJ nCdS-pCd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te crește liniar, iar U<sub>CD</sub> tinde la saturație (Figura 7). Factorul de idealitate A, determinat din dependența U<sub>CD</sub>=f(lnE), constituie 2,28, este în concordanță cu valoarea acestuia determinată din dependențele U-I la întuneric. Studiul caracteristicilor spectrale a HJ nCdS-pCd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te a permis aprecierea influenței atât a compusului straturilor subțiri, cât și a temperaturii asupra fotosensibilității HJ (Figura 8 și 9 corespunzător).

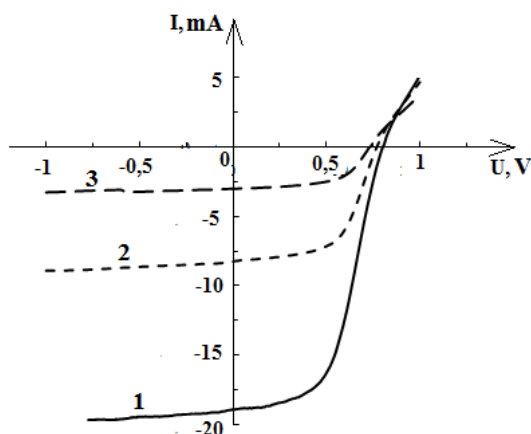


Fig. 6. Dependentele curent-tensiune (I-U) a HJ SnO<sub>2</sub>-nCdS-pCd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te-Ni, obținute la diferite iluminări (1 – 100 mW/cm<sup>2</sup>, 2 - 50 mW/cm<sup>2</sup>, 3 - 25 mW/cm<sup>2</sup>).

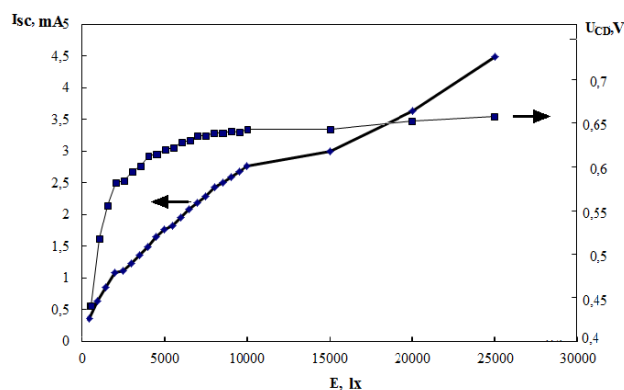


Fig. 7. Dependența tensiunii circuitului deschis și curentului de scurtcircuit a HJ nCdS-pCd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te în funcție de intensitate luminoasă.

Odată cu micșorarea conținutului de Mn în materialul sursă are loc deplasarea caracteristicii în regiunea lungimilor de undă mari, iar micșorarea temperaturii deplasează caracteristica în regiunea lungimilor de undă scurte, forma caracteristicii în ambele cazuri se schimbă nesemnificativ. Coeficientul deplasării de temperatură a caracteristicii constituie  $3,6 \cdot 10^{-4}$  eV/K și este în corelație bună cu coeficientul de temperatură a modificării lărgimii benzii interzise a materialelor componente. La iradierea laser ( $\lambda=0,53 \mu\text{m}$ ) randamentul cuantic (numărul de perechi electron-gol generate la absorbție a unei cuante de lumină) pentru HJ

nCdS-pCd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te constituie 0,55-0,6, fotosensibilitatea după curent constituie ~ 1,2 mA/mW și după tensiunea ~ 3,2 V/mW. Este de menționat, că aceste valori sunt obținute pentru structuri fără strat antireflectant și respectiv luarea în calcul a reflexie.

Rezultatele capitolului patru sunt publicate în lucrările [22, 30].

