

# PROPRIETĂȚILE OPTICE ȘI CALITATEA STRUCTURILOR CU GROPI CUANTICE $In_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs$

A. Dorogan, magistru, ing.  
Universitatea Tehnică a Moldovei

## INTRODUCERE

Cercetările heterostructurilor pe bază de semiconductori sunt importante din punct de vedere al depistării proprietăților fundamentale ale stărilor excitate în gropile cuantice (QW) și în punctele cuantice (QD), atât și pentru elaborarea dispozitivelor micro-optoelectronice moderne [1–3]. Unul din avantajele utilizării structurilor cu puncte cuantice este posibilitatea lărgirii diapazonului optic al radiației în comparație cu structurile pe bază cu gropi cuantice. Structurile cu puncte cuantice  $In(Ga)As/(Al)GaAs$  permit obținerea unei emisii în diapazonul  $1 - 1,6\mu m$ . În lucrare sunt cercetate spectrele de reflexie, transparență și luminescență ale heterostructurilor  $In_{0,3}Ga_{0,7}As$  cu puncte și gropi cuantice cu scopul determinării parametrilor optici și a calității structurilor.

## 1. SPECTRELE OPTICE DE POLARIZARE ALE HETEROSTRUCTURILOR $In_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs$

Tranzițiile dintre diferite benzi de cuantificare din banda de valență  $V$  în banda de conducție  $C$ , cauzate de radiația  $\hbar\omega > Eg$ , pot crea succesiv o familie întreagă de tranziții electronice în gropile cuantice și, respectiv, benzile de reflexie, absorbție și luminescență [4–6]. Spectrele de reflexie  $R(\omega) = |r(\omega)|^2$  și transparență  $T(\omega) = |t(\omega)|^2$ , pe lângă analiza fotoluminescenței, sunt una din cele mai simple posibilități de cercetare a gropilor cuantice în heterostructuri. Pentru determinarea absorbției structurilor cu gropi cuantice este necesar de efectuat măsurări pentru coeficientul de reflexie  $R$  și transparență  $T$ , cu scopul determinării precise a valorii  $A(\omega)$ .

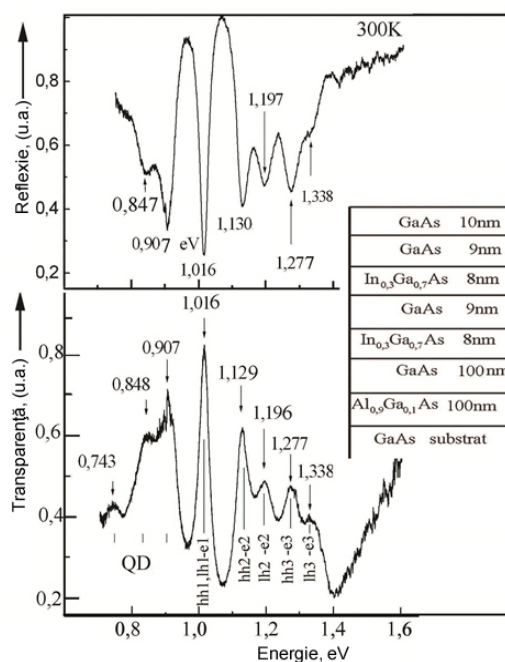
$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - R(T) \quad (1)$$

Imperfecțiunea heterostructurii influențează spectrele de reflexie și absorbție, cauzând lărgirea neomogenă a frecvenței de rezonanță a excitonului. Acesta poate duce la o dependență de coordonată pentru  $\omega_0$  în planul gropii cuantice sau în volumul

rețelei, ceea ce poate cauza lărgirea benzilor de absorbție și reflexie.

Din punct de vedere experimental, benzile de absorbție și reflexie înguste demonstrează calitatea structurii cu gropi cuantice.

