

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ РАДІОФІЗИКИ ТА ЕЛЕКТРОНІКИ
ім. акад. О.Я. УСИКОВА

УДК 621.373.8
На правах рукопису

Пащенко

ПАЩЕНКО ОЛЕКСІЙ ГЕОРГІЙОВИЧ

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КВАНТОВОРОЗМІРНИХ
ІНЖЕКЦІЙНИХ ЛАЗЕРІВ НА ОСНОВІ GaAs/AlGaAs
З УРАХУВАННЯМ ЕКСИТОННИХ ЕФЕКТІВ

Спеціальність 01.04.04 - фізична електроніка

Автореферат дисертації на здобуття вченого ступеня кандидата
фізико-математичних наук

Харків - 1997



00752360 (N)

Дисертація є рукописом

Робота виконана в Харківському державному технічному університеті радіоелектроніки

Науковий керівник:

кандидат фізико-математичних наук, професор
Ванцан Вітольд Мар'янович

Офіційні опоненти:

1. Доктор фізико-математичних наук, завідувач кафедру "Напівпровідникової та вакуумної електроніки" Харківського державного університету, професор Прохоров Едуард Дмитрович
2. Доктор технічних наук, професор кафедри "Квантової електроніки" Харківського військового університету, Доля Григорій Миколайович

Провідна організація: ННЦ Харківський фізико-технічний інститут.
Інститут фізики твердого тіла, матеріалів та технологій.

Захист відбудеться 26 червня 1997 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 02.29.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. акад. О.Я. Усикова НАН України за адресою 310085 м. Харків, вул. акад. Проскури, 12

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки ім. акад. О.Я. Усикова НАН України за адресою 310085 м. Харків, вул. акад. Проскури, 12

Автореферат розісланий 23 травня 1997р

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради,

доктор фізико-математичних наук,

С.М. Харківський.

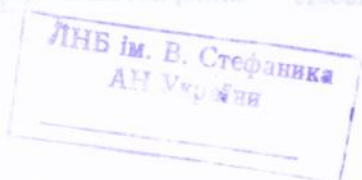
ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертації. Моделювання інжекційних напівпровідникових лазерів (ІНЛ) на квантоворозмірних структурах (КРС), фізичних процесів, що відбуваються в цих структурах і визначають механізми лазерної генерації, є актуальним.

Стрімкий розвиток напівпровідникової технології загалом і технології виготовлення ІНЛ зокрема, привів до відкриття ряду нових процесів, що впливають на роботу лазера, а частково і змінюють фізичний механізм його функціонування. До таких процесів належать екситонні переходи в напівпровідниках різної хімічної сполуки, різних типів провідності, структури енергетичних зон при випромінюванні і поглинанні світла, при течії струму через зразок.

Досягнення сучасної напівпровідникової технології дають можливість виготовляти матеріали, що мають штучну мікроструктуру. На основі цих матеріалів вирощуються квантоворозмірні структури з квантовими ямами різної глибини і ширини, які набули широкого застосування в ІНЛ. Такі лазери мають більш низькі порогові струми, менш виражену температуру залежність порогового струму, більш вузький спектр випромінювання, більш високе підсилення і більш широку смугу модуляції, ніж ІНЛ, створені на основі односторонньої або двосторонньої гетероструктури. Крім цього, ІНЛ на КРС мають найкращі шумові характеристики серед всіх типів ІНЛ.

Специфічні особливості КРС такі, як: зміна форми густин станів в зонах (для електронів в зоні провідності, для легких і важких дірок у валентній зоні) з параболічної на східчасту; зняття виродження підзон легких і важких дірок в прямому максимумі валентної зони; прояв ефекту двомірного квантування і цілого ряду інших явищ приводять до необхідності перегляду уже існуючих уявлень про енергетичну структуру напівпровідникового матеріала, механізмів взємодії частинок, квазічастинок (екситонів) і полів в напівпровіднику, а також моделювання процесу генерації лазерного випромінювання. Створення інжекційного напівпровідникового лазера як прилада на сьогодні - це дорогий процес моделювання, пов'язаний з



необхідністю теоретичних та експериментальних досліджень великої кількості різних фізичних явищ, які визначають як принципи генерції у вибраному типі лазера, так і параметри самого лазера і його випромінювання. До таких явищ відносяться і екситонні ефекти.