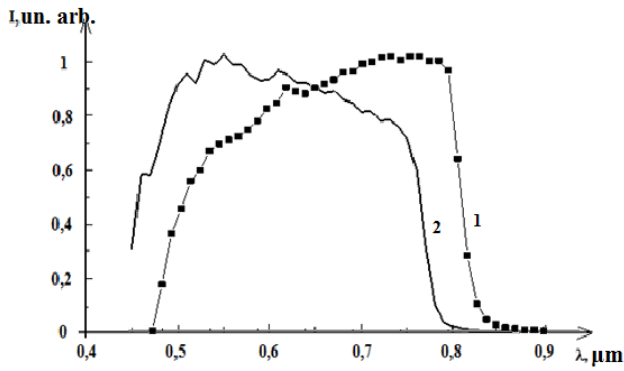


Fig. 8. Caracteristică spectrală a fotosensibilității a HJ nCdS-pCd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te cu x = 0,1(1) și x = 0,5 (2).

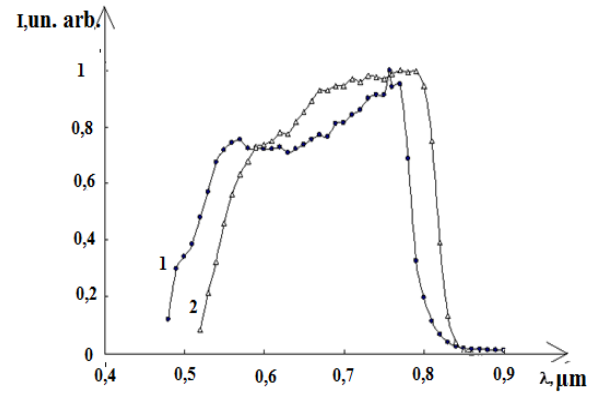


Fig. 9. Caracteristică spectrală a fotosensibilității a HJ nCdS-pCd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te la 80 K (1) și 300 K (2).



## CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

1. Creșterea concentrației manganului în soluțiile solide  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  mărește microdunitatea, care constituie 190 MPa pentru CdTe și 730 MPa – pentru  $Cd_{0,5}Mn_{0,5}Te$  la sarcina pe indentor  $\sim 0,1$  N.
2. Soluțiile solide  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  corespund materialelor antiferomagnetice. Pentru domeniul temperaturilor joase ( $1,79\text{ K} < T \leq 45\text{ K}$ ) proprietățile antiferomagnetice se păstrează pentru probele cu compusul  $x=0,5$ , iar pentru probele cu un conținut mai redus de mangan ( $x=0,13$  și  $0,3$ ) acestea manifestă proprietăți de spin-sticlă.
3. Din dependențele spectrale a fotoconductibilității a cristalelor  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  ( $x=0,3; 0,43; 0,5$ ), măsurate la temperatura de  $T=293\text{ K}$  au fost determinate nivelurile impuritate, cu energiile:  $0,13\text{ eV}$  pentru  $x=0,3$ ;  $0,1\text{ eV}$  pentru  $x=0,43$ ;  $0,26\text{ eV}$  și  $0,15\text{ eV}$  pentru  $x=0,5$ . Aceste nivele sunt rezultatul existenței unor complexe, ce constau din atomii din grupa I în subrețeaua de cadmiu ( $Cu_{Cd}$ ,  $Ag_{Cd}$ ) și poziționare alături a atomilor de Mn.
4. În spectrele de absorbție la temperatura de  $78\text{ K}$  se observă un maxim determinat de prezența excitonilor liberi. Din deplasarea marginii absorbției fundamentale odată cu creșterea temperaturii de la  $78\text{ K}$  până la  $300\text{ K}$  sa determinat că coeficientul termic de modificare a lărgimii benzii interzise este  $-(2,8 \cdot 10^{-4}\text{ eV/K} - 6,04 \cdot 10^{-4}\text{ eV/K})$  pentru  $x = 0,01$  și pentru  $x = 0,5$ .
5. Din cercetarea structurii zonale a soluțiilor solide  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  de diferită compoziție a fost determinat că:
  - creșterea concentrației de mangan până la  $x=0,5$  duce la micșorarea liniară a despicerii spin-orbitale  $\Delta_0$  a benzii de valență în punctul  $\Gamma$  a zonei Brillouin de la  $1,06\text{ eV}$  ( $x=0$ ) la  $0,42\text{ eV}$ . Despicarea  $\Delta_1$  în punctul L se micșorează de la  $0,6\text{ eV}$  ( $x=0$ ) la  $0,42\text{ eV}$  ( $x=0,13$ ), iar la mărirea în continuare a concentrației de mangan practic nu se schimbă;
  - intervalul energetic între marginile benzii de valență și benzii de conducție în punctele  $\Gamma$ , L și X a soluțiilor solide  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  se micșorează cu micșorarea concentrației de mangan;
  - la micșorarea temperaturii de la  $293\text{ K}$  la  $78\text{ K}$  maximile  $E_0$ ,  $E_1$  și  $E_0+\Delta_0$ ,  $E_1+\Delta_1$  se deplasează în regiunea energiilor mari. La creșterea temperaturii valorile despicerilor  $\Delta_0$  și  $\Delta_1$  se micșorează;
  - despicerile spin-orbitale a benzii de valență în p. G -  $\Delta_G = 0,92\text{ eV}$  și p. X -  $\Delta_X = 0,32\text{ eV}$ .
6. Tratarea termică a cristalelor  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  în atmosfera de cadmiu permite schimbarea tipului de conductivitate și apariția a două nivele cu energia de activare de  $\sim 0,15\text{ eV}$  legate cu existența unui complex, constând din atomii din grupa I în subrețeaua de cadmiu ( $Cu_{Cd}$ ,  $Ag_{Cd}$ )

