

IRADIAREA EXCITONICĂ ÎN SEMICONDUCTOARELE SEMIMAGNETICE $Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$ LA TEMPERATURI JOASE

¹A. Gheorghiuță, ¹E. Gheorghiuță, ¹L. Guțuleac, ¹V. Melinte, ²Ș. Yuldashev*

¹Universitatea de Stat din Tiraspol,

²Institutul de Fizică Aplicată, Uzbekistan

INTRODUCERE

Semiconductorii semimagnetici (semiconductorii magnetici diluați), reprezentanți ai cărora sunt aliajele ternare $Hg_{1-x}Mn_xTe$ și aliajele cuaternare $Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$, pe lângă proprietățile fizice netriviabile, determinate, în principiu, de interacțiunea de schimb specifică acestor materiale, tind a fi material alternativ materialelor ternare $Hg_{1-x}Cd_xTe$ - principalul material utilizat pentru confecționarea dispozitivelor de radiație infraroșie pentru „fereastra” optică a atmosferei $10,6\mu m$. Din punct de vedere structural în $Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$ și $Hg_{1-x}Mn_xTe$ în subrețeaua cationică atomul de mercur este substituit de atomul de mangan. Această situație, conform datelor experimentale și estimărilor teoretice cunoscute în literatura de specialitate [1] se manifestă prin stabilizarea legăturii chimice slabă $Hg-Te$ ce contribuie la stabilizarea caracteristicilor fizice ale semimagneticilor în comparație cu aliajele $Hg_{1-x}Cd_xTe$. Aliajele $Hg_{1-x}Cd_xTe$ în situația menționată condiționează la instabilitatea rețelei cristaline și degradarea rapidă a proprietăților fizice și, deci, a caracteristicilor fizice a dispozitivelor confecționate pe baza acestor materiale, ceea ce nu este specific semimagneticilor discutați.

Evidențiem unele avantaje, cum din punct de vedere teoretic, așa și din punct de vedere aplicativ pentru aliajele semimagnetice de tipul $Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$, $Hg_{1-x}Mn_xTe$ și anume:

- se manifestă o stabilitate majoră a caracteristicilor fizice a straturilor spre deosebire de materialele cu aceeași structură a spectrului energetic al purtătorilor de sarcină din familia $Hg_{1-x}Cd_xTe$;

- interacțiunea de schimb specifică materialelor semimagnetice depinde de conținutul manganului în aliajul respectiv. În aliajul cuaternar de tipul $Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$ variind cu concentrația relativă

a manganului și cadmiului se pot obține materiale cu aceeași lărgime a benzii energetice interzise cu diferite valori a integralelor de schimb, un moment destul de esențial în analiza proprietăților fizice și aplicative;

- comportarea diferită a aliajelor semimagnetice $Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$ și $Hg_{1-x}Cd_xTe$ în câmpul magnetic exterior;

- o restructurare neobișnuită a spectrului energetic a semimagneticilor și nemagneticilor sub influența temperaturii.

Avantajele enunțate mai sus și determină actualitatea cercetării modificării spectrului energetic al purtătorilor de sarcină în materialele semimagnetice $Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$ sub influența temperaturii, câmpului magnetic exterior și concentrației componentelor aliajului.

În lucrarea dată se analizează structura spectrelor de iradiere înregistrate pentru aliajul $Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$ în raport de concentrația componentelor la temperatura de 2K în ansamblu cu spectrele de transparență optică în lipsa câmpului magnetic exterior.

1. REZULTATELE EXPERIMENTALE ȘI DISCUȚIA LOR

Eșantioanele studiate în această lucrare s-au obținut prin metoda epitaxiei de fază din sistem închis pe substraturi orientate de telurid și cadmiu. Ruta tehnologică de obținere a peliculelor epitaxiale este descrisă în lucrarea [2]. Componenta de conținut a probei studiate a fost determinată, utilizând instalația „Comebax”. Peliculele epitaxiale după procedura de creștere au fost supuse tratamentului termic în vapori de mercur cu temperatura de tratament $(230\pm 10)^{\circ}C$. Concentrația purtătorilor de sarcină măsurată la temperatura azotului lichid varia în intervalul $(0,5\div 3)\cdot 10^{15}cm^{-3}$. Purtătorii de sarcină de neechilibru au fost excitați cu ajutorul laserului de impuls confecționat în baza aliajului $Ga_{1-x}Al_xAs$ cu energia de excitație a