În figura 1 este prezentată structura constituită din două straturi de  $In_{0,3}Ga_{0,7}As$  cu grosimea  $8nm$  cu gropile cuantice divizate de către straturile de barieră  $GaAs$ , cu grosimea  $9nm$ . Spectrele de reflexie prezentate în figura 1 au fost măsurate la un unghi al radiației incidente de  $7^\circ$ , iar spectrele de transparență la o incidență normală a radiației pe suprafața heterostructurii  $In_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs$  cu gropi cuantice.

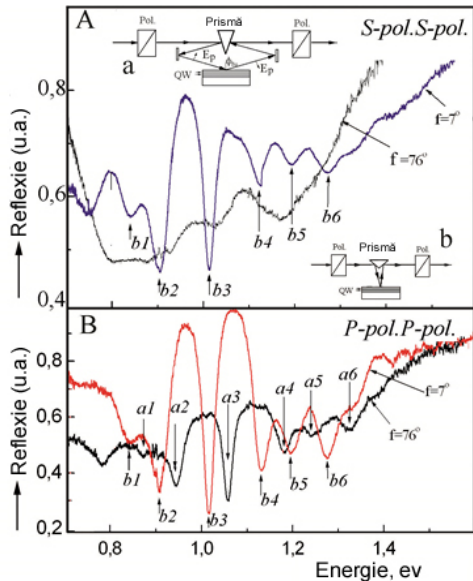


**Figura 1.** Spectrele de reflexie și absorbție ale heterostructurilor  $In_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs$  (în fragment este prezentată structura constituită din două straturi  $In_{0,3}Ga_{0,7}As$  cu grosimea de  $8nm$ , cu gropile cuantice divizate prin straturile de barieră  $GaAs$  cu grosimea  $9nm$ ).

Deoarece, măsurările au fost efectuate cu ajutorul unui spectrometru de rezoluție înaltă, și maximele de absorbție și minimele de reflexie posedă valoarea FWHM (Full Width Half Maximum) egală cu  $2 - 3meV$ , se poate afirma cu certitudine, că energia minimelor spectrelor de reflexie coincide, practic, total cu poziția energetică

a maximelor în spectrele de absorbție.

În figura 2 sunt prezentate spectrele de reflexie de la suprafața structurii  $In_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs$  cu gropi cuantice, la temperatura  $300K$  și unghiul de incidență a luminii de  $7^\circ$  și  $76^\circ$  (unghiul Brewster), pentru polarizarea  $S-S$  (A) și  $P-P$  (B) a undelor luminoase. Traectoria razelor la măsurare este prezentată în insertiile  $a$  și  $b$ . Maximele de reflexie  $b1-b6$  sunt prezente la polarizarea  $S-S$  și unghiul de incidență  $7^\circ$ , ai căror semilărgime (FWHM) se mărește în cazul unghiului de incidență Brewster.



**Figura 2.** Spectrele de reflexie ale structurii  $In_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs$  cu gropi cuantice la temperatura  $300K$  și unghiul de incidență a radiației  $7^\circ$  și  $76^\circ$  (unghiul Brewster), pentru polarizarea  $S-S$  (A) și  $P-P$  (B) a undelor luminoase. Traectoria razelor la măsurare este prezentată în insertiile  $a$  și  $b$ .

În spectrele de reflexie sunt depistate aceleași minime  $b1-b6$  la polarizarea  $P-P$  pentru unghiul de incidență  $7^\circ$ . Minimele în spectrele de reflexie sunt depistate la energiile  $a1-a6$ , adică sunt deplasate, în cazul unghiului de incidență egal cu  $76^\circ$  (unghiul Brewster). Valoarea deplasării este, practic, aceeași pentru toate minimele de reflexie. Amplitudinea variației spectrelor de reflexie este, de asemenea, micșorată de două ori pentru această polarizare. Geometria reflexiei este prezentată în figura 2,  $b$ . Aici, unda planară monocromatică este egală cu:  $E(z,t) = E_0 \exp(-i\omega t + ikr)$  și este incidentă la groapa cuantică  $In_{0,3}Ga_{0,7}As$ , plasată între două bariere  $GaAs$  de același fel, care sunt caracterizate de conductibilitatea dielectrică a materialului  $\epsilon_b$ . Vectorul de undă al luminii, legat de frecvența  $\omega$  prin relația  $k = (\omega/c)\sqrt{\epsilon_b}$  (unde  $c$  este viteza luminii în vid), este, de asemenea, real. Amplitudinea undei luminoase  $E_0$  se află în planul interfeței ( $x, y$ ), în