și repartizarea alături a atomilor de Mn, și ~ 0,37 eV determinat de vacanțele de cadmiu în  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ , iar doparea cu Cu mărește fotosensibilitatea probelor.

7. În straturile subțiri  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ , obținute prin metoda volumului cuasiînchis, concentrația Mn depinde de temperatură suportului. La temperaturile suportului  $T_{sup} \leq 610-630^\circ C$  straturile subțiri au compoziția aproape de CdTe, iar pentru  $T_{sup} > 630^\circ C$  crește concentrația Mn (la  $T_{sup} = 660^\circ C$ ,  $x = 0,012$ ).
8. Trecerea curentului la polarizare directă a HJ CdS- $Cd_{1-x}Mn_xTe$  este determinat de procesele de recombinare în regiunea de sarcină spațială prin intermediul nivelului impuritar cu energia 0,63 eV, care este determinat de vacanțele de Cd în complex cu atomii impuritari (centre de tipul A). La polarizări inverse  $\leq 0,4-0,5$  V predomină curenții de scurgere, iar la tensiuni mai mari curentul este determinat de generarea termică prin centrele impuritare cu energia de activare 0,63 eV.
9. La iluminarea HJ CdS- $Cd_{1-x}Mn_xTe$  tensiunea circuitului deschis tinde la saturație, iar curentul de scurtcircuit se schimbă proporțional intensității fluxului luminos. La temperatura de 300 K și iluminare  $100 \text{ mW/cm}^2$  (AM 1,5)  $U_{CD} = 0,79-0,83$  V și  $I_{SC} = 25,6-26,4 \text{ mA/cm}^2$ . Eficiența conversiei energiei luminoase în energie electrică ia valori cuprinse între 11,49-11,83 %.
10. Caracteristica spectrală a HJ CdS- $Cd_{1-x}Mn_xTe$  cuprinde domeniul lungimilor de undă  $0,51 - 0,86 \mu\text{m}$  și este limitată de energia fotonilor, ce corespunde lărgimei benzilor interzise a materialelor componente. Randamentul cuantic constituie  $0,55 - 0,6$ , iar fotosensibilitatea după curent este  $1,2 \text{ mA/mW}$  și după tensiune -  $3,2 \text{ V/mW}$ .