fotonului $1,45eV$ la temperatura de $2K$. Puterea de excitație în impuls alcătuiește $(10 \pm 15)W$. Instalația utilizată în experiment a permis înregistrarea spectrelor de iradiere cum în regim de reflexie, așa și în regim de transparență, la fel a permis și înregistrarea spectrelor de transparență optică a peliculelor respective la temperatura dată. La identificarea structurii spectrelor de iradiere s-a folosit cunoscuta metodă Alientz-Fok [3]. Parametrii de bază ai peliculelor supuse experimentului de înregistrare a spectrelor de iradiere au fost determinați în baza măsurătorilor efectelor galvanomagnetice și efectelor de transparență optică sunt prezentați în tabelul 1.

Tabelul 1.

Nr	Structura eșantionului	E_g (meV) $T = 2K$	Concentrația, cm^{-3}
1	$Hg_{081}Cd_{005}Mn_{014}Te$	$342 \pm 0,2$	$2,60 \cdot 10^{15}$
2	$Hg_{082}Cd_{010}Mn_{008}Te$	$261 \pm 0,2$	$1,30 \cdot 10^{15}$
3	$Hg_{081}Cd_{008}Mn_{011}Te$	$245 \pm 0,2$	$2,10 \cdot 10^{15}$
4	$Hg_{076}Cd_{010}Mn_{014}Te$	$317 \pm 0,2$	$8,20 \cdot 10^{14}$
5	$Hg_{085}Cd_{003}Mn_{012}Te$	$215 \pm 0,2$	$1,09 \cdot 10^{15}$

Probele studiate, după cum se confirmă în acest tabel, au tipul de conductivitate – n cu un coeficient de compensare $(0,8 \div 0,9)$.

În figura 1 sunt prezentate spectrele de iradiere și de transparență optică pentru două pelicule $n-Hg_{081}Cd_{005}Mn_{014}Te$ (1) și $n-Hg_{082}Cd_{010}Mn_{008}Te$ (2) înregistrate la temperatura de $2K$ în lipsa cîmpului magnetic exterior.

Spectrele de iradiere – liniile pline, liniile segmentate – spectrele de transparență optică. Din spectrele de transparență optică am determinat, utilizînd cunoscuta metodă [4], lărgimea benzii energetice interzise pentru toate peliculele studiate. Rezultatele sunt prezentate în tabelul 1. spectrele de iradiere, după cum se vede din datele figurii 1 au o structură compusă, în principiu, din două fâșii energetice, cu maximele pentru pelicula (1)

$$\hbar\omega_{\max}(A) = (241 \pm 0,2)meV,$$

$$\hbar\omega_{\max}(B) = (237 \pm 0,2)meV,$$

menționăm faptul că distanța energetică dintre maxima fișiei A și panta fundamentală de absorbție alcătuiește $(3,6 \pm 0,2)meV$, distanța energetică

dintre fâșiile A și B alcătuiește aproximativ $(4 \pm 0,2)meV$.