Установлено, що в напівпровідникових квантоворозмірних структурах екситонні стани стабільні в широкому діапазоні зміни температур, внутрішньокристалічних тисків і струмів, що протікають по зразку.

Однак у теперішній час ні одна з існуючих математичних моделей інжекційного напівпровідникового лазера на квантоворозмірній структурі не ураховує внесок екситонів в процеси люмінесценції і лазерної генерації.

У зв'язку з цим математичне моделювання ІНЛ на КРС, що ґрунтується на використанні найновіших теоретичних і експериментальних досліджень, є однією з актуальних проблем фізики напівпровідникових лазерів.

Мета роботи і задачі дослідження. Математична модель квантоворозмірної структури, що враховує вплив екситонних випромінювальних переходів на процес лазерної генерації;

- фізичне обґрунтування стійкості енергетичних станів частинок і квазічастинок (екситонів) в квантоворозмірній структурі на основі GaAs/AlGaAs;

- вивід класичних швидкісних рівнянь, що підводять баланс електронів, екситонів і фотонів у квантоворозмірному лазері;

- визначення температурних залежностей вихідних характеристик - зміни кількості фотонів, положення квазірівня Фермі і вищепорогового ненасиченого підсилення - від швидкості накачування квантоворозмірного лазера на основі моделі квантовомеханічних швидкісних рівнянь;

- числовий експеримент на основі запропонованої моделі по визначенню вихідних характеристик квантоворозмірного лазера GaAs/AlGaAs.

Наукова новизна. В роботі вперше цілеспрямовано досліджені питання стійкості енергетичних станів екситонів у квантових ямах квантоворозмірних структур з точки зору можливості використання екситонних випромінювальних

переходів у математичному моделюванні процесу лазерної генерації в ІНЛ на КРС.

Запропонована математична модель інжекційного напівпровідникового квантоворозмірного лазера з урахуванням генерації на випромінювальних екситонних переходах розроблена на основі класичних швидкісних рівнянь.

Вперше здобуті залежності зміни концентрації електронів, екситонів та фотонів, випромінених внаслідок електронно-діркової та екситонної випромінювальної рекомбінації, від густини струму накачування.

Вперше установлено, що поріг екситонної генерації настає раніше, ніж поріг електронно-діркової генерації. Концентрація фотонів, випромінених при екситонній рекомбінації, зростає швидше і досягає більших значень при тій самій густині струму накачування, ніж густина фотонів, випромінених при електронно-дірковій лазерній генерації.

Вперше відзначено, що між електронно-дірковим і екситонним механізмами лазерної генерації спостерігається гостра конкуренція при змінюванні ширини квантової ями в КРС в межах від 50Å до 100Å .

Практична цінність роботи. Запропонована в цій роботі математична модель дозволяє:

- оцінити стабільність екситонних енергетичних станів, визначити частоти випромінювальних екситонних переходів;
- пояснити довгохвильовий зсув у спектрі генерації інжекційного напівпровідникового квантоворозмірного лазера;
- досліджувати вплив екситонних випромінювальних переходів на вихідні характеристики квантоворозмірних лазерів;
- вивчати конкуренцію зон-зонної (електронно-діркової) та екситонної лазерної генерації.

Наведені в роботі таблиці і графіки можуть бути використані як довідковий матеріал.

Результати роботи використані у госбюджетних НДР №251, №456.

Особистий внесок здобувача.

Фізично обгрунтована стабільність екситонних лазерних рівнів у квантоворозмірній структурі з квантовими ямами довільної глибини і ширини.