Studiul efectuat a permis soluționarea unei probleme științifice importante: dirijarea cu structura de benzi energetice a cristalelor  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  variind concentrația Mn; dirijarea cu concentrația purtătorilor de sarcină și cu tipul de conducție a cristalelor  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  dopându-le cu diferite impurități; obținerea heterojoncțiunilor cu fotosensibilitate înaltă care pot fi utilizate pentru fabricarea celulelor solare cu eficiența  $11 \div 12\%$ .

În baza concluziilor prezentate putem recomanda următoarele:

- Utilizând datele despre structura de benzi energetice a unei serii de soluții solide  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  ( $0 < x \leq 0,5$ ) obținute în lucrare, pot fi confecționate structuri de diferite tipuri pentru optoelectronică și spintronică.
- Rezultatele cercetărilor proprietăților fotoelectrice a HJ CdS- $Cd_{1-x}Mn_xTe$  pot fi aplicate la producerea celulelor solare eficiente și cu preț redus și fotodetectorilor cu sensibilitate înaltă.

- Analiza dependenței de temperatură a susceptibilității magnetice a cristalelor  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  cu diferită compoziție permite determinarea concentrației manganului în cristalul dat.

## BIBLIOGRAFIE

1. Алферов Ж. И., Андреев В. М., Румянцев В. Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики. În: ФТП, 2004, т. 38, nr. 8, с. 937 – 948.
2. Loferski J. J. Theoretical consideration governing the choice of the optimum semiconductor for photovoltaic solar energy conversion. În: Journal of Applied Physics, 1956, vol. 27, nr. 7, p. 777 – 784.
3. Гаврилова И.П. Материалы для каскадных солнечных элементов. În: Экспресс Информация ВИНТИ, 1983, nr. 36, с. 3-5.
4. Фурдына Я., Коссута Я. Полумагнитные полупроводники. Перевод с англ. под ред. Цидильковского И. М. Москва: Мир, 1992. 496 с.
5. J. K. Furdyna. Diluted magnetic semiconductors. În: J. Appl. Phys., 1988, vol. 64, p. 29-64.
6. N. Pelekanos and oth. Spectroscopy of CdTe/MnTe single quantum wells: A strained-layer II-VI heterostructure with strong electronic confinement. În: Phys. Rev. B, 1990, vol. 41, 9966.
7. Захарченя Б. П., Майер Ф. Оптическая ориентация. Ленинград: Наука, 1989. 408 с.
8. Kett H. and oth. Magnetic phases of a Heisenberg spin glass in strong magnetic fields: High field faraday rotation in  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ . În: J. Magn. and Magn. Mater., 1981, vol. 25, p. 215-220.
9. Соколов В. И., Цидильковский И. М., Черняев В. В. Особенности электроотражения твердых растворов  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ . În: ФТП, 1981, т. 15, № 5, с. 1026 – 1028.
10. Власенко А. И. и др. Акцепторы в  $Cd_xMn_{1-x}Te$ . În: ФТП, 1997, том 31, nr. 8, с.1017-1019.
11. Крупичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов. Москва: Мир, 1976. 354 с.
12. Савицкий А. В. Ş. А. Влияние отжига монокристалла  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  на стабильность их электрофизических параметров. În: Неорганические материалы, 1995, т.32, № 8, с. 957-959.
13. M. Caraman, P. Gashin, S. Metelița (S. Cuznețova), V. Nicorici, A. Nicorici. Distribuția spectrală a fotoluminescenței în cristalele  $Cd_xMn_{1-x}Te$ . În: Materialele a VI-lea Colocviu Național de Fizica și Tehnologia Materialelelor Cristaline și Amorfe, Iași, România, 2000, p. 52-53.
14. D. Todoran, M. Caraman, P. Gashin, S. Metelița (S. Cuznețova), V. Nicorici. Efecte excitonice în spectrele optice a cristalelor din șirul soluțiilor solide  $Cd_xMn_{1-x}Te$ . În: Analele științifice ale USM. Seria «Științe fizico-matematice», 2001, p. 194-204.

