

INFLUENȚA TEMPERATURII ȘI CÂMPULUI MAGNETIC ASUPRA RESTRUCTURĂRII SPECTRULUI ENERGETIC AL PURTĂTORILOR DE SARCINĂ ÎN ALIAJELE $Hg_{1-x}Cd_xTe$ CU LĂRGIMEA ÎNGUSTĂ A BENZII ENERGETICE INTERZISE

E. Gheorghiuță, L. Guțuleac, I. Postolachi, B. Korolevski
Universitatea de Stat din Tiraspol, Chișinău,

INTRODUCERE

Un interes deosebit acordă literatura de specialitate aliajelor $Hg_{1-x}Cd_xTe$ cu lărgime îngustă a benzii energetice interzise [1,2]. Aceste materiale pot fi folosite la confecționarea receptoarelor de radiații infraroșii pentru diapazonul spectral (3-5) μm și (8-12) μm [3]. În baza acestor aliaje se construiesc receptoare cu caracteristici performante. Necătând la succesele cunoscute în acest domeniu, totuși există un set de probleme legate de stabilitatea materialelor $Hg_{1-x}Cd_xTe$, determinate de migrația necontrolată a defectelor rețelei cristaline și ionilor de mercur în volumul și în stratul de la suprafață. Este o situație care necesită o studiere mai profundă a proprietăților fizice și o modificare esențială a tehnologiei de obținere a acestor aliaje în diferite forme: pelicule epitaxiale, nanostructuri, etc.

În această lucrare se discută rezultatele experimentale a influenței temperaturii și câmpului magnetic asupra modificării spectrului energetic al purtătorilor de sarcină în aliajele $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (0,19 $\leq x \leq$ 0,40) cu lărgimea îngustă a benzii energetice interzise la temperaturi joase.

1. PELICULE EPITAXIALE $Hg_{1-x}Cd_xTe$, CARACTERISTICA EȘANTIOANELOR STUDIAȚE

Peliculele aliajelor $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (0,19 $\leq x \leq$ 0,40) studiate în această lucrare s-au obținut prin metoda epitaxiei de fază în sisteme închise din soluții îmbogățite cu telur pe straturi orientate $\langle 111 \rangle$ de telurid de cadmiu. Temperatura substratului de telurid de cadmiu, în procesul tehnologic de obținere a peliculelor, varia în intervalul de temperaturi (400-500) $^{\circ}C$ și presiunea suplimentară a vaporilor de mercur în sistemul închis nu depășea 0,1 atm. Regimul tehnologic de preparare a peliculelor $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (0,19 $\leq x \leq$ 0,40) cu conținutul nominalizat a fost ales în conformitate cu diagrama de stare a aliajului respectiv. Procesul tehnologic modernizat a permis obținerea peliculelor omogene după conținut. Următoarea etapă a procesului

tehnologic a fost coacerea peliculelor în vapori de mercur în timp de (4-8) ore. Concentrația purtătorilor de sarcină, determinată din măsurători galvanomagnetice varia în intervalul (3 $\cdot 10^{14} \div 1,5 \cdot 10^{16} cm^{-3}$), densitatea dislocațiilor nu depășea $6 \cdot 10^4 cm^{-2}$. Cercetarea roentghenostructurală a permis să evidențiem o omogenitate suficientă a peliculelor pe o grosime de (10 \div 20) μm . Pentru măsurători optice, pelicula mecanic și chimic se elibera de substrat. Pelicula se instala într-un plic din aluminiu în stare liberă.

S-au ridicat spectrele de transparență în lipsa câmpului și în câmpul magnetic cu ajutorul unei instalații speciale montate în baza spectrometrului difracționic de tipul SPM-2. Măsurătorile au fost realizate pentru intervalul de temperaturi (4,2 \div 300)K și câmpuri magnetice de până la 6T.

2. REZULTATELE EXPERIMENTALE ȘI ANALIZA LOR

2.1. Influența temperaturii asupra modificării spectrelor de absorbție

Spectrele de absorbție s-au analizat în concepția tranzițiilor optice directe de tipul „banda de valență a golurilor grele – banda energetică de conducție”. Lărgimea benzii energetice interzise a materialelor studiate în conformitate cu multitudinea datelor experimentale cunoscute pentru structura de benzi energetice Kaine, s-a calculat din spectrul de absorbție pentru nivelul coeficientului de absorbție egal cu $500 cm^{-1}$ [12]. Spectrele de absorbție s-au ridicat pentru intervalul de temperaturi (4,2 \div 300)K.