Запропонована математична модель інжекційного напівпровідникового квантоворозмірного лазера, яка враховує генерацію на випромінювальних екситонних переходах.

Проведено числовий експеримент по моделюванню енергетичних станів екситонів і частот випромінювальних екситонних переходів в квантових ямах квантоворозмірних структур, а також вихідних характеристик напівпровідникового інжекційного квантоворозмірного лазера на основі GaAs/AlGaAs з урахуванням екситонних ефектів.

Отримані залежності порогу екситонної та зон-зонної генерації від швидкості накачування в усьому діапазоні робочих температур для чистого та легованого GaAs.

Участь в аналізі отриманих результатів і характеристик.

Основні положення, що підлягають захисту:

- фізичне обґрунтування стабільності екситонних лазерних рівнів в квантоворозмірній структурі;
- система швидкісних рівнянь для електронів, екситонів і фотонів, випромінених внаслідок зон-зонної і екситонної випромінювальної рекомбінації;
- температурні залежності вихідних характеристик - зміна кількості фотонів, положення квазірівня Фермі і вищепорогового ненасиченого підсилення - від швидкості накачування квантоворозмірного лазера на основі GaAs/AlGaAs;
- результати числового моделювання вихідних характеристик інжекційного напівпровідникового квантоворозмірного лазера з урахуванням зон-зонних і екситонних випромінювальних переходів.

Апробація роботи. Основні результати і положення дисертаційної роботи доповідались на Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми фізичної і біомедичної електроніки", 27-30 травня 1996 р., Київ; на 2-ій Міжнародній конференції "Теорія і техніка передачі, приймання і обробки інформації", 17-19 вересня 1996 р., Туапсе; на 6-ій Міжнародній Кримській конференції "НВЧ техніка і телекомунікаційні технології", 16-19 вересня 1996 р., Севастополь.

Публікації: За темою дисертації опубліковано 12 робіт, із яких 3 статті, 5 депонованих статей, 4 тези доповідей на конференціях.

Обсяг роботи: Дисертаційна робота складається із вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаних джерел і 7-х додатків. Робота містить 199 сторінок, в тому числі 108 сторінок тексту, 18 сторінок рисунків, бібліографію - 112 найменувань на 12-и сторінках, 61 сторінку додатків.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтована актуальність досліджень, сформульовані мета і основні задачі дисертаційної роботи, дана стисла характеристика суті проведених досліджень.

У першому розділі розглянуті загальні питання моделювання напівпровідникових лазерів. Відзначені особливості моделювання інжекційних напівпровідникових лазерів на основі квантоворозмірних структур. Подана корота характеристика математичних моделей ІНЛ, які застосовуються в теперішній час. Обгрунтована необхідність врахування екситонних ефектів при моделюванні інжекційних напівпровідникових квантоворозмірних лазерів.

Прогрес в технології виготовлення інжекційних напівпровідникових лазерів привів до створення квантоворозмірних структур, в яких вісь квантування спрямована вздовж нормалей до меж шарів, що обумовлює фундаментальні зміни усіх фізичних властивостей: енергії зонної структури, симетрії хвильової функції, локалізації носіїв заряду і квазічастинок, статистики квазічастинок. Це приводить до зменшення порогового струму інжекції, звуженню спектра генерації, збільшенню коефіцієнта підсилення, зменшенню температурної залежності вихідних характеристик. В напівпровідникових квантоворозмірних структурах екситони Ван'є-Мотта залишаються стійкими аж до 400 К, внаслідок екситони починають відігравати значну, а часом і домінуючу роль в процесі лазерної генерації. У зв'язку із значною модифікацією фізичних процесів в КРС, удосконалювання діючих і розробка нових математичних моделей квантоворозмірних лазерів є в теперішній час однією з актуальних проблем фізики лазерів.