15. D. Todoran, P. Gashin, S. Metelița (S. Cuznețova), V. Nicorici, M. Caraman, V. Beșliu, A. Nicorici. Funcțiile optice și structura benzilor energetice în cristalele  $Cd_xMn_{1-x}Te$ . În: Analele științifice ale USM. Seria «Științe fizico-matematice», 2001, p. 179 -186.
16. D. Todoran, M. Caraman, P. Gashin, S. Metelița (S. Cuznețova), V. Nicorici, A. Nicorici, V. Beșliu. Proprietățile electrice și fotoelectrice ale cristalelor  $Cd_xMn_{1-x}Te$ . În: Analele științifice ale USM. Seria «Științe fizico-matematice», 2001, p. 187 – 193.
17. D. Todoran, M. Caraman, P. Gashin, S. Metelitsa (S. Kuznetsova), V. Nicorici, V. Beshliu, A. Nicorici. Studies of the electronic states in  $Cd_xMn_{1-x}Te$  crystals. În: Abstract book of the 1st International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, MSCMP, Chisinau, Moldova, 2001, p. 57.
18. Snejana Metelița (Snejana Cuznețova). Spectrele de absorbție ale cristalelor  $Cd_xMn_{1-x}Te$ . În: Materialele Colocviului Internațional de Fizică «Evrika!», Ediția a IX-a, Chișinău, Moldova, 2002, p. 68.
19. P. Gashin, S. Metelița (S. Cuznețova), M. Caraman, V. Nicorici, A. Nicorici. Structura benzilor energetice în cristalele  $Cd_xMn_{1-x}Te$ . În: Materialele Colocviului Internațional de Fizică «Evrika!», Ediția a IX-a, Chișinău, Moldova, 2002, p. 75 – 76.
20. P. Gashin, S. Metelitsa (S. Kuznetsova), M. Caraman, V. Nicorici, A. Nicorici. Exciton luminescence in  $Cd_xMn_{1-x}Te$  compounds. În: Abstract book of the 2<sup>th</sup> National Conference of the Rom. Phys. Soc. Tîrgu-Mureș, România, 2002, p. 67.
21. P. Gașin, L. Gagara, V. Nicorici, S. Metelița (S. Cuznețova), Gheorghe I. Rusu, I. Caraman. Studiul proprietăților optice și fotoelectrice ale soluțiilor solide  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  ( $0 \leq x \leq 0,5$ ) în monocristale dopate cu Cu și în straturi subțiri policristaline. În: Analele științifice ale USM. Seria «Științe fizico-matematice», 2003, p. 104-108.
22. L. Gagara, P. Gașin, S. Metelița (S. Cuznețova), V. Nicorici, A. Nicorici. Heterojoncțiuni pe baza de ZnSe cu straturi subțiri de  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ . În: Materialele conferinței corpului didactico-științific, Chișinău, Moldova, 2003, p. 255.
23. M. Caraman, L. Gagara, S. Metelița (S. Cuznețova), V. Nicorici, C. Rotaru, A. Nicorici. Proprietățile fotoelectrice ale straturilor subțiri  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ . În: Materialele conferinței corpului didactico-științific, Chișinău, Moldova, 2003, p. 261.
24. Снежана Метелица (Снежана Кузнецова). Фотолюминесценция тонких слоев  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ . În: Materialele Conferinței Științifică Internațională dedicată jubileului de 60 ani ai USM, Chișinău, Moldova, 2006, p. 133-134.