În figura 1 se prezintă spectrele de absorbție, spre exemplu, pentru două pelicule ale aliajului $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x = 0,20$, figura 1a și $x = 0,29$ figura 1b) în lipsa câmpului magnetic la diferite temperaturi din intervalul (10 \div 300)K și cu parametrii purtătorilor de sarcină la 77K, $x = 0,20$;
 $(1/R_H e)_{77} = 1,6 \cdot 10^{14} cm^{-3}$, $x = 0,29$
 $(1/R_H e)_{77} = 6,1 \cdot 10^{14} cm^{-3}$.

Rezultatele experimentale prezentate în această figură reprezintă niște fragmente din

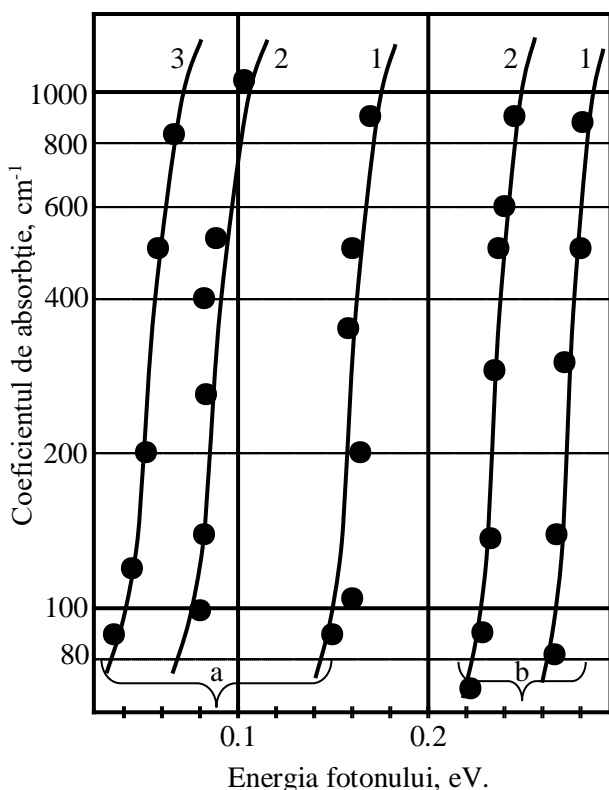


Figura 1. Spectre de absorbție ale aliajului $Hg_{1-x}Cd_xTe$.

spectrul de absorbție, care, după părerea noastră, descriu tranzițiile optice de tipul 1 - „bandă energetică de valență a gurilor ușoare - banda energetică de conducție” și 2 - „bandă gurilor grele - banda conducție” (figura 2). Analiza prealabilă a structurii și modificării spectrelor în raport de temperatură și concentrația cadmiului evidențiază următoarele: frontiera absorbției fundamentale, destul de abruptă, confirmă calitatea superioară a peliculelor studiate și un nivel tehnico-științific satisfăcător al procesului tehnologic de obținere modelat în cadrul instalației folosite; cu mărirea concentrației cadmiului în aliaj frontiera absorbției fundamentale se deplasează în diapazonul energiilor mari; la micșorarea temperaturii de la 300K la 10K, spectrul absorbției fundamentale a aliajului $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x = 0,20$) și $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x = 0,29$) se deplasează neobișnuit în diapazonul energiilor mici, forma spectrului practic nu se schimbă. O așa deplasare a spectrului absorbției fundamentale este experimental confirmată pentru aliajele $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x < 0,5$). Pentru $x > 0,5$, cu variația temperaturii, experimental s-a determinat o deplasare obișnuită specifică și altor combinații din familia semiconductorilor $A^{III}B^V$. Din analiza efectelor galvanomagnetice cu precizie putem conchide că aliajele $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x < 0,5$) la temperatura 300K sunt intrinseci. Această situație ne permite să determinăm concentrația cadmiului,

având din experiment lărgimea benzii energetice interzise. Spre exemplu, din figurile 1a, 1b, $x =$