cazul unei incidențe normale a luminii, atunci când vectorul de undă este paralel cu axa principală  $Z$  a structurii. Deoarece, sistemul posedă simetrie axială în referință cu axa  $Z$ , vectorii electrici ai undelor luminoase incidente, reflectate și refractate sunt paraleli și, în locul valorilor vectoriale, pot fi folosite valorile scalare ale amplitudinii  $E_0$ ,  $E_r$  și  $E_t$ . Coeficienții de reflexie și transparență a luminii sunt egali, respectiv:

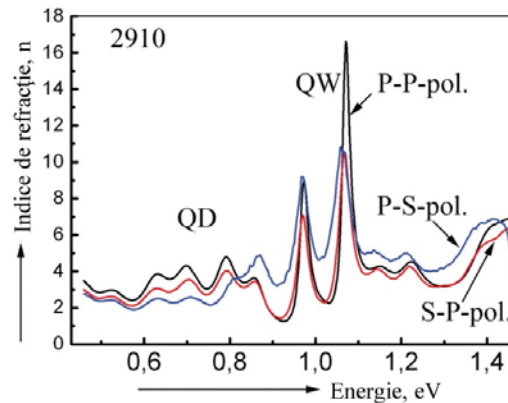
$$r = E_r/E_0, \quad t = E_t/E_0 \quad (2)$$

În cazul lipsei disipării energiei în interiorul gropii cuantice, legea conservării energiei impune acestor coeficienți unele limite:

$$|r|^2 + |t|^2 = 1. \quad (3)$$

Valoarea energiei absorbite în structura cu gropi cuantice este  $1 - |r|^2 + |t|^2$ .

Caracteristicile optice ale gropii cuantice și barierei (indicele de refracție și extincție, partea reală și imaginară a constantei dielectrice), pentru structura studiată, este calculată din coeficientul de reflexie cu utilizarea relațiilor Kramers-Kronig. Dependența spectrală a indicelui de refracție pentru diferite polarizări ale undei luminoase este prezentată în figura 3.

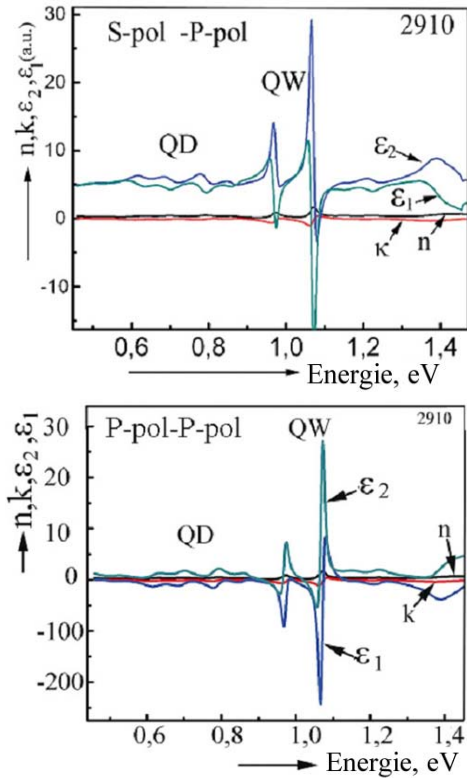


**Figura 3.** Dependența spectrală a indicelui de refracție pentru diferite polarizări ale undei luminoase calculate din spectrele de reflexie, utilizând relațiile Kramers-Kronig.

Este evident din rezultatele obținute, că cea mai mare valoare reală a indicelui de refracție este observată la polarizarea  $P-P$ , la valoarea energiei de rezonanță  $1,085eV$ .