25. P. Gașin, V. Nicorici, S. Metelița (S. Cuznețova), D. Grabco, Ia. Mirgorodscaia, A. Nicorici. Proprietățile mecanice și electrofizice ale cristalelor  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ . În: Abstract book of the 5<sup>th</sup> International Conference on “Microelectronics and Computer Science”, ICMCS, Chișinău, Moldova, 2007, p. 16-19.
26. P. Gașin, S. Metelița (S. Cuznețova), V. Nicorici, P. Chetruș, A. Nicorici. Obținerea straturilor subțiri  $Cd_xMn_{1-x}Te$  și studiul parametrilor lor. În: Materialele conferinței fizicienilor din Moldova, CFM-2007, Chisinau, Moldova, 2007, p. 18.
27. P. Gașin, S. Metelița (S. Cuznețova), V. Nicorici. The investigation of the  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  structures. În: Abstract book of the 4<sup>th</sup> International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, MSCMP, Chisinau, Moldova, 2008, p. 116.
28. Снежана Метелица (Снежана Кузнецова). Влияние примеси меди на электрофизические свойства кристаллов  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ . În: Materialele conferinței Științifică cu Participare Internațională consacrată aniversării a 65-a a USM, Chișinău, Moldova, 2011, p. 184.
29. S. Metelitsa (S. Kuznetsova), P. Gashin, P. Ketrush, V. Nikorich, and A. Nikorich. Investigation of  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  crystals annealed in a Cd melt. În: Moldavian Journal of the Physical Sciences, 2011, vol. 10, nr. 2, p. 182-185.
30. P. Gashin, V. Nicorich, S. Metelitsa (S. Kuznetsova), P. Ketrush, I. Inculets, V. Suman. Electrical and photoelectrical properties of  $CdS/Cd_{1-x}Mn_xTe$  heterojunctions. În: Abstract book of the X<sup>th</sup> International Conference, OPROTEH-2013, Bacău, România, 2013, p. 85-86.
31. П. Гашин, С. Метелица (С. Кузнецова), В. Никорич, В. Цуркан. Определение состава твердых растворов  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  с использованием магнитных свойств. În: Materialele conferinței științifică “Integrare prin cercetare și inovare”, Chisinau, Moldova, 2013, p. 130.
32. V. Nicorich, P. Gashin, S. Metelitsa (S. Kuznetsova), P. Ketrush, V. Tsurcan.  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  compounds – a perspective material for solar energetics. În: Proceeding of the 9<sup>th</sup> International Conference on Industrial Power Engineering, Bacău, România, 2014, p.187 – 190.
33. Niemegeers A., Burgelman M. Effects of the Au/CdTe back contact on IV- and CV-characteristics of Au/CdTe/CdS/TCO solar cells. În: Journal of Applied Physics, 1997, vol. 81, p. 2881-2886.

## ADNOTARE

La teza «Cercetarea proceselor fizice în cristale și straturi subțiri de  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  și heterojoncțiuni în baza lor», elaborată de către Snejana Cuznețova (Snejana Metelița) și prezentată pentru conferirea titlului de doctor în științe fizice, la specialitatea 134.01 – Fizica și tehnologia materialelor. Chișinău, 2015.

**Volumul și structura tezei.** Teza este scrisă în limba rusă și constă din introducere, patru capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografie din 88 titluri. Volumul lucrării constituie 140 pagini, 81 figuri, 14 tabele și 28 de formule. Rezultatele obținute sunt publicate în 20 lucrări științifice.

**Cuvinte cheie:** structura de benzi, antiferomagnetic, conductivitate, impuritate, luminescență, straturi subțiri, heterojoncțiuni, sensibilitate spectrală.

**Rezultatele prezentate în teza sunt din domeniul științei fizicii materialelor semimagnetice și a structurilor cu barieră de potențial în baza lor.**

**Scopul tezei** constă în studiul complex a proprietăților electrice, optice și de luminescență a cristalelor și straturilor subțiri de  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ , determinarea structurii de benzi, a parametrilor electrice și fotoelectrice în dependența de compoziție și tipul impurităților introduse, determinarea mecanismelor de transport al curentului și a efectului fotovoltaic în heterojoncțiunile nCdS-p $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ .

**Noutatea și originalitatea științifică** a tezei constă în efectuarea în premieră a studiului detaliat a structurii de benzi a unui șir de soluții solide  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $0 \leq x \leq 0,5$ ), dependența despiciării spin-orbitale a benzii de valență în funcție de compoziție și temperatură. În premieră au fost studiate proprietățile mecanice ale cristalelor  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  și proprietățile magnetice în funcție de compoziție într-un interval larg de temperaturi 1,79÷400 K. A fost cercetată influența dopării cu diferite impurități (Cd, Te, Cu) asupra proprietăților electrice, optice și de luminescență a cristalelor  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ . În premieră au fost obținute heterojoncțiunile nCdS-p $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  și cercetate proprietățile electrice și fotoelectrice.