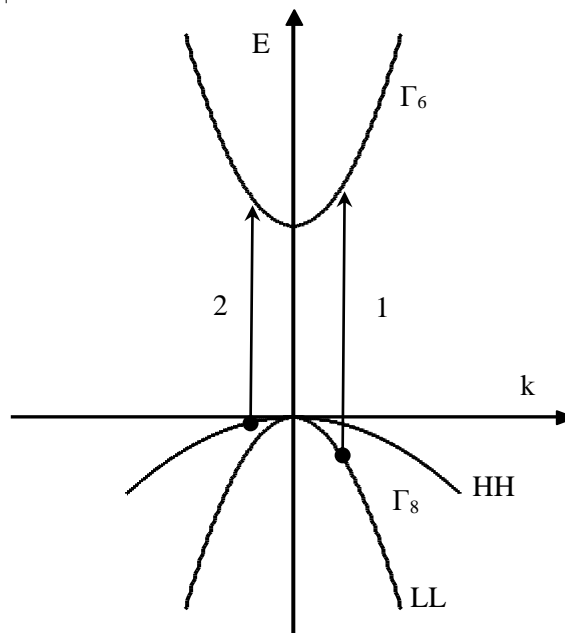


Figura 2. Tranzițiile optice.

0,20; $\varepsilon_g(300K) = 0,150eV$, $x = 0,29$, $\varepsilon_g(300K) = 0,281eV$. În experiment am folosit o sondă cu diametrul ($\sim 30\mu m$) pentru a controla omogenitatea peliculei pe diametrul respectiv. Deplasând sonda de radiație, s-au ridicat spectrele de absorbție din diferite puncte ale peliculei. Statistica acestor rezultate ne confirmă posibilitatea de a determina componența aliajului cu exactitatea de 0,006. În lucrarea dată s-au studiat peliculele $Hg_{1-x}Cd_xTe$ cu compoziția din intervalul ($0,19 \leq x \leq 0,40$). Se evidențiază o dependență neliniară a funcției $\varepsilon_g = \varepsilon_g(x)$. Actualmente în literatură se cunosc 9 forme diferite pentru funcția $\varepsilon_g = \varepsilon_g(x)$. Rezultatele noastre experimentale corelează mai suficient cu forma analitică prezentată în lucrarea [10]. Analiza statistică a rezultatelor experimentale din spectrele de transparență a permis să construim o curbă de etalonare a compoziției aliajului. Spectrul de etalonare este prezentat în figura 3. Acest spectru permite operativ, după curba de transparență, să determinăm lungimea de undă pentru care coeficientul de transparență alcătuiește 50% din transparența maximală (pentru spectrul de transparență abrupt, cum este imaginat în intersetul din această figură) după care găsim și compoziția aliajului. Pentru construirea curbei de etalonare, în aceeași concepție au fost folosite în ansamblu și spectrele de fotoconducție ale diferitor aliaje $Hg_{1-x}Cd_xTe$ la temperaturile 300K și 77K.

Considerând că în tranzițiile optice, înregistrate în spectrele de absorbție pentru aliajele $Hg_{1-x}Cd_xTe$ cu diferite compoziții, aportul tranzițiilor optice din banda energetică a gurilor

ușoare nu este esențial, s-au calculat spectrele absorbției fundamentale în concepția că rolul principal în tranzițiile optice îi aparține tranzițiilor directe din banda energetică a golurilor grele în banda de conducție în cadrul modelului Kane [5]. Rezultatele acestor calcule sunt prezentate în figurile 1a, b prin linii continue. Evidențiem o coincidență suficientă a spectrelor experimentale cu cele teoretice. Corelarea între datele experimentale