În figura 4 sunt prezentate dependențele spectrale ale indicelui de refracție  $n$ , coeficientului de extincție  $k$ , valorilor părții reale  $\epsilon_1$  și imaginare  $\epsilon_2$  ale constantei dielectrice pentru polarizarea undelor luminoase  $S-P$  și  $P-P$ , calculate din spectrele de reflexie utilizând relațiile Kramers-Kronig. În cazul

polarizării  $P-P$  a undelor luminoase,  $\varepsilon_2$  ajunge la valoarea  $\approx 270$  pentru energia  $1,085eV$ . Aceasta demonstrează, că cea mai intensă absorbție este depistată pentru valorile de rezonanță ale tranzițiilor cu participarea golorilor grele.



**Figura 4.** Dependența spectrală a indicelui de refracție  $n$ , coeficientului de extincție  $k$ , părții reale  $\varepsilon_1$  și imaginare  $\varepsilon_2$  ale constantei dielectrice pentru polarizarea  $S-P$  și  $P-P$  a undelor luminoase, calculate din spectrele de reflexie utilizând relațiile Kramers-Kronig.

## 2. SPECTRELE OPTICE ALE STRUCTURILOR MULTISTRATIFICATE CU GROPI CUANTICE $In_{0,67}Al_{0,22}Ga_{0,11}As$ , $In_{0,68}Al_{0,12}Ga_{0,11}As$ și $In_{0,68}Al_{0,1}Ga_{0,13}As$ SI ANALIZA CALITATII SI PROPRIETATILOR

În figura 5 este prezentată structura multistrat a heterostructurii cu 5 gropi cuantice  $In_{0,67}Al_{0,22}Ga_{0,11}As$ , cu grosimea  $6,5nm$  divizată de straturi de barieră. Structura a fost formată pe o plachetă de  $InP$ . Spectrele de reflexie sunt prezentate în partea dreaptă a figurii. În spectrele de reflexie sunt depistate maxime la energiile  $0,9526eV$  și  $0,9592eV$ , care sunt condiționate de către tranzițiile electronice  $hh1-e1$  și  $lh1-e1$ . Intensitatea maximelor de reflexie variază în

limitele  $0,5\%$ . Este necesar de accentuat, că în spectrele de reflexie sunt depistate maxime care corespund tranzițiilor electronice. În structurile heterojuncțiilor  $In_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs$  cu gropi cuantice sunt depistate minime destul de accentuate în spectrele de reflexie, care caracterizează tranzițiile electronice dintre nivelele cuantice. Coeficientul de reflexie este:

$$R(\omega) = R_0 + (A + B_x)/(1 - x^2), \quad (4)$$

unde:

$$x = (\omega - \omega_0)/\Gamma, \quad R_0 = r_{01}^2, \quad (5)$$

$$A = t_{01}t_{10}S[t_{01}t_{10}S - 2r_{01}(1 + S)\cos 2\varphi], \quad (6)$$

$$B = 2r_{01}t_{01}t_{10}S\sin 2\varphi, \quad (7)$$

$$S = \Gamma_0/\Gamma, \quad S = \Gamma_0.$$

Conform formulelor lui Fresnel, în cazul incidenței normale a luminii pe suprafața cristalului:

$$r_{10} = -r_{01} = (n_b - 1)/n_b + 1, \quad (8)$$

$$t_{01}t_{10} = 4n_b/(n_b + 1)^2.$$

În dependență de distanța dintre centrul gropii cuantice și suprafața exterioară, coeficienții  $A$  și  $B$  pot primi valori de semn diferit și, în particular, să se transforme succesiv în valoarea zero. În cazul când  $A=0, B<0$  conturul de rezonanță este constituit din maximul pentru  $\omega < \omega'_0$  și minimul pentru  $\omega > \omega'_0$ . Pentru  $B=0$ , se schimbă doar un singur maxim ( $A>0$ ) sau un singur minim ( $A<0$ ) din spectru [4–6]. În heterojuncțiile  $In_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs$  coeficientul  $A$  este  $A<0$  și sunt depistate minime în spectrele de reflexie, care corespund tranzițiilor electronice. În structurile heterojuncțiilor  $In_{0,67}Al_{0,22}Ga_{0,11}As$  cu gropi cuantice coeficientul  $A>0$  și tranzițiilor electronice le corespund maximele spectrelor de reflexie. Este necesar de menționat, că pentru straturile  $In_{0,67}Al_{0,22}Ga_{0,11}As$ , maximele posedă intensitate mică ( $0,5\%$ ), pe timp ce în structurile  $In_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs$  maximele posedă amplitudine  $\approx 60\%$ . În spectrele de reflexie ale heterostructurilor  $In_{0,67}Al_{0,22}Ga_{0,11}As$  sunt, de asemenea, depistate maxime la energiile  $1,0206eV$  și  $1,0382eV$ , care sunt condiționate de către tranzițiile dintre nivelele cuantice  $hh2-e2$  și  $lh2-e2$ . Tranzițiile  $hh3-e3$  sunt depistate în regiunile energiilor mai mari la valoarea  $1,1297eV$  și tranzițiile  $lh3-e3$  la energia  $1,1532eV$ .

Utilizând relațiile Kramers-Kronig au fost calculate funcțiile optice din spectrele de reflexie ale nanostraturilor heterojuncțiunii  $In_{0,67}Al_{0,22}Ga_{0,11}As$  (figura 6).

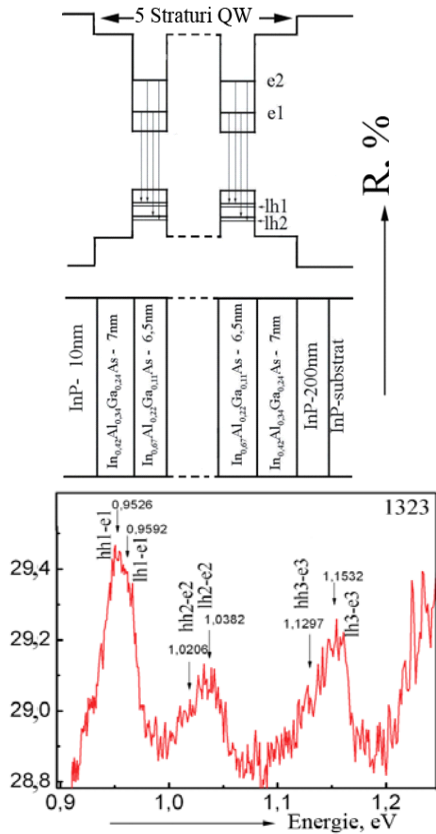


Figura 5. Structura heterojuncțiunii multistrat  $In_{0,67}Al_{0,22}Ga_{0,11}As$  și spectrele de reflexie în regiunea tranzițiilor electronice de pe nivelele cuantice.

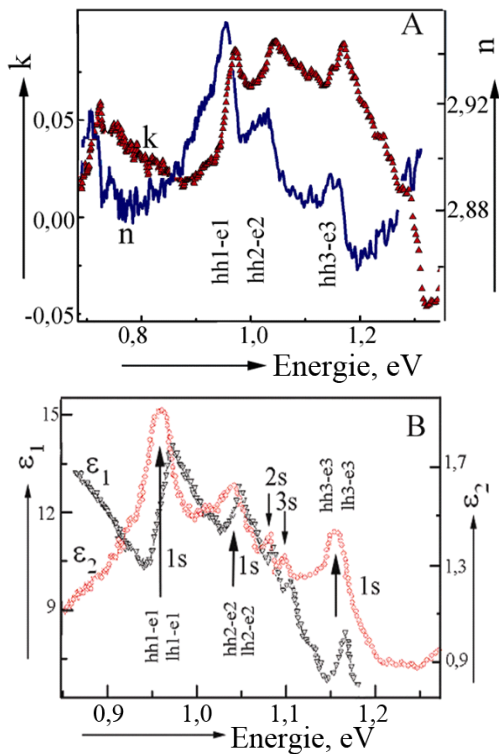


Figura 6. Dependența spectrală a indicelui de refracție ( $n$ ), coeficientului de extincție ( $k$ ) și dependența spectrală a părții reale  $\epsilon_1$  și imaginare  $\epsilon_2$  ale constantei dielectrice complexe.