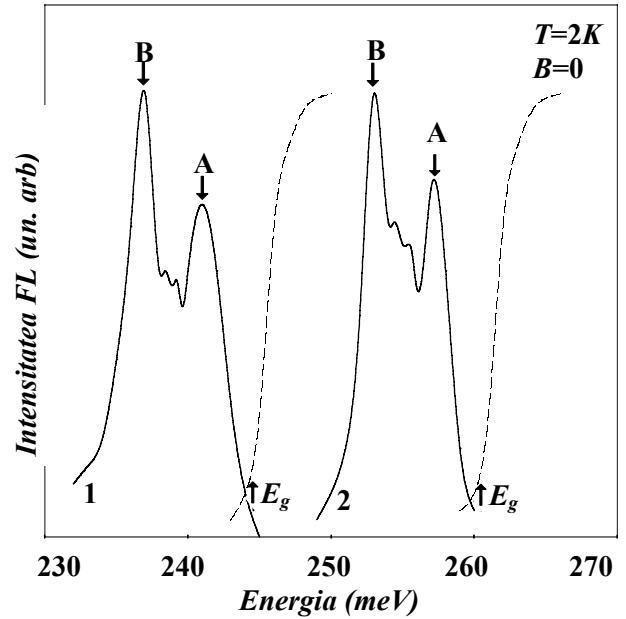


Figura 1. Spectrele de iradiere (linii pline) și de transparență (linii segmentate) pentru: 1. $Hg_{081}Cd_{008}Mn_{011}Te$; 2. $Hg_{082}Cd_{010}Mn_{008}Te$ la $T=2K$; $B=0$.

Pentru pelicula (2) sunt înregistrate fâșiile de iradiere A și B cu maximele următoare, respectiv:

$$\hbar\omega_{\max}(A) = (257 \pm 0,2)meV$$

$$\hbar\omega_{\max}(B) = (253 \pm 0,2)meV.$$

În figura 2 sunt prezentate spectrele de iradiere pentru peliculele epitaxiale, spectrul 3 pelicula cu componenta $n-Hg_{076}Cd_{010}Mn_{014}Te$ și pentru pelicula $n-Hg_{081}Cd_{005}Mn_{014}Te$ – spectrul 4.

Comparînd rezultatele prezentate în aceste două figuri conchidem că spectrele de iradiere au, în principiu, aceeași structură cu parametrii:

$$\text{pelicula 3 } \hbar\omega_{\max}(A) = (312 \pm 0,2)meV,$$

$$\hbar\omega_{\max}(B) = (307 \pm 0,2)meV;$$

$$\text{pelicula 4 } \hbar\omega_{\max}(A) = (338 \pm 0,2)meV,$$

$$\hbar\omega_{\max}(B) = (332 \pm 0,2)meV.$$

Cu creșterea lărgimii benzii energetice interzise pentru peliculele studiate în intervalul $(215 \pm 0,2)meV \div (342 \pm 0,2)meV$ aproximativ cu 20% crește intensitatea fâșiilor de iradiere înregistrate. Forma spectrelor de transparență optică (liniile segmentate din spectrele înregistrate în

figurile 1 și 2) ne permite să conchidem o calitate performantă a peliculelor epitaxiale cercetate.

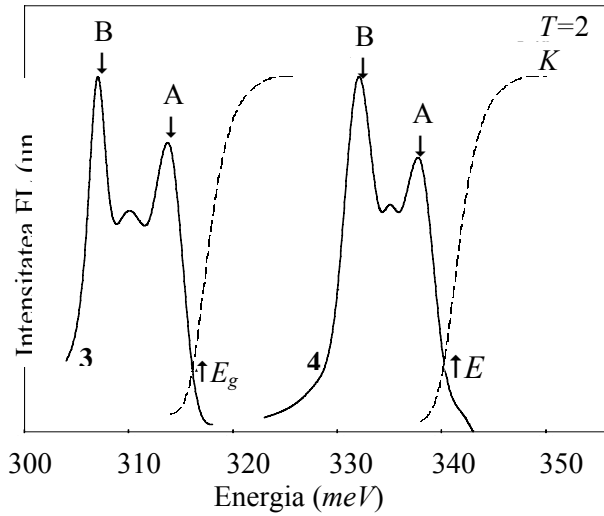


Figura 2. Spectrele de iradiere (linii pline) și de transparență optică pentru:

3. $Hg_{076}Cd_{010}Mn_{014}Te$; 4. $Hg_{081}Cd_{005}Mn_{014}Te$.

În pofida poziției energetice diferite a maximelor fâșiilor de iradiere pentru peliculele studiate, distanțele energetice între fâșiile respective, distanța energetică între fâșia de iradiere A și panta absorbției fundamentale sunt aceleași și alcătuiesc în principiu $(3,6 \div 4,1)meV$. Pentru claritatea procedurii de identificare s-a investigat influența temperaturii asupra modificării spectrelor de iradiere.