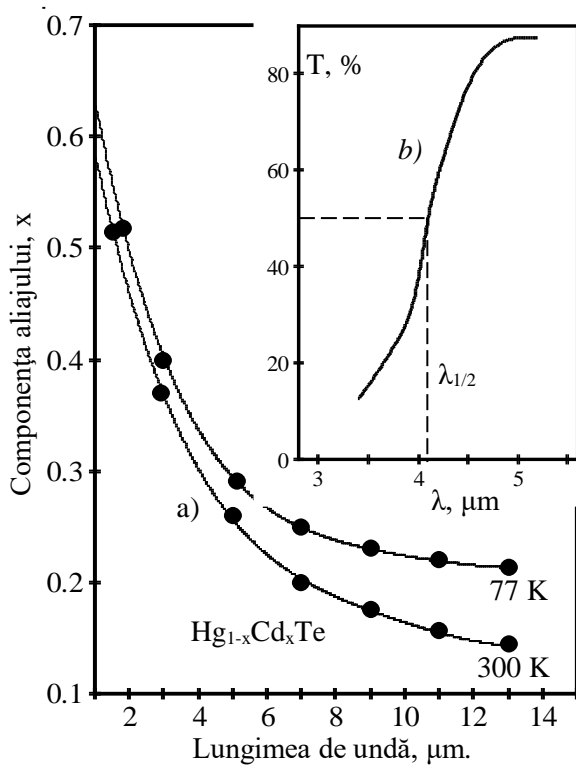


Figura 3. Spectrul de etalonare a componentei aliajului (a) și forma curbei de transparență (b).

și cele teoretice s-a obținut pentru următorii parametri ai benzilor energetice:

$$\varepsilon_{\infty} = 16, \quad m_{hn}^* = 0,5m_0; \quad m_e^* = 0,056m_e$$

(pentru $x = 0,20$), $m_e^* = 0,107m_e$ (pentru $x = 0,29$);
 $P = 8,3 \cdot 10^{-8} \text{ eV} \cdot \text{em}_i$, $\Delta = 1,1 \text{ eV}$.

Din spectrele absorbției fundamentale ridicate la diferite temperaturi, pentru pelicule $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ cu diferite concentrații a cadmiului, s-au determinat coeficienții termici ai benzii energetice

$$\text{interzise} \left(\frac{d\varepsilon_g}{dT} \right)_P = f(x).$$

Rezultatele experimentale ale determinării coeficientului termic al lățimii benzii energetice interzise în raport de concentrația cadmiului sunt reprezentate în figura 4. Datele prezentate în această figură confirmă următoarele: pentru $x < 0,5$, spre deosebire de alte combinații, coeficientul termic al benzii energetice interzise este pozitiv, iar pentru

$x > 0,5$ este negativ, are același semn ca și pentru alte combinații cu proprietăți de semiconductori cunoscute în literatura de specialitate. $\varepsilon_g = f(x)$

nu este o funcție liniară, pe când $\left(\frac{d\varepsilon_g}{dT} \right) = f(x)$

practic are forma unei funcții liniare de concentrația cadmiului. În literatura de specialitate [6,7], privitor

la caracteristica energetică $\left(\frac{d\varepsilon_g}{dT} \right)$ a diferiților

semiconductori, sunt cunoscute două modele teoretice pentru calcularea acestui parametru și anume: dilatarea termică a rețelei cristaline [7,8] și interacțiunea electron-fonon [9], adică:

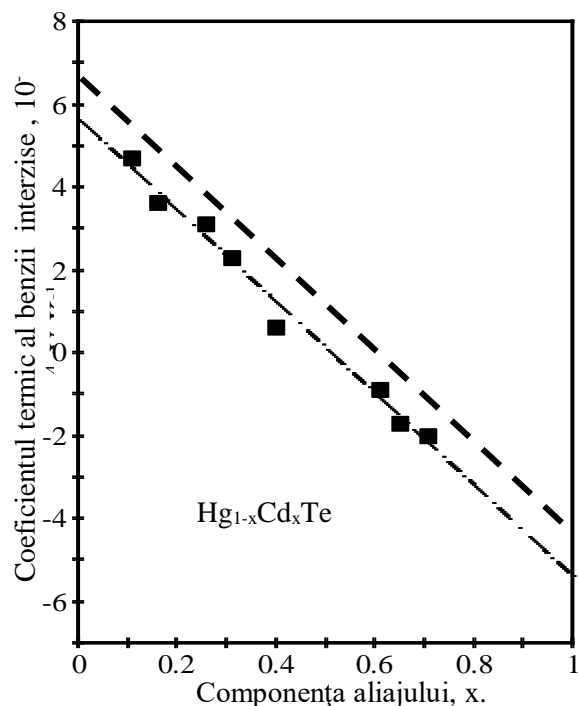


Figura 4. Dependența coeficientului termic al benzii energetice interzise de componentă.