În figura 7 sunt prezentate spectrele de reflexie  $R$  și  $dR/dE$  ale heterojuncțiilor  $In_{0,68}Al_{0,12}Ga_{0,11}As$  și  $In_{0,68}Al_{0,1}Ga_{0,13}As$  cu gropi cuantice și compoziția straturilor în tabelul 1, 2. În spectrele de reflexie sunt foarte slab accentuate structurile (maxime/minime) cauzate de către tranzițiile electronice dintre nivelele cuantice.

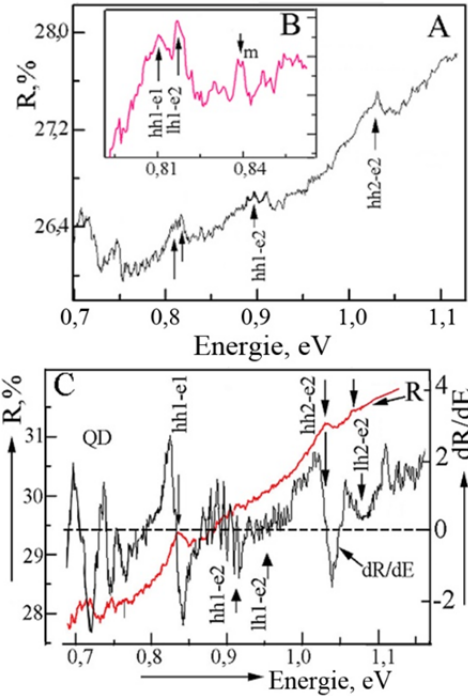


Figura 7. Spectrele de reflexie  $R$  și  $dR/dE$  ale nanostraturilor  $In_{0,68}Al_{0,12}Ga_{0,11}As$  și  $In_{0,68}Al_{0,1}Ga_{0,13}As$  cu gropi cuantice.

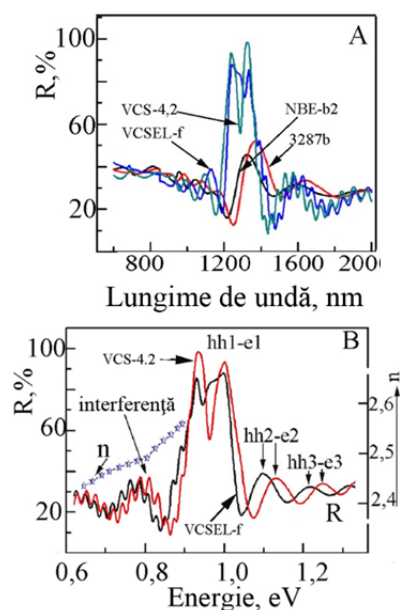
Tabelul 1. Compoziția probei măsurate Nr.3934a

Compoziție	Strat	Grosime strat, [nm]
	InP	20
$In_{0,42}Al_{0,22}Ga_{0,24}As$	InAlGaAs - Br	7
$In_{0,68}Al_{0,1}Ga_{0,13}As$	InAlGaAs-QW	6
$In_{0,42}Al_{0,22}Ga_{0,24}As$	InAlGaAs-Br	7
	InP substrat	350000

Tabelul 2. Compoziția probei măsurate Nr.3938b

Compoziție	Strat	Grosime strat, [nm]
	InP	20
$In_{0,42}Al_{0,22}Ga_{0,24}As$	InAlGaAs - Br	7
$In_{0,68}Al_{0,1}Ga_{0,13}As \times 2$	InAlGaAs-QW	7
$In_{0,42}Al_{0,22}Ga_{0,24}As \times 2$	InAlGaAs-Br	7
	InP substrat	350000

În figura 8 sunt prezentate spectrele nanostructurilor  $In_{0,67}Al_{0,22}Ga_{0,11}As$  cu gropi cuantice în regiunea IR apropiat a spectrului pentru 2 probe cu una și aceeași compoziție obținută prin diferite metode. Interferența reflexiei este depistată în aceste structuri, în regiunea transparenței (1300 – 2000nm). Luând în considerație grosimea stratului și poziția maximelor (minimelor) în spectrele de reflexie, a fost calculată dependența spectrală a indicelui de refracție al stratului cu gropi cuantice. Indicele de refracție variind în limitele 2,4 – 2,6 (figura 8).