**Studiul efectuat** a permis soluționarea unei probleme științifice importante: dirijarea cu structura de benzi energetice a cristalelor  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  variind concentrația Mn; dirijarea cu concentrația purtătorilor de sarcină și cu tipul de conducție a cristalelor  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  dopându-le cu diferite impurități; obținerea heterojoncțiunilor cu fotosensibilitate înaltă care pot fi utilizate pentru fabricarea celulelor solare cu eficiența 11÷12%.

**Semnificația teoretică și valoarea aplicativă a lucrării.** Rezultatele cercetărilor efectuate dau posibilitatea de a lămuri specificul proprietăților fotoelectrice a semiconductorului  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  și a structurilor de diferite tipuri în baza lor și legătura cu câmpurile magnetice exterioare. Compusul semiconductor  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  este comod deoarece permite dirijarea după necesitate cu lărgimea benzii interzise, indicile de refracție, coeficientul de absorbție ș.a. variind concentrația manganului și pot să se schimbe sub acțiunea câmpului magnetic. Atomii de mangan ocupă nodurile rețelei cristaline, ceea ce aduce la formarea unei soluții solide “ideale”, aceasta a determinat posibilitatea utilizării  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  pentru formarea straturilor de barieră în structurile semiconductoare bidimensionale, modulatorilor optice, diferite dispozitive optoelectronice și a “spintronicii”.

## АННОТАЦИЯ

диссертации «Изучение физических процессов в кристаллах и тонких слоях  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  и гетеропереходах на их основе» Кузнецовой Снежаны (Метелица Снежана), представленной на соискание ученой степени доктора физических наук по специальности 134.01 – Физика и технология материалов. Кишинёв, 2015 год.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа написана на русском языке и состоит из введения, четырех глав, общих выводов и рекомендаций, списка из 88 цитируемых публикаций. Работа содержит 140 страниц, 81 рисунок, 14 таблиц и 28 формул. Полученные результаты опубликованы в 20 научных трудах.

**Ключевые слова:** зонная структура, антиферромагнетик, примесь, проводимость, люминесценция, тонкие слои, гетеропереходы, спектральная чувствительность.

**Результаты, представленные в диссертации, принадлежат области** физики полумагнитных материалов и структур с потенциальным барьером на их основе.

**Цель работы** заключается в комплексном исследовании электрических, оптических и люминесцентных свойств кристаллов и тонких слоев  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ , определение зонной структуры, электрических и фотоэлектрических параметров в зависимости от состава и типа примеси, определение механизмов токопрохождения и фотовольтаического эффекта в гетеропереходах  $n\text{CdS-pCd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ .

**Научная новизна и оригинальность** работы заключается в том, что впервые детально была изучена зонная структура ряда твердых растворов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $0 \leq x \leq 0,5$ ), зависимость спин-орбитального расщепления валентной зоны от состава и температуры. Впервые были изучены механические свойства кристаллов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  и магнитные свойства в зависимости от состава в диапазоне температур  $1,79 \div 400$  К. Было исследовано влияние легирования различными примесями (Cd, Te, Cu) на электрические, оптические и люминесцентные свойства кристаллов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ . Впервые были получены гетеропереходы  $n\text{CdS-pCd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  и изучены их электрические и фотоэлектрические свойства.

**Выполненные исследования** позволили решить важную научную проблему: управление структурой энергетических зон кристаллов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ , меняя концентрацию Mn; управление концентрацией носителей заряда и типом проводимости кристаллов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ , добавляя различные примеси; получение гетеропереходов с высокой fotocувствительностью, которые могут быть использованы для изготовления солнечных элементов с КПД  $11 \div 12$  %.