$$\left(\frac{d\varepsilon_g}{dT} \right) = \left(\frac{d\varepsilon_g}{dT} \right)_R + \left(\frac{d\varepsilon_g}{dT} \right)_{ef},$$

unde $\left(\frac{d\varepsilon_g}{dT} \right)_R$ - variația determinată de dilatarea rețelei cristaline;

$\left(\frac{d\varepsilon_g}{dT} \right)_{ef}$ - variația determinată de interacțiunea electron-fonon.

Calcularele noastre pentru aceste componente realizate, folosind datele necesare din lucrarea [7,8], ne dau pentru ambele valori negative, ce nu corelează cu datele experimentale discutate în această lucrare.

Experimentele discutate în această lucrare se explică, dacă admitem că rolul principal în funcția

$\left(\frac{d\varepsilon_g}{dT}\right)$ îi revine interacțiunii electron-fonon

relativiste. Efectele electron-fonon relativiste sunt specifice aliajelor, în componența cărora sunt elementele grele, cum ar fi mercurul în $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x < 0,5$), sau plumbul în $Pb_{1-x}Sn_xTe$, anume conform concepției expuse în lucrarea [7]

$\left(\frac{d\varepsilon_g}{dT}\right)^{REL} > 0$. Coeficientul termic al lărgimii

benzii energetice interzise se poate prezenta:

$$\left(\frac{d\varepsilon_g}{dT}\right)_{exp} = \left(\frac{d\varepsilon_g}{dT}\right)_R + \left(\frac{d\varepsilon_g}{dT}\right)_{ef} + \left(\frac{d\varepsilon_g}{dT}\right)_{efREL}$$

$$\left(\frac{d\varepsilon_g}{dT}\right)_R < 0; \left(\frac{d\varepsilon_g}{dT}\right)_{efREL} > 0 \text{ și în}$$

$$\text{sumă } \left(\frac{d\varepsilon_g}{dT}\right)_{exp} > 0.$$

Calculule noastre pentru toate trei componente corelează cu datele obținute din experiment și cu alte informații cunoscute în literatura de specialitate.

2.2. Spectrele de absorbție în câmpul magnetic

Un sistem optic de-o construcție specială ne-a permis înregistrarea spectrelor de transparență în câmpul magnetic excitat de o bobină supraconductoare.

În figura 5a, ca exemplu, sunt prezentate spectrele de absorbție ale unei pelicule $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x = 0,24$) în lipsa câmpului magnetic (spectrul 1) și în câmpul magnetic cu inducția 6T (spectrul 2) la $T = 4,2K$. Analiza structurii spectrelor prezentate în această figură evidențiază următoarele: spectrele de absorbție în câmpul magnetic și în lipsa câmpului magnetic pentru concepția tranzițiilor directe optice „banda energetică a golurilor grele – banda energetică de conducție” au aceeași formă; spectrul de absorbție a peliculei $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ridicat în câmpul magnetic exterior se deplasează în diapazonul energiilor mari; spectrele de absorbție a peliculei date și a peliculelor cu alte compoziții au fost ridicate în diferite câmpuri magnetice la aceeași temperatură; valoarea energetică a deplasării este liniară cu inducția câmpului magnetic, un exemplu este prezentat în interesul acestei figuri; folosind metodologia descrisă mai sus am determinat lărgimea benzii energetice interzise în lipsa

câmpului magnetic $\varepsilon_g(0)$ și în câmpul magnetic respectiv $\varepsilon_g(B)$.