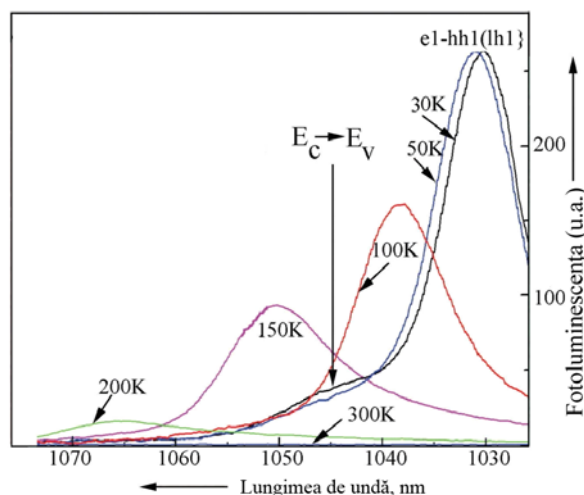


**Figura 8.** Spectrele de reflexie ale structurilor  $In_{0,67}Al_{0,22}Ga_{0,11}As$  cu gropi cuantice în regiunea IR apropiat a spectrului și calculul indicelui de refracție al stratului în gropi cuantice.

Pentru efectuarea măsurărilor luminescenței, structura  $In_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs$  a fost plasată în criostat și excitată cu un laser de tip He-Ne cu lungimea de undă de emisie 632,8nm. Luminescența practic lipsește la temperatura camerei și la un nivel relativ slab al excitării, însă este depistată la temperatura 200K și, la o scădere a temperaturii ulterioară, intensitatea luminescenței crește (figura 9). Maximul luminescenței 1,163eV (200K) se deplasează spre energia 1,2032eV (30K) la scăderea temperaturii, și posedă FWHM egal cu 10meV, fiind condiționat de către tranzițiile  $e1-hh1$  ( $e1-lh1$ ) din gropile cuantice ale stratului A și B ale structurii  $In_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs$ .

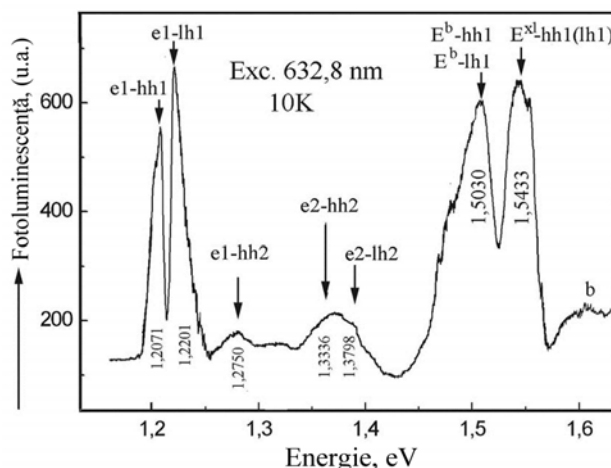
În regiunea energiilor mari a structurii  $In_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs$  este depistată o bandă de luminescență la valoarea 1,342eV (300K) care, odată cu scăderea temperaturii, se deplasează spre regiunea energiilor mari. Un maxim îngust cu valoarea 1,413eV este depistat la temperatura 30K,

fiind condiționat de recombinarea iradiantă a electronilor barierei cu goluri grele  $E^b-hh1$  și, de asemenea, maximul  $E^{xl}$  la energia 1,5433eV. Maximul  $E^{xl}$  este poziționat energetic în regiunea continuului barierei gropii cuantice și, posibil, este condiționat de către defecte sau punctele cuantice la hotarul stratului  $GaAs/Al_{0,9}Ga_{0,1}As$ .



