

ДОДАТОК Б

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет
радіоелектроніки

Розповсюдження і поглинання оптичного випромінювання у багатошарових надгратках

Виконав:
ЕПСзм-19-1
Орлов В.М.

Керівник:
доц. каф. МЕЕП
Пащенко О.Г.

Харків 2020

1

МЕТА: Дослідження енергетичного спектру частинок і квазічастинок у багатошаровій КРС, яка знаходиться під впливом зовнішнього, сталого у часі просторово симетричного електричного поля;

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ:

Активна область наноструктурного напівпровідникового оптоелектронного приладу у вигляді п'ятишарової КРС на основі гетероструктури: $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$

МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ:

Квантово-механічне моделювання руху носіїв у багатошарових КРС

2

Розроб.	Орлов В.М.			РОЗПОВСЮДЖЕННЯ І ПОГЛИНАННЯ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У БАГАТОШАРОВИХ НАДГРАТКАХ	
Перев.	Пащенко О.Г.				
Н. контр.	Шевченко Н. Є.				
				ЕППзм – 19 – 1	Аркуш 1
Затв.	Бондаренко І. М.			ХНУРЕ, каф.МЕЕПП	Аркушів 10

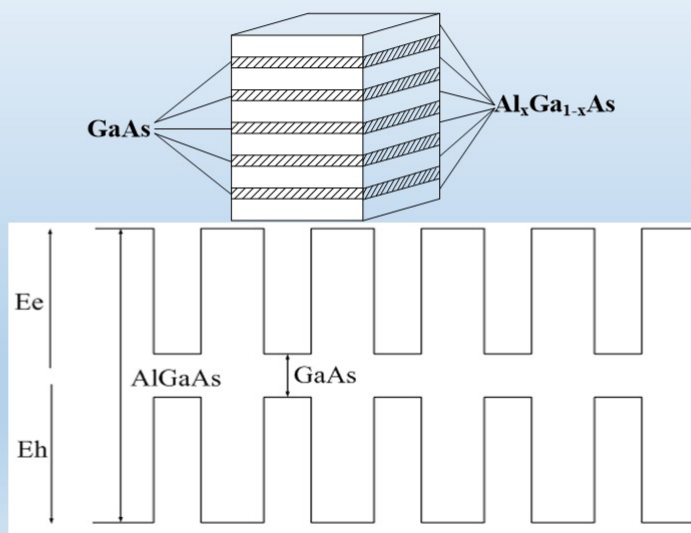
Актуальність роботи

- Висвітлення процесу формування енергетичних мінізон у багатошарових КРС. Розгляд механізму утворення вироджених і невироджених енергетичних станів частинок і квазічастинок;
- Дослідження впливу зовнішнього сталого у часі електричного поля на коефіцієнт оптичного підсилення у багатошаровій КРС. Також прояви квантово-обмеженого ефекту Штарка з огляду на наявність вироджених станів.

3

Загальний вигляд та енергетична діаграма двошарової квантово-розмірної структури на основі

$GaAs/Al_xGa_{1-x}As$



4

Розроб.	Орлов В.М.			РОЗПОВСЮДЖЕННЯ І ПОГЛИНАННЯ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У БАГАТОШАРОВИХ НАДГРАТКАХ	
Перев.	Пащенко О.Г.				
Н. контр.	Шевченко Н. Є.				
				ЕППЗм – 19 – 1	Аркуш 2
Затв.	Бондаренко І. М.			ХНУРЕ, каф.МЕЕПП	Аркушів 10

Правило Міллера для визначення висоти потенційного бар'єру для електронів у зоні провідності і для легких і важких дірок у валентній зоні

$$\Delta E_C : \Delta E_V = V_e : V_h = 0,65 : 0,35 \cdot \Delta E_g$$

Стаціонарне рівняння Шредінгера:

$$\hat{H} \Psi = E \Psi, \quad (1)$$

де \hat{H} - оператор Гамільтона;

E – власні значення енергії частинок і квазічастинок;

Ψ - хвильова функція.