Cu majorarea temperaturii spectrele de iradiere se deplasează în diapazonul energiilor mari, la temperatura de $12K$ ambele fâșii de iradiere se sting. Pînă la temperatura de $12K$ comportarea intensității fâșiilor de iradiere este diferită și anume intensitatea fîșiei A cu temperatura în diapazonul menționat se schimbă neesențial, iar intensitatea fîșiei B cu majorarea temperaturii crește. O așa comportare a fâșiilor de iradiere cu temperatura ne permite să conchidem că fâșiile de iradiere sunt excitonice și sunt localizate cu unul și același centru.

Valoarea relativ mare a distanței energetice a fîșiei A față de panta fundamentală de absorbție ne permite să identificăm această linie ca un exciton localizat pe un acceptor neutru cu energia de ionizare $\sim 70meV$. Un așa acceptor este înregistrat și pentru $Hg_{1-x}Cd_xTe$. Acest rezultat vorbește în favoarea unei analogii structurale între $Hg_{1-x}Cd_xTe$ și $Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$ în lipsa cîmpului magnetic exterior.

În confirmarea acestei concepții s-au înregistrat și modificările spectrelor de iradiere sub influența nivelului energetic de excitare. Nivelul energetic de excitare în acest experiment este determinat de curentul de excitare a laserului utilizat în experiment.

În figura 3 sunt prezentate spectrele de iradiere înregistrate pentru pelicula 5 ($Hg_{085}Cd_{003}Mn_{012}Te$, $E_g(2K) = (215 \pm 0,2)meV$ și concentrația electronilor $1,09 \cdot 10^{15} cm^{-3}$, nivelul de compensare 0,9) la temperatura $2K$ în lipsa cîmpului magnetic exterior pentru diferite nivele de excitare. Pentru un nivel de excitare minor $I_{las} = 3A$, după cum este prezentat în această figură, spectrul de iradiere este alcătuit din două fâșii: fâșia A din partea energiilor fotonilor iradiați mici cu semilățimea $\sim (1 \pm 0,2)meV$ fâșia B din partea energiilor fotonilor iradiați mari cu semilățimea $(3 \pm 0,2)meV$.

Cu majorarea nivelului energetic de excitare, după cum rezultă din experimentele prezentate în această figură, intensitatea fâșiilor de iradiere crește, iar fâșia de iradiere B suplimentar se dispică în două linii cu o deplasare energetică între cele de ordinul $(0,5 \div 0,8)meV$. Vom analiza dinamica acestor procese, utilizînd concepția descrisă în lucrarea [5].

Din analiza dinamicii proceselor de recombinare a excitonilor localizați pe acceptori neutri rezultă o confirmare a acestei dependențe și anume:

Pentru aliajele de tipul $n - Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$ variația concentrației purtătorilor de sarcină de neechilibru pentru condițiile

$$\Delta n, \Delta p \gg n_0 \text{ excitat puternic}$$

$$\Delta n, \Delta p < n_0 \text{ excitat slab}$$

este descrisă de următoarele ecuații diferențiale:

$$\frac{d(\Delta p)}{dt} = I - A\Delta n \cdot \Delta p \quad (1)$$

$$\frac{d(\Delta p)}{dt} = I - \frac{\Delta p}{\tau} \quad (2)$$

Variația concentrației acceptorilor neutri este descrisă de următoarea ecuație diferențială:

$$\frac{dN_A^0}{dt} = B\Delta p(N_A - N_A^0) - C(\Delta n + n_0)N_A^0 \quad (3)$$