Dependența lărimii benzii interzise de inducția magnetică este prezentată în figura 5b. Pentru exemplul prezentat avem $\varepsilon_g(0) = 0,138eV$;

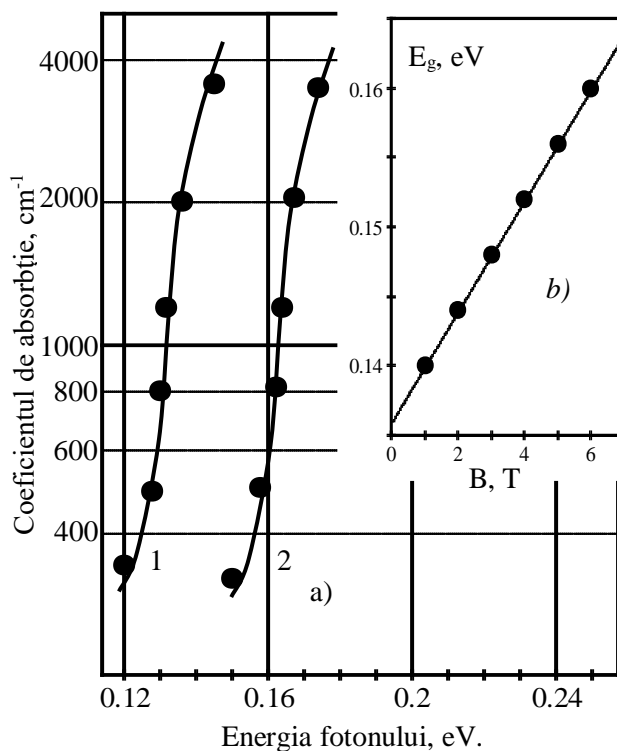


Figura 5. Spectre de absorbție ale aliajului cu $x=0,24$ (a) (1: $B=0$; 2: $B=6T$) și dependența lărimii benzii interzise de inducția magnetică (b).

$\varepsilon_g(6) = 0,158eV$. Având aceste date, am calculat

coeficientul magnetic al benzii energetice $\left(\frac{d\varepsilon_g}{dB}\right)_T = 3,4 \cdot 10^{-3} \frac{eV}{T}$. Această caracteristică s-a

calculat pentru un set de pelicule cu diferite concentrații ale cadmiului la temperatura $T = 4,2K$. Rezultatele experimentale pentru funcția

$\left(\frac{d\varepsilon_g}{dB}\right)_T = f(x)$ sunt prezentate în figura 6. Din

aceste rezultate evidențiem, că cu majorarea

concentrației cadmiului, coeficientul $\left(\frac{d\varepsilon_g}{dB}\right)_T$ se

micșorează neliniar cu majorarea concentrației cadmiului. Se explică rezultatele discutate mai sus în baza cunoscutei concepții de displicare Landau [12] a spectrului energetic în câmpul magnetic exterior. Valorile maselor efective ale electronilor, obținute din aceste experimente, corelează cu cele

obținute din spectrele de absorbție calculate și

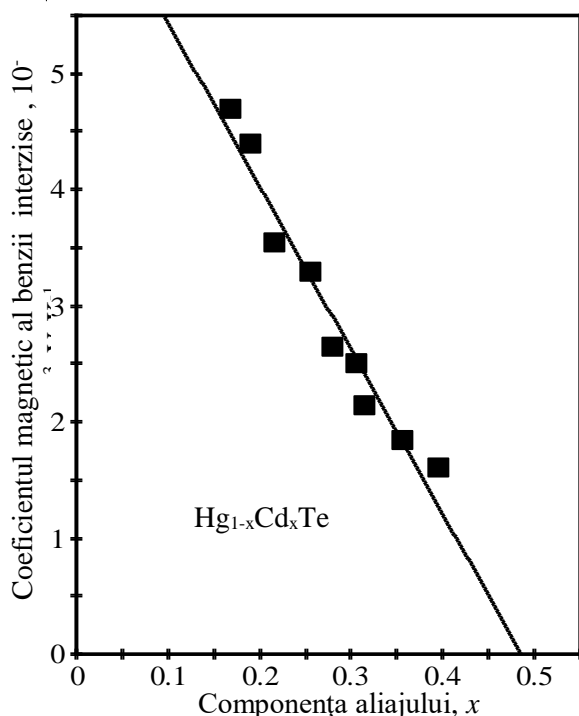


Figura 6. Dependenta coeficientului magnetic al benzii energetice interzise de componenta.

discutate mai sus.