**Figura 9.** Spectrele de luminescență ale structurii  $In_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs$  cu gropi cuantice, la temperaturile (30 – 200K) în cazul excitării cu un laser de tip He-Ne cu lungimea de undă a radiației emise 632,8nm.

Diferiți factori influențează valorile fotoluminescenței pentru  $QW_A$  și  $QW_B$ , care au sau nu au legătură cu procesul luminescenței: diferite condiții de reflexie a luminii pe diferite secțiuni ale suprafeței probei, fluctuațiile spațiale ale nivelului recombinării neiradiante pe suprafață și în volumul structurii.



**Figura 10.** Spectrul de luminescență al structurii  $In_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs$  cu gropi cuantice la temperatura 10K și excitarea cu un laser de tip He-Ne cu lungimea de undă a radiației emise 632,8nm.

Maximele luminescenței la valorile  $1,2071eV$  și  $1,2201eV$  (figura 10) sunt depistate la temperatura  $10K$ , în regiunea lungimilor de undă lungi, fiind condiționate de recombinarea excitonilor în gropile cuantice de pe stările  $e1-hh1$  și  $e1-lh1$ . Valoarea despicării zonelor golurilor ușoare ( $lh1$ ) și grele ( $hh1$ ) în groapa cuantică este  $13,0meV$ , iar valoarea FWHM este egală cu  $5meV$ .

6. **Mark Fox**, “*Optical Properties of Solids. Second Edition*”. Oxford University Press, (2001), 396 pages.

## CONCLUZII

Cercetarea spectrelor de reflexie la polarizările  $S$  și  $P$ , pentru energia fotonilor în domeniul  $0,5-0,6eV$ , în cazul unghiului de incidență apropiat de normală ( $7^\circ$ ) și a unghiului Brewster ( $76^\circ$ ), pentru straturile de  $In_{0,3}Ga_{0,7}As$  cu grosimea  $8nm$ , având gropi cuantice limitate de către stratul de barieră  $GaAs$  a oferă posibilitatea depistării particularităților de reflexie condiționate de către gropile cuantice (QW) și punctele cuantice (QD) formate la hotarul nanostraturilor și buffer-ului.

Studiul spectrelor de luminescență permite estimarea și depistarea maximelor cauzate de tranzițiile  $hh1-e1$ , fiind cele mai accentuate în structurile VCSEL-f și VCS-4.2 în regiunea IR apropiat a spectrului pentru structurile  $In_{0,67}Al_{0,22}Ga_{0,11}As$  cu gropi cuantice. Valoarea coeficientului de reflexie variază în limitele  $80\%$ , adică de la  $20\%$  până la  $100\%$ . Coeficientul de reflexie al straturilor NBE-b2 și 3287b variază într-un interval mai mic de valori ( $10-50\%$ ). Aceasta permite evaluarea calității heterostructurilor și demonstrează faptul, că structurile VCSEL-f și VCS-4.2 sunt mult mai calitative.

## Bibliografie

1. **N.N. Ledentsov**. *Prog. Cryst.al Growth and Charact.*, 35, 289 (1997).
2. **L. Goldstein, F. Glas, J.Y. Marzin, M.N.Charasse, and G. Le Roux**. *Appl. Phys. Lett.*, 47, 1099, (1985).
3. **P.M. Petro, S. P. DenBaars**. *Superlat. Microstruct.*, 15,15 (1994).
4. **E.L. Ivchenko**. “*Optical spectroscopy of semiconductor nanostructures*”. Alpha Science International, Harrow, UK, (2005).
5. **Л. Е. Вробьев, Е. Л. Ивченко, Д. А. Фирсов, В. А. Шальгин**. „*Оптические свойства наноструктур*”. Под редакцией В. И. Ильина и А. Я. Шика, Изд. «Наука» Санкт-Петербург, (2001).

Recomandat pentru publicare: 19.03.2018.