У другому розділі проведено аналіз фізичних властивостей різних напівпровідникових матеріалів - GaAs, AlAs та їх сполук GaAs/Al_xGa_{1-x}As, що використовуються при виробництві квантоворозмірних структур і лазерів на їх основі. Зокрема, вивчено зміну енергетичної ширини і типу забороненої зони залежно від молярної частки третього компонента твердого розчину заміщення матеріала бар'єра - алюмінія. Для точної оцінки ефективних мас носіїв в цій роботі була використана теорія ефективної маси носіїв, розроблена Латтінгером і Коном.

На основі розв'язання рівняння Шредингера з "ефективним" гамільтоніаном здобуто вирази для хвильових функцій і власних значень енергії електронів, легких і важких дірок, легких і важких екситонів, що знаходяться в квантових ямах, обмежених нескінченно високими потенціальними бар'єрами; бар'єрами скінченної висоти і "нескінченної" ширини; бар'єрами скінченної висоти і ширини.

В роботі розглядалась одномірна квантоворозмірна структура, орієнтована вздовж осі z перпендикулярно до поверхні гетероструктури GaAlAs - GaAs - GaAlAs.

Оскільки екситон - двочастинкова система, то задача розрахунку його рівнів енергії і хвильових функцій, взагалі кажучи, значно складніше, ніж відповідна одноелектронна задача. Проте у граничному випадку (протилегному моделі Френкеля), коли характерна відстань між електроном і діркою багато більше сталої ґратки, можна скористатися наближенням ефективної маси, і тоді, як вперше було показано Ван'є, задача значно спрощується.

В цьому випадку спектр і хвильові функції екситона можуть бути отримані шляхом простого узагальнення результатів, знайдених для електронів, зв'язаних у домішкових станах. Ці стани в загальному випадку співпадають із станами атома водню і можуть бути розраховані за допомогою моделі атома водню в наближенні ефективної маси носіїв для будь-якого напівпровідникового матеріала з використанням "ефективного" гамільтоніана, який у випадку кубічного кристала записується так:

$$\hat{H} = \hat{H}_e + \hat{H}_h + \hat{H}_\mu,$$

де H_c -гамільтоніан для електронних станів, \hat{H}_n и \hat{H}_p - гамільтоніан для діркових і екситонних станів відповідно.

Енергія екситонного стану в потенціальній ямі КРС визначається сумою енергій електрона, дірки і енергії зв'язку екситона. Енергію зв'язку звичайно розраховують за допомогою варіаційних методів, методів функцій Ейрі та ін.

Одержані рішення враховані при аналізі енергетичних станів частинок і квазічастинок у інжекційному напівпровідниковому квантоворозмірному лазері на основі $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Як відомо, в об'ємному напівпровіднику генерація на екситонних переходах неможлива, тому що:

- енергія зв'язку "вільних" екситонів в об'ємному напівпровіднику є малою порівняно з kT і екситонний стан є нестабільним. Він виявляється лише у спектрах поглинання при криогенних температурах;

- екситони - квазічастинки, які розглядаються у першому наближенні в теорії напівпровідників як бозони, не можуть приймати участі у процесі негативного поглинання і створення інверсної населеності.

Проте, якщо розглядати екситони у квантоворозмірних структурах в наближенні їх ферміонності, то можна вважати, що екситонні рівні так само можуть приймати участь у лазерному процесі нарівні з зонними, а також глибокими донорними і акцепторними рівнями, через які, головним чином, здійснюється люмінесценція і лазерна генерація.

Якщо припустити, що лазерна генерація на екситонних рівнях існує, необхідно оцінити стабільність цих рівнів. Для цього необхідно визначити енергію зв'язку екситонів у квантоворозмірних структурах, а також розрахувати спонтанний час життя екситонного рівня.

Дослідження, проведені в розділі 2, дозволяють стверджувати:

- в квантоворозмірній структурі енергетичні стани електронів, легких і важких дірок, легких і важких екситонів стабільні.