3. CONCLUZII

În baza rezultatelor discutate mai sus pot fi formulate următoarele concluzii:

1. S-au determinat modalitățile de influență a temperaturii și câmpului magnetic asupra restructurării spectrului energetic al purtătorilor de sarcină în aliajele $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($0,19 \leq x \leq 0,40$) cu lărgimea îngustă a benzii energetice interzise;

2. În baza studierii spectrelor de absorbție la temperaturile 300K și 77K, s-au construit curbe de etalonare a conținutului de cadmiu în aliajul $Hg_{1-x}Cd_xTe$ și s-a determinat gradul de omogenitate a peliculelor $Hg_{1-x}Cd_xTe$ pe suprafața ei și pe grosimea peliculei studiate;

3. Forma spectrelor de absorbție la diferite temperaturi a permis identificarea tranzițiilor optice ca tranziții directe de tipul „banda energetică a golurilor grele – banda energetică de conducție”. Temperatura nu schimbă forma spectrului absorbției fundamentale. Micșorarea temperaturii contribuie la deplasarea spectrului absorbției fundamentale în diapazonul energiilor mici;

4. Din analiza spectrelor de absorbție la diferite temperaturi, s-a determinat coeficientul termic al benzii energetice interzise

$\left(\frac{d\varepsilon_g}{dT}\right)_p = f(x)$. Coeficientul termic al benzii

energetice interzise pentru $x < 0,5$ este pozitiv, pe când pentru $x > 0,5$ este standard negativ. Se demonstrează că $\varepsilon_g = \varepsilon_g(x)$ este o funcție neliniară,

pe când $\left(\frac{d\varepsilon_g}{dT}\right)_p = f(x)$ practic este o funcție

liniară de conținutul cadmiului în aliaj. Se propune un model, ce explică semnul neobișnuit al coeficientului termic al benzii energetice interzise.

5. Câmpul magnetic la $T = 4,2K$ contribuie la deplasarea spectrului absorbției fundamentale în domeniul energiilor mari, explicată prin displicarea Landau a benzilor energetice în câmpul magnetic.

Experiența s-a calculat $\left(\frac{d\varepsilon_g}{dB}\right)_T = f(x)$ fiind o

funcție neliniară de conținutul cadmiului în aliajul respectiv.

6. Analiza rezultatelor experimentale din această lucrare a permis calcularea următoarelor caracteristici ale structurii $\varepsilon_g = \varepsilon_g(x)$; masa efectivă a purtătorilor de sarcină, energia de displicare spin-orbită, elementul matricei de interacțiune cu alte benzi energetice etc.

Bibliografie

1. Mîndîbaev K.D., Ivanov-Omskij V.I. // FTP, 2006, t. 40, V 1, s. 3.
2. Lyubchenko A. V., Sal'kov E. A., Sizov F.F. Fizicheskie osnovy poluprovodnikovoj fotoelektroniki. Kiev, Naukova Dumka, 1984, 250 s.
3. Kies P.J. Fotopriemniki vidimogo i IK diapazonov. M., Radio i svyaz', 1985, 104 s.
4. Mundaev K. D., Ivanov-Omskij V. I. // J. Alloys. Comp., 2004, 371, p. 153.
5. Kane E. O. // J. Phys. Sem. Sol., 1957, v 1, Nr. 4, p. 249-261.
6. Nesmelova I.M., Kosheleva V.I., Baryshev N.S., Cherkasov I.P. //FTP, 1977, t. 11, v. 11, s. 2173.
7. Vekilov Iu.K., Rusakov A. P. // FTP, 1971, t. 13, v. 4, p. 1157.
8. Rusakov A. P. // FT, 1971, t. 13, v. 2, s. 623.
9. Fen G. // Fonon-elektronnoe vzaimodejstvie v kristallah. M., 1964, 126 s.
10. Finkman E. Schacham S.E. // J. Appl. Phys., 1984, v- 56, Nr. 10, p. 2896-2400
11. Ivanov-Omskij V.I., Kihanovskij C.I., Smirnov V.A., Yuldashev Sh.Ch. Spectry pogloshcheniya i FL $Cd_xHg_{1-x}Te$ // FTT, 1983, t. 25, v. 4, s.1214-1216.
12. Uhanov Yu.I. Opticheskie svojstva poluprovodnikov. M., Nauka, 19.
13. Regalski A. // Infrared Phys., Technol., 2002, 43, p. 187.

Recomandat spre publicare: 06.02.2008