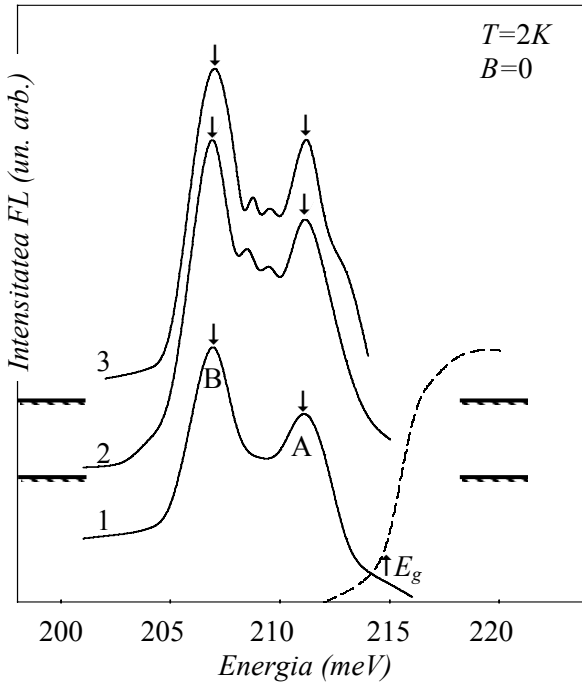


Figura 3. Modificarea spectrului de iradiere sub influența nivelului energetic de excitație. Spectrele de iradiere pentru $n-Hg_{0.85}Cd_{0.03}Mn_{0.12}Te$ înregistrate la $T=2K$; $B=0$

1. $I_{las} = 3,2 A$; 2. $I_{las} = 6,3 A$; 3. $I_{las} = 10 A$

Dinamica concentrației excitonilor localizați este descrisă:

$$\frac{dn_{exc}}{dt} = D\Delta p(\Delta n + n_0)N_A^0 - \frac{n_{exc}}{\tau_{exc}} \quad (4)$$

Ecuția neutralității în acest caz are forma

$$\Delta p + N_A^0 = \Delta n; \quad \Delta n \neq \Delta p,$$

unde n_0, p_0 - concentrația purtătorilor de sarcină de echilibru; N_A^0 - concentrația integrală a acceptorilor; τ, τ_{exc} - timpul de viață a electronilor și excitonilor localizați; A, B, C, D - coeficienți ce exprimă vitezele de recombinare a tranzițiilor optice respective.

Soluționarea nemijlocită a ecuațiilor diferențiale (1-4) este problemă dificilă din punct de vedere matematic. Vom prezenta o analiză a cazurilor de aplicare a acestor ecuații pentru unele procese simple de recombinare și anume:

1.1. Condiția unui nivel minor de excitație

Pentru materialele studiate în această lucrare $n-Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$ condiția nominalizată

$\Delta n \ll n_0$, ceea ce înseamnă că pentru acest nivel de excitație concentrația electronilor în banda energetică de conducție practic nu se schimbă. Intensitatea de iradiere determinată de excitoni localizați pe acceptori neutri în regim staționar se determină de relația

$$I_{exc} = \frac{n_{exc}}{\tau_{exc}} = D\Delta p n_0 N_A^0; \quad \Delta n \ll n_0$$

și acest termen poate fi neglijat.

Dat fiind faptul că și Δp este mic concentrația acceptorilor ce au capturat un gol N_A^0 la fel va fi mică. Din ecuația (2) rezultă că în regim staționar $\Delta p \sim I$. Dependența N_A^0 de nivelul de excitație în regim staționar pentru nivel minor de excitație la fel liniar va depinde de I . În așa fel în concluzie, obținem

$$I_{exc} \sim I^2,$$

Adică intensitatea de iradiere determinată de excitonii localizați va crește proporțional cu pătratul intensității excitantului.

1.2. Nivel major de excitație

Acest nivel de excitație se exprimă $\Delta n \gg n_0$. În așa fel pentru un nivel major de excitație este comod de analizat două cazuri limită pentru concentrațiile acceptorilor.

1.2.1. Concentrația relativ mică a acceptorilor

În cadrul acestei aproximații putem admite $N_A^0 \rightarrow const$ și $\Delta n \cong \Delta p$ din ecuația diferențială analizată (1) rezultă $\Delta p \sim \sqrt{I}$. Din ecuația diferențială (3) conchidem

$$N_A^0 \cong N_A \frac{B}{B+C}$$

În concluzie avem că N_A^0 nu depinde de intensitatea excitantului și intensitatea de iradiere determinată de excitonii localizați

$$I_{exc} = D\Delta p \Delta n N_A^0 \sim I N_A^0$$

Acest rezultat ne confirmă că pentru un nivel major de excitație și concentrația mică a acceptorilor intensitatea de iradiere determinată de excitonii localizați liniar va trebui liniar să depindă de nivelul de excitație.