Стабільність енергетичних рівнів екситонів дає можливість використовувати спонтанні часи їх життя як парамет

ри при виводі і рішенні системи швидкісних рівнянь, що враховують лазерну генерацію на екситонних випромінювальних переходах;

- числові значення спонтанних часів життя екситонних станів змінюються в межах від 1,5 до 4 нс;

Випромінювальні екситонні переходи зсунуто відносно електронно-діркових у довгохвильову область, при цьому довжина хвилі електронно-діркових переходів змінюється в межах від 0,78 до 0,86 мкм, а екситонних переходів - від 0,85 до 0,97 мкм;

- розбіжність отриманих результатів з відомими даними експериментальних досліджень складає не більше 2%.

В третьому розділі на основі рішення стаціонарних квантово-механічних швидкісних рівнянь в адіабатичному наближенні для інжекційного напівпровідникового квантово-розмірного лазера на основі арсеніда галію отримані залежності зміни концентрації фотонів N , положення квазірівня Фермі ξ , коефіцієнта вищепорогового ненасиченого підсилення G від швидкості накачування P и температури T .

Як визначено у другому розділі даної роботи, екситони справляють істотний вплив на процеси, що відбуваються в ІНЛ на КРС. Отже, екситони повинні бути враховані в балансі надходження, народження і знищення носіїв і фотонів в лазерному резонаторі.

В даній дисертаційній роботі запропонована система швидкісних рівнянь з урахуванням генерації лазерного випромінювання на екситонних переходах.

В цій системі перше рівняння показує, що швидкість збільшення концентрації носіїв дорівнює швидкості інжекції струму, за винятком швидкості втрат носіїв при спонтанній рекомбінації, втрат, обумовлених стимульованою рекомбінацією, і втрат, обумовлених зв'язуванням вільних носіїв у екситони.

Друге рівняння показує, що швидкість збільшення кількості екситонів дорівнює швидкості зв'язування вільних носіїв в екситони, за винятком втрат екситонів при їх спонтанній рекомбінації і втрат, обумовлених стимульованою рекомбінацією екситонів.

Третє рівняння установлює, що швидкість збільшення густоти фотонів дорівнює швидкості народження фотонів при стимульованому випромінюванні, за винятком дисипативних втрат фотонів у резонаторі, плюс швидкість спонтанного випромінювання фотонів в лазерну моду.

Четверте рівняння установлює, що швидкість збільшення густини фотонів, випромінених внаслідок екситонної рекомбінації дорівнює швидкості народження фотонів при стимульованому випромінюванні з екситонного рівня, за винятком дисипативних втрат фотонів у резонаторі, плюс швидкість спонтанного випромінювання фотонів в лазерну моду.

П'яте рівняння підбиває баланс всіх фотонів, випромінених в моду резонатора.

В одномодовому наближенні заведено записувти одне рівняння для фотонів, випромінених в лазерну моду, поділення його на двое в даному випадку обумовлено відмінністю механізмів випромінювальної рекомбінації. При цьому з'являється додаткова можливість дослідити конкуренцію цих механізмів в процесах суперлюмінесценції і лазерної генерації.

Проте, необхідно відзначити, що порогове значення концентрації екситонів не може бути дуже великим тому, що вже при концентраціях порядку 10^{17-18} см⁻³ "пакування" екситонів стає досить щільним, при цьому між електронами і між дірками, які є складовими екситона, сили кулонівського відштовхування зростають і екситонні стани стають нестабільними. Це, в свою чергу, може привести до розпаду екситонного лазерного рівня і, внаслідок, до зриву екситонної лазерної генерації.

На основі рішення запропонованої системи рівнянь в наближенні слабкого сигналу отримані наступні результати:

інжекційний напівпровідниковий лазер з квантово-розмірною активною областю, створений на основі легованого GaAs (концентрація домішки складає $\approx 10^{18}$ м⁻³), має більшу температурну стабільність вихідних характеристик - зміни концентрації фотонів, положення квазірівня Фермі і коефіцієнта вищепорогового ненасиченого підсилення - від швидкості накачування, ніж прилад, створений на основі нелегованого GaAs в усьому діапазоні змінювання швидкості накачування (10^{17} - 10^{19} с⁻¹) і робочих температур (50-330 К).