5

Рівняння Шредінгера для багаточарові КРС:

В одновимірному випадку рівняння (1) запишеться у вигляді:

$$-\frac{\hbar^2}{2 \cdot m_1^*} \cdot \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + U(z) \cdot \Psi = E \cdot \Psi \quad (2)$$

- для областей обмежувальних та розділювальних бар'єрів;

$$-\frac{\hbar^2}{2 \cdot m_2^*} \cdot \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = E \cdot \Psi \quad (3)$$

- для областей квантово-обмежених шарів (квантових ям).

6

Розроб.	Орлов В.М.			<i>РОЗПОВСЮДЖЕННЯ І ПОГЛИНАННЯ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У БАГАТОШАРОВИХ НАДГРАТКАХ</i>	
Перев.	Пащенко О.Г.				
Н. контр.	Шевченко Н. Є.				
				ЕППЗм – 19 – 1	Аркуш 3
Затв.	Бондаренко І. М.			ХНУРЕ, каф.МЕЕПП	Аркушів 10

Система рівнянь для хвильових функцій частинок і квазічастинок у багатопарній наноструктурі

Хвильові функції носіїв з урахуванням парності станів

$$\frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial z^2} + k_2^2 \cdot \Psi_1 = 0$$

$$\Psi_1 = A_1 \cdot \exp(k_2 \cdot (z + (2 \cdot a + b)))$$

$$\frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial z^2} + \chi_1^2 \cdot \Psi_2 = 0$$

$$\Psi_2 = A_2 \cdot \text{ch}(k_1 \cdot (z + b)) + B_2 \cdot \text{sh}(k_1 \cdot (z + b))$$

$$\frac{\partial^2 \Psi_3}{\partial z^2} + k_2^2 \cdot \Psi_3 = 0$$

$$\Psi_3 = A_3 \cdot \cos(k_2 \cdot z) + B_3 \cdot \sin(k_2 \cdot z)$$

.....

$$\frac{\partial^2 \Psi_{11}}{\partial z^2} + k_2^2 \cdot \Psi_{11} = 0$$

$$\Psi_{11} = B_{11} \cdot \exp(-i \cdot k_2 \cdot (z - 5 \cdot a - 4 \cdot b))$$

7

Рекурентні формули для знаходження власних значень енергії частинок і квазічастинок з урахуванням парності

$$F1 = \frac{1}{N} \cdot \left(\text{arctg} \left(\frac{k_1 \cdot m_2}{m_1 \cdot k_2} \right) + (N - e_1) \cdot \text{arctg} \left(\frac{k_1 \cdot m_2}{m_1 \cdot k_2} \cdot \text{th}(k_1 \cdot b) \right) \right) + \\ + \frac{1}{N} \cdot \left((N - (N - e_1 + 1)) \cdot \text{arctg} \left(\frac{k_1 \cdot m_2}{m_1 \cdot k_2} \cdot \frac{1}{\text{th}(k_1 \cdot b)} \right) \right) + n \cdot \pi - k_2 \cdot a, \quad (4)$$

- парні рішення;