**Теоретическое значение и практическая ценность работы.** Результаты данных исследований дают возможность объяснить особенность фотоэлектрических свойств полупроводников  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  и структур различного типа на их основе и связь с приложенными магнитными полями. Полупроводниковый состав  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  удобен тем, что позволяет управлять, по-необходимости, шириной запрещенной зоны, показателем преломления, коэффициентом поглощения и др., изменяя концентрацию Mn и может меняться под действием магнитного поля. Атомы марганца занимают узлы кристаллической решетки, что ведет к формированию «идеального» твердого раствора, что и определяет возможность использовать  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  для создания барьерных слоев в двумерных полупроводниковых структурах, оптических модуляторов, различных приборов оптоэлектроники и «спинтроники».



## SUMMARY

of the thesis "**Study of physical processes in crystals, thin layers of  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  and heterojunctions based on them,**" submitted by Snejana Cuznetsova (Snejana Metelitsa) for a doctoral degree in Physics of the specialty 134.01 - Physics and technology of materials. Chisinau, 2015.

**Volume and structure of the thesis.** The thesis is written in Russian and consists of an introduction, four chapters, general conclusions and recommendations, the list of 88 cited publications. The thesis has 140 pages, 81 figures, 14 tables and 28 formulas. The obtained results were published in 20 scientific works.

**Key words:** band structure, antiferromagnetic, impurity, conductivity, luminescence, thin layers, heterojunctions, the spectral sensitivity.

**Results presented in the thesis are from the area** of physics of semi-magnetic materials and structures with a potential barrier based on them.

**The main purpose of the thesis** is a comprehensive investigation of the electrical, optical and luminescent properties of crystals and thin layers of  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ , the definition of the band structure, electrical and photoelectric parameters depending on the composition and type of impurities, determination of the mechanisms of current and photovoltaic effect in heterojunctions  $nCdS$ -  $pCd_{1-x}Mn_xTe$ .

**Scientific novelty and originality** of the thesis is that the first time has been studied in detail the band structure of a series of solid solution of  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  ( $0 \leq x \leq 0,5$ ), the dependence of the spin-orbit splitting of the valence band on the composition and temperature. The mechanical properties of crystals  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ , and magnetic properties depending on the composition in the temperature range of  $1,79 \div 400$  K were first studied. The effect of doping with various impurities (Cd, Te, Cu) on the electrical, optical and luminescent properties of the crystals  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  was investigated. The heterojunctions  $nCdS$ - $pCd_{1-x}Mn_xTe$  were first obtained and their electrical and photoelectric properties were studied.

**The main scientific problem resolved** by this thesis is: control over energy band structure of crystals  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ , changing the concentration of Mn; control over the carrier concentration and conductivity type crystals  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ , adding various impurities; receiving heterojunctions with high photosensitivity which may be used to manufacture solar cells with an efficiency of  $11 \div 12\%$ .

**Theoretical significance and practical value of the work.** The results of these studies provide an opportunity to explain the features of the photoelectric properties of semiconductors  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  and structures of various types based on them and relations with the applied magnetic fields. The semiconductor structure of  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  is convenient because of it allows to control over, is necessary, the band gap, refractive index, absorption coefficient et al., varying the concentration of Mn and may change under the influence of a magnetic field. Manganese atoms occupy lattice sites, which leads to the formation of an "ideal" solid solution, and that determines ability to use  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  for creating a barrier layer in two-dimensional semiconductor structures, optical modulators, and various optoelectronic devices "spintronics."

**CUZNEȚOVA SNEJANA**

**CERCETAREA PROCESELOR FIZICE ÎN CRISTALE ȘI  
STRATURI SUBȚIRI DE  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$   
ȘI HETEROJONȚIUNI ÎN BAZA LOR**

**134.01 – FIZICA ȘI TEHNOLOGIA MATERIALELOR**

Autoreferatul  
tezei de doctor în științe fizice

---

Aprobat spre tipar: 26.03.2015

Formatul 60x84 1/16

Hîrtie ofset. Tipar ofset.

Tiraj 50 ex.

Coli de tipar.: 1,75

Comanda nr. 201

---

Centrul Editorial-Poligrafic al USM

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