Крім того, в легованому GaAs режим генерації встановлюється швидше при менших швидкостях накачування, тобто при $9,0 \cdot 10^{17} - 1,3 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1}$.

Установлено, що концентрація електронів прямо пропорційна густині струму накачування, а концентрація екситонів прямо пропорційна концентрації неосновних носіїв в активній області.

Концентрація фотонів, випромінених внаслідок зон-зонної рекомбінації, прямо пропорційна густині струму накачування. Концентрація фотонів, випромінених внаслідок екситонної рекомбінації, прямо пропорційна концентрації електронів в активній області і залежить від порогового значення концентрації екситонів.

При роз'язанні запропонованої системи рівнянь в адиабатичному наближенні отримані залежності зміни концентрації електронів, екситонів і фотонів, випромінених внаслідок електронно-діркової і екситонної випромінювальної рекомбінації, від нормованої густини струму накачування, що змінювалась в межах від 0 до 5.

З аналізу отриманих залежностей виходить, що поріг екситонної генерації настає раніше, ніж поріг електронно-діркової лазерної генерації, крім того, концентрація фотонів, випромінених внаслідок екситонної рекомбінації, зростає різкіше і досягає більших значень при одній і тій самій густині струму накачування, ніж густина фотонів, випромінених при електронно-дірковій лазерній генерації.

Між електронно-дірковим і екситонним механізмами лазерної генерації спостерігається найбільш гостра конкуренція при змінюванні ширини ями в КРС в межах від 50 \AA до 100 \AA .

В четвертому розділі подано аналіз числового експерименту, проведеного згідно запропонованій математичній моделі, отриманій на основі моделей квантовомеханічних і класичних швидкісних рівнянь.

Подані залежності енергії електрона, важкої дірки, важкого екситона від ширини потенційної ями L_z і молярної долі третього компонента твердого розчину заміщення матеріала бар'єра x . При цьому вважалось, що ширина бар'єра залишалась незмінною, висота бар'єра задавалась зміною величини x .

Ширина ями змінювалась в межах від 10\AA до 200\AA .

Отримані залежності підтверджують суть квантово-розмірного ефекта, що виникає в КРС. Це проявляється в тому, що при малій ширині ями, наприклад 20\AA , спостерігається чітко виражена дискретність енергетичних рівнів часток.

Кількість енергетичних рівнів в ямі визначається висотою потенціальних бар'єрів, що обмежують яму. Ця висота, в свою чергу, залежить від ширини забороненої зони матеріала бар'єра, що задається вмістом-молярною долею третього компонента твердого розчину заміщення. Чим більше x , тим глибше квантова яма для будь-якої частинки або квазічастинки і тим чіткіше проявляється квантоворозмірний ефект. І навпаки, якщо x є малим, висота потенціальних бар'єрів є невеликою і місткість ями також зменшується. Із дальшим зменшенням x може виникнути ситуація, при якій квантова яма все ще буде існувати, але енергія частинок буде більшою, ніж висота бар'єра, що свідчить про виродження квантоворозмірного ефекта.

Із збільшенням ширини ями до величини, що перевищує довжину хвилі де Бройля для кожного із сортів частинок і квазічастинок, що розглядаються, рівні енергії зближуються, зливаються в неперервний континуум з наближенням до дна ями. В комбінації із зменшенням x це також веде до виродження квантоворозмірного ефекта. Необхідно відзначити, що із збільшенням ширини ями енергетичний рівень важкого екситона переміщується із зони провідності в заборонену зону. Залежність енергії екситона від ширини ями подана в традиційному зображенні, коли по вісі ординат відкладена енергія електрона в зоні провідності і за нульовий рівень енергії прийнято стелю валентної зони матеріала потенціального бар'єра.