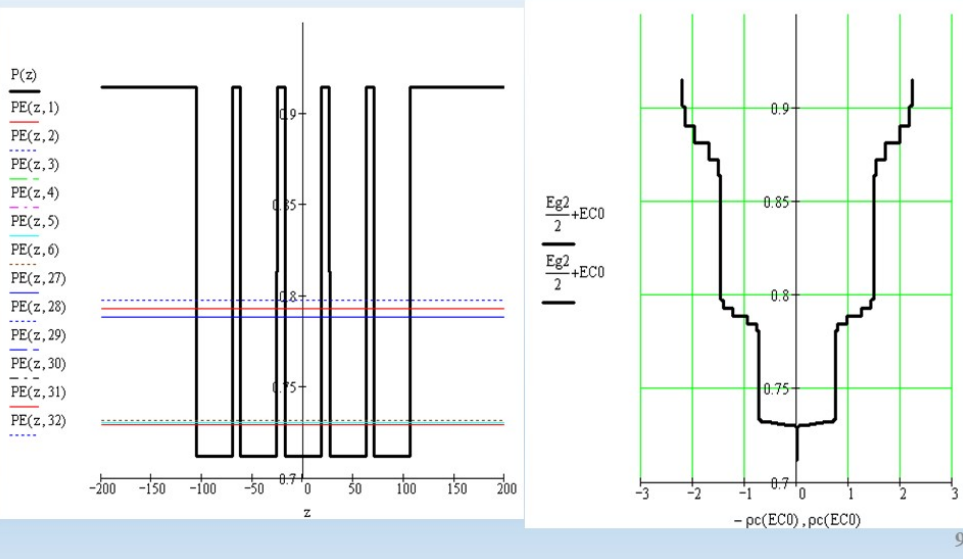
$$F2 = \frac{1}{N} \cdot \left(\text{arctg} \left(\left(-\frac{k_1 \cdot m_2}{m_1 \cdot k_2} \right)^{-1} \right) + (N - e_1) \cdot \text{arctg} \left(\left(-\frac{k_1 \cdot m_2}{m_1 \cdot k_2} \cdot \text{th}(k_1 \cdot b) \right)^{-1} \right) \right) + \\ + \frac{1}{N} \cdot (N - (N - e_1 + 1)) \cdot \text{arctg} \left(-\frac{k_1 \cdot m_2}{m_1 \cdot k_2} \cdot \frac{1}{\text{th}(k_1 \cdot b)} \right) + n \cdot \pi - k_2 \cdot a, \quad (5)$$

- непарні рішення;

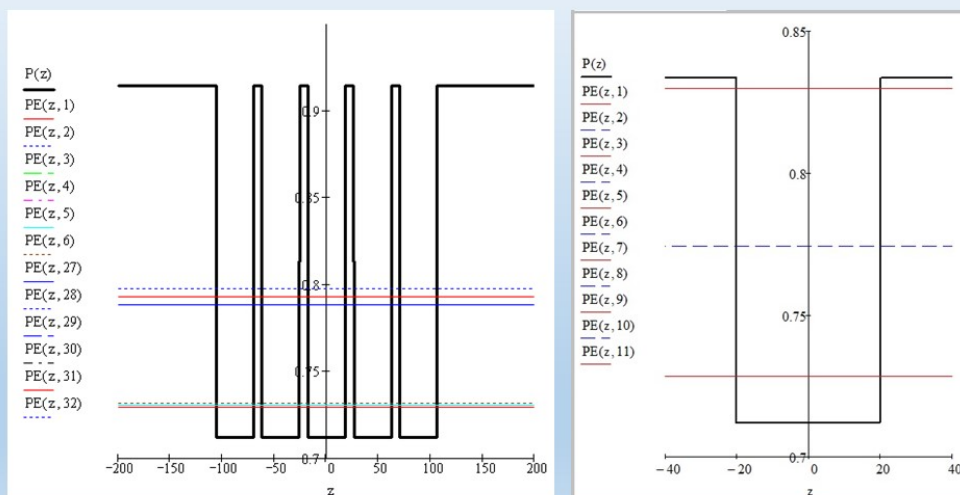
8

Розроб.	Орлов В.М.			<i>РОЗПОВСЮДЖЕННЯ І ПОГЛИНАННЯ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У БАГАТОШАРОВИХ НАДГРАТКАХ</i>	
Перев.	Пащенко О.Г.				
Н. контр.	Шевченко Н. Є.				
				ЕППЗм – 19 – 1	Аркуш 4
Затв.	Бондаренко І. М.			ХНУРЕ, каф.МЕЕПП	Аркушів 10

Енергетичні стани електронів і густина електронних станів у зоні провідності багатошарової КРС



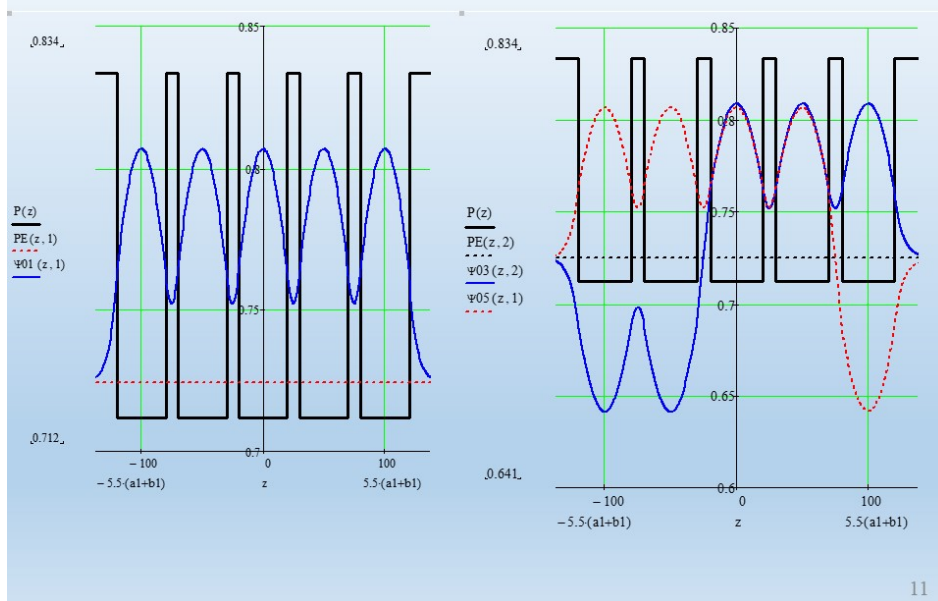
Виникнення мінізон в наслідок багатократних процесів тунелювання через розділювальні бар'єри



10

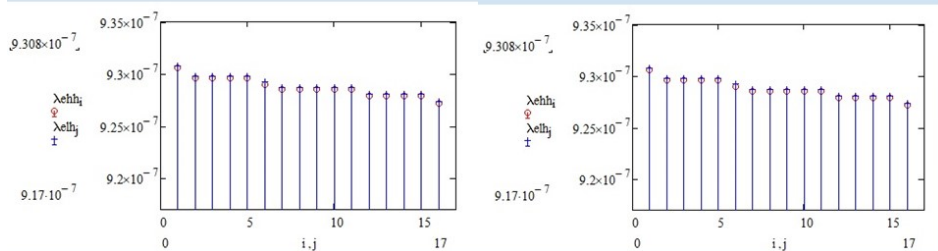
Розроб.	Орлов В.М.			<i>РОЗПОВСЮДЖЕННЯ І ПОГЛИНАННЯ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У БАГАТОШАРОВИХ НАДГРАТКАХ</i>	
Перев.	Пашенко О.Г.				
Н. контр.	Шевченко Н. Є.				
				ЕППЗм – 19 – 1	Аркуш 5
Затв.	Бондаренко І. М.			ХНУРЕ, каф.МЄЕПП	Аркушів 10

Невырожденный и вырожденный энергетичні стани частинок у багатошаровій КРС



11

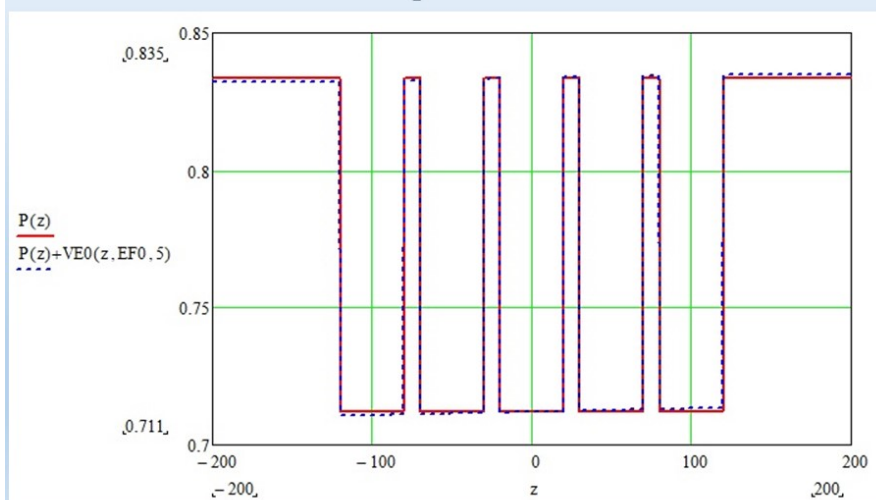
Частоти (довжини хвиль) випромінювальних переходів електрон – важка дірка, електрон – легка дірка у стаціонарному стані



12

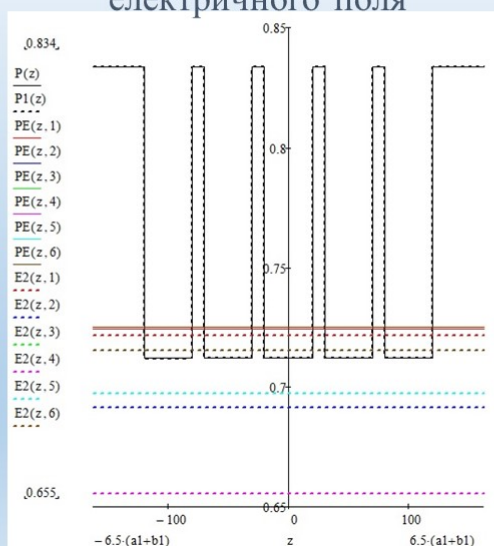
Розроб.	Орлов В.М.			РОЗПОВСЮДЖЕННЯ І ПОГЛИНАННЯ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У БАГАТОШАРОВИХ НАДГРАТКАХ	
Перев.	Пащенко О.Г.				
Н. контр.	Шевченко Н. Є.				
				ЕППЗм – 19 – 1	Аркуш 6
Затв.	Бондаренко І. М.			ХНУРЕ, каф.МЕЕПП	Аркушів 10

Зміна положення власних значень енергії електронів та густини розподілу електронів у збуреному стані відносно стаціонарного під впливом зовнішнього стаціонарного електричного поля



13

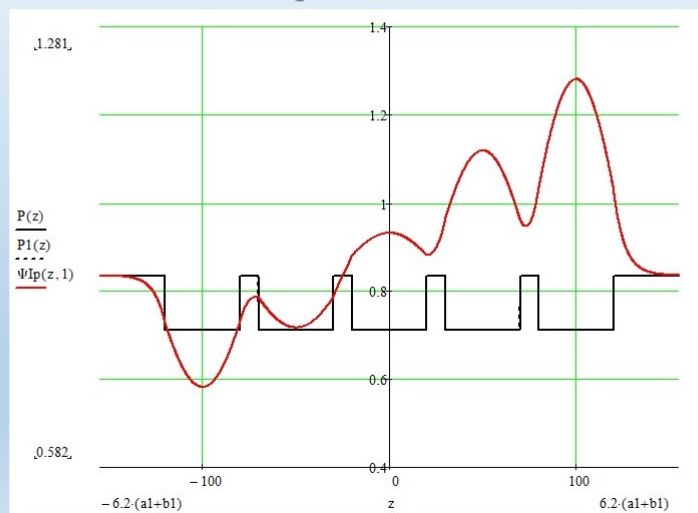
Зміна положення власних значень енергії електронів та густини розподілу електронів у збуреному стані відносно стаціонарного під впливом зовнішнього стаціонарного електричного поля



14

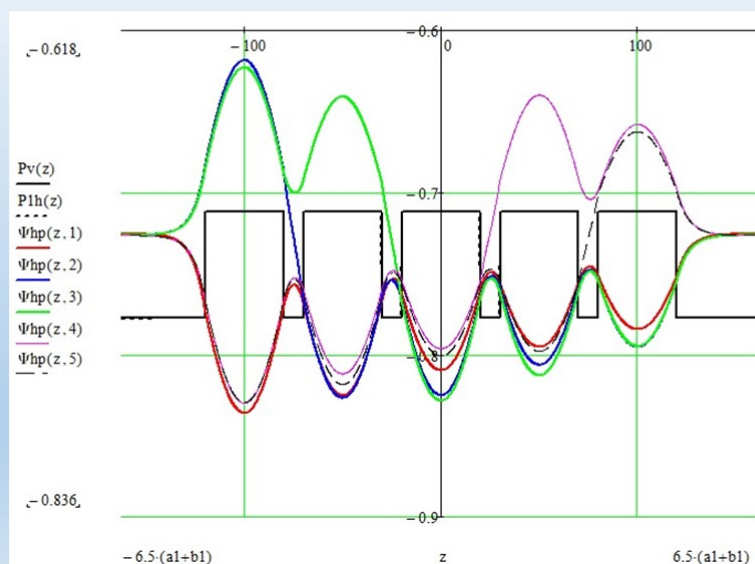
Розроб.	Орлов В.М.			<i>РОЗПОВСЮДЖЕННЯ І ПОГЛИНАННЯ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У БАГАТОШАРОВИХ НАДГРАТКАХ</i>	
Перев.	Пащенко О.Г.				
Н. контр.	Шевченко Н. Є.				
				ЕППЗм – 19 – 1	Аркуш 7
Затв.	Бондаренко І. М.			ХНУРЕ, каф.МЕЕПП	Аркушів 10

Зміна положення власних значень енергії електронів та густини розподілу електронів у збуреному стані відносно стаціонарного під впливом зовнішнього стаціонарного електричного поля



15

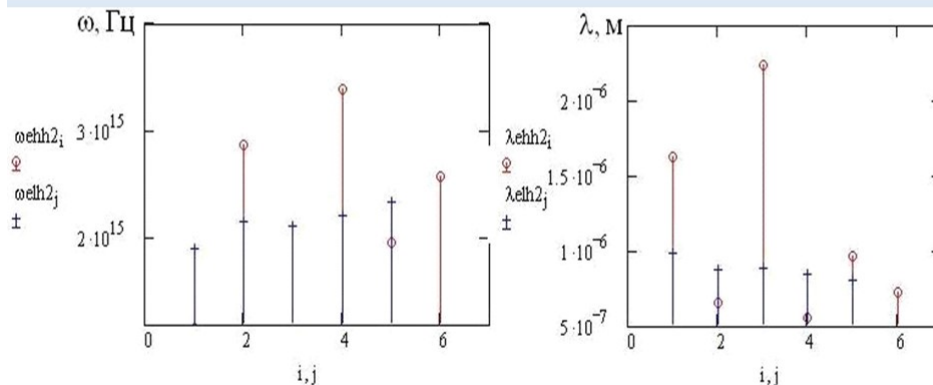
Хвильові функції і розподіл густини вірогідності знаходження носіїв у збуреному стані, розраховані у другому наближенні теорії малих збурень



16

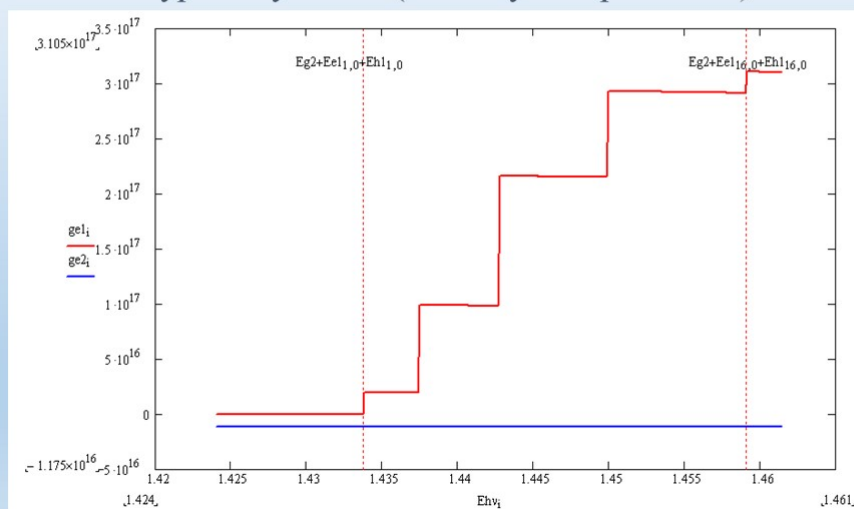
Розроб.	Орлов В.М.			<i>РОЗПОВСЮДЖЕННЯ І ПОГЛИНАННЯ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У БАГАТОШАРОВИХ НАДГРАТКАХ</i>	
Перев.	Пашенко О.Г.				
Н. контр.	Шевченко Н. Є.				
				ЕППЗм – 19 – 1	Аркуш 8
Затв.	Бондаренко І. М.			ХНУРЕ, каф.МЕЕПП	Аркушів 10

Частоти (довжини хвиль) випромінювальних переходів
електрон – важка дірка, електрон – легка дірка у
збуреному стані



17

Спектри коефіцієнту оптичного підсилення
багат шарової наноструктури активної області ІНЛ у
стаціонарному стані (червона безперервна лінія) і у
збуреному стані (синя пунктирна лінія)



18

Розроб.	Орлов В.М.		РОЗПОВСЮДЖЕННЯ І ПОГЛИНАННЯ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У БАГАТОШАРОВИХ НАДГРАТКАХ	
Перев.	Пашенко О.Г.			
Н. контр.	Шевченко Н. Є.			
			ЕППЗм – 19 – 1	Аркуш 9
Затв.	Бондаренко І. М.		ХНУРЕ, каф.МЕЕПП	Аркушів 10

Висновки:

З аналізу результатів моделювання енергетичних станів частинок і квазічастинок (електронів, важких і легких дірок) впливає наступне:

- власні значення енергії розподілені нерівномірно по глибині кантових ям багат шарової квантової розмірної структури, крім того, деякі стани у багат шаровій структурі вироджуються, тобто одному значенню енергії частинки відповідають кілька хвильових функцій.

- наявність в даній структурі великої кількості енергетичних рівнів частинок, що характеризуються однаковою парністю, в тому числі і вироджених, пов'язане з можливістю виникнення падаючих і відбитих хвиль ймовірності в бар'єрах кінцевої ширини, і пов'язаних з ним комбінацій енергетичних станів.

- під дією зовнішнього стаціонарного електричного поля в квантово-обмежених системах чітко спостерігається квантово-обмежений ефект Штарка, що виявляється в розширенні енергетичного зазору між сусідніми станами частинок. На тлі ефекту мультиплікативності енергетичних станів, який відбувається внаслідок тунелювання частинок, що знаходяться на близьких енергетичних рівнях в сусідніх квантових ямах. Зі збільшенням напруженості зовнішнього поля відбувається навіть явище «переплутування» енергетичних станів.

при додатку зовнішнього постійного в часі електричного поля відбувається зміщення коефіцієнта підсилення в більш короткохвильову область і зменшення підсилення в заданій смузі частот.

19

Розроб.	Орлов В.М.			<i>РОЗПОВСЮДЖЕННЯ І ПОГЛИНАННЯ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У БАГАТОШАРОВИХ НАДГРАТКАХ</i>	
Перев.	Пащенко О.Г.				
Н. контр.	Шевченко Н. Є.				
				ЕППЗм – 19 – 1	Аркуш 10
Затв.	Бондаренко І. М.			ХНУРЕ, каф.МЕЕПП	Аркушів 10