1.2.2. Concentrația majoră a acceptorilor

Pentru acest caz $\Delta n = N_A^0$ și din ecuația diferențială (1) obținem:

$$\Delta p = \frac{I}{AN_A}$$

și ecuația diferențială (3) va determina pentru acest caz două soluții aproximative

$$N_A^0 = \left(\frac{B}{AC} IN_A \right)^{2/3} \quad \text{pentru } \frac{B}{AC} I \ll N_A^0$$

$$N_A^0 = \left(\frac{B}{AC} I \right)^{1/2} \quad \text{pentru } \frac{B}{AC} \cong N_A^0.$$

Ca rezultat, intensitatea de iradiere determinată de excitonii localizați va fi de forma

$$I_{exc} = D\Delta p \Delta n N_A^0 = \frac{DI}{A} \left(\frac{B}{AC} IN_A \right)^{1/3} \sim I^{4/3} N_A^{1/3}$$

sau

$$I_{exc} \sim \frac{D}{A} I^{1,33}$$

Cele analizate mai sus ne permit să conchidem: pentru nivel major de excitație și o concentrație relativ mare a acceptorilor intensitatea de iradiere determinată de excitonii localizați pe acceptorii neștri are forma:

$$I_{exc} \sim I^\alpha, \quad (\alpha = 1,33 \div 1,5).$$

Datele experimentale prezentate în figura 4 confirmă $\alpha = 1,5$.

Analiza dinamicii proceselor de recombinare a excitonilor localizați pe acceptori neutri în materialele $Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$ discutată mai sus, confirmă o dependență superliniară a intensității de iradiere de nivelul energetic al excitantului și unei concentrații relativ mari a acceptorilor. Dependențe de forma celor prezentate în figura 1 s-au înregistrat pentru toate peliculele studiate, ce exprimă aceeași natură fizică a proceselor de recombinare.

Rezultate analogice sunt cunoscute pentru $Hg_{1-x}Cd_xTe$ [6]. Cele discutate confirmă că materialele semimagnetice $Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$ în lipsa câmpului magnetic exterior au aceeași structură de benzi energetice ca și materialele

nemagnetice $Hg_{1-x}Cd_xTe$ cu aceeași parametri energetici [7].

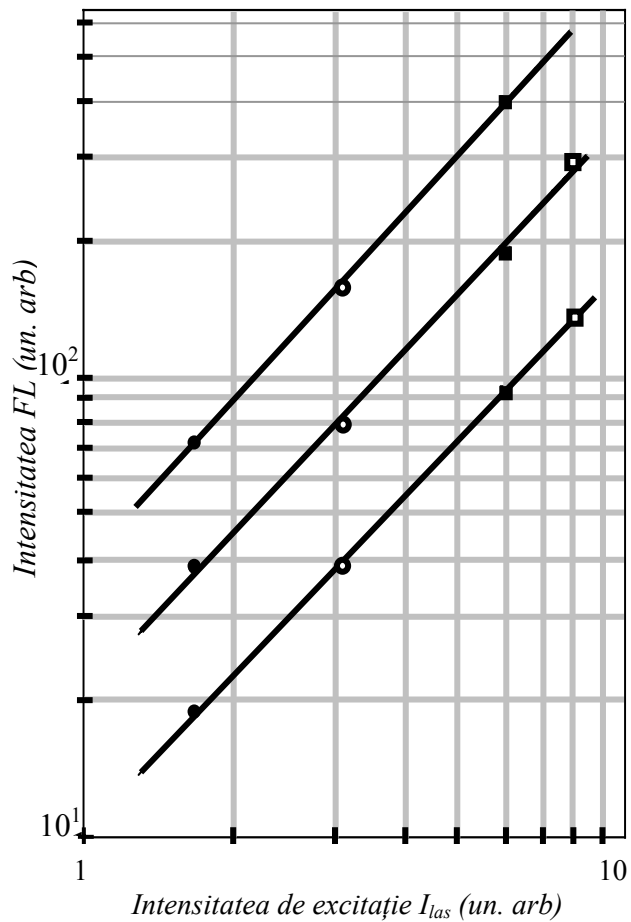


Figura 4. Dependența intensității de iradiere de nivelul energetic de excitație pentru $n - Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$. Spectrele de iradiere înregistrate la 2K, $B=0$.