Подано графічні залежності власних значень енергії електронів, легких і важких дірок, легких і важких екситонів, що знаходяться в потенціальній ямі, залежно від ширини ями, висоти і ширини бар'єра, що обмежує яму.

Подано аналіз статичних характеристик $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ квантоворозмірного лазера, отриманих на основі розв'язання квантовомеханічних швидкісних рівнянь для чистого і легуваного GaAs , а також аналіз статичних характеристик лазера,

отриманих на основі розв'язання класичних швидкісних рівнянь з урахуванням генерації на випромінювальних екситонних переходах.

Аналіз цих залежностей показує монотонне зростання концентрації надлишкових носіїв у допороговій області із збільшенням густоти струму накачування і насичення у вищепороговій області в процесі стаціонарної генерації. В пороговій області спостерігається розподіл залежностей від зміни коефіцієнта спонтанного випромінювання β від нуля до $1 \cdot 10^{-2}$. При $\beta=0$, тобто в тому випадку, коли спонтанне випромінювання не робить ніякого внеску в лазерну моду, концентрація надлишкових носіїв в зоні провідності вище, ніж при $\beta=0$. Подібний характер залежностей пояснюється тим, що при випромінюванні в лазерну моду не тільки стимульованих, а також і спонтанних фотонів, кількість рекомбінюючих надлишкових носіїв буде більше, ніж у випадку, коли в моді присутні тільки стимульовано випромінені фотони.

Встановлено, що монотонне зростання кількості надлишкових носіїв у допороговій області відповідає зростанню положення квазірівня Фермі на енергетичній діаграмі напівпровідника. Пічковий характер залежностей положення квазірівня Фермі в колопороговій області повністю відображує факт інерційності установаження режиму стаціонарної генерації, наявності перехідного процесу, а також того, що генерація лазерного випромінювання в активній області відбувається в основному за рахунок спонтанних переходів.

Підбиваючи підсумок матеріалу, що розглянуто в розділі 4, можна зробити такі висновки:

1. При змінненні ширини ями в межах від 10\AA до 200\AA і висот потенціальних бар'єрів, що задаються молярною долею третього компонента твердого розчину заміщення AlGaAs - алюмінія - x - в межах від 0,1 до 1,0

- довжина хвилі електронно-діркових лазерних переходів змінюється в межах від 0,78 до 0,86 мкм, а екситонних лазерних переходів від 0,85 до 0,97 мкм;

- спонтанний час життя екситонного стану зменшується від 4,1 до 0,9 нс із збільшенням ширини ями, що свідчить про виродження квантоворозмірного ефекта при збільшенні ширини ями більше, ніж 140\AA ;

- глибина ями незначно впливає на спонтанний час життя частинок і квазічастинок, зміна величин часу життя в усьому діапазоні змінення висот потенціальних бар'єрів не перевищує 3% від середньої величини.

2. Вихідні характеристики ІНЛ на КРС з легованою активною областю (залежності зміни кількості фотонів, положення квазірівня Фермі і вищепорогового ненасиченого підсилення від швидкості накачування) є більш стабільними, ніж аналогічні характеристики ІНЛ з нелегованою активною областю в усьому діапазоні змінення робочих температур від 50 до 330К, крім того, поріг генерації у них настає швидше при швидкості накачування порядку $1,3 \times 10^{18} \text{ c}^{-1}$;

- поріг екситонної лазерної генерації настає швидше, ніж поріг електронно-діркової лазерної генерації і перевищує його за нормованою густиною струму накачування приблизно на 0,15;

- у вищепороговій області, області генерації, нормована густина фотонів при тих самих значеннях густини струму накачування у екситонної генерації вище, ніж у електронно-діркової на $0,4 \cdot 10^{-1}$.

У висновках сформульовані основні результати дисертаційної роботи та указані перспективні області їх застосування.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. На основі рішення рівняння Шредингера з "ефективним" гамільтоніаном доведено, що енергетичні стани