- - $I_{las} = 3,2A$; ○ - $I_{las} = 6,3A$; ■ - $I_{las} = 10A$; □ - $I_{las} = 14A$
- 1. $Hg_{0,85}Cd_{0,03}Mn_{0,12}Te$; 2. $Hg_{0,82}Cd_{0,10}Mn_{0,08}Te$; 3. $Hg_{0,81}Cd_{0,05}Mn_{0,14}Te$

CONCLUZII

1. S-au analizat modificările spectrelor de iradiere ale semiconductoarelor semimagnetice $n - Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$ în raport de componența alaiului, temperatură și nivelul energetic de excitație înregistrate la temperaturile (2–12)K în lipsa câmpului magnetic exterior.

2. Particularitățile spectrelor de iradiere s-au identificat ca excitoni localizați pe un acceptor neutru. S-a determinat energia de activitate a

centrului de localizare a excitonului egală cu $(70 \pm 0,2)meV$.

3. Rezultatele experimentale analizate confirmă că în lipsa câmpului magnetic exterior la temperaturi joase spectrul energetic al purtătorilor de sarcină în semiconductoarele semimagnetice $n-Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$ are aceeași structură ca și spectrul energetic al purtătorilor de sarcină în materialele nemagnetice de forma $Hg_{1-x}Cd_xTe$.

4. Stabilitatea caracteristicilor fizice ale semiconductoarelor semimagnetice $n-Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$ în raport cu $Hg_{1-x}Cd_xTe$ înregistrată în această lucrare confirmă posibilitatea utilizării acestor materiale pentru confecționarea receptoarelor de radiație infraroșie pentru diapazonul spectral al „ferestrelor” optice ale atmosferei cu un randament performant la temperaturi mai ridicate decât temperatura azotului lichid.

Moldavian Journal of the Physical Sciences, Chișinău, 2008, V. 7, Nr. 4, p. 449-455.

Bibliografie

1. **Becla P., Wolff P., Aggarwal R., etc.** // *J. Vac. Science Technol.*, A3(1), 1985, s. 116-118.
2. **Movilă V.** Epitaxia din faza lichidă a compușilor semimagnetici cuaternari $Hg_{1-x}Cd_xTe$ » $Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$: Proprietăți structurale, fotoelectrice, magnetooptice. Teza de doctor în științe fizico-matematice. Chișinău, 1999, s. 105.
3. **Mironov K., Untila P., Zelenova O.** // VII Vsesoyuzhnyj simpozium „Poluprovodniki s uzkoj zapreshhennoj zonoj”. L'vov, 1986, s. 148.
4. **Fok M.** Razdelenie slojnyh spektrov na individual'nye polosy pri pomoshhi obobshhennogo metoda Alentzeva. Trudy Ordena Lenina Fizicheskogo Instituta im. P. Lebedeva. 1972, Tom 59, s. 3-24.
5. **Uhanov I.** Opticheskie svojstva poluprovodnikov. Hayka, s. 316.
6. **Jiuldashev Sh.** Fotoluministzentnye i fotoelectriceskie svojstva. Teza de doctor în științe, Leningrad, 1982, p. 98.
7. **Ivanov-Omskij V., Kurbanov K., Mal'tzeva V., Smirnov V., Juldashev Sh.** // ΦTII , 1983, 17, s. 27.
8. **Gheorghitza E., Gutzuleac L., Postolachi I., Untila P.** Specific features of optic qualities of $Hg_{1-x}Mn_xTe$ and $Hg_{1-x-y}Cd_xMn_yTe$ semimagnetic materials with narrow gap compared with $Hg_{1-x}Cd_xTe$ nonmagnetic semiconductor.

Recomandat spre publicare: 08.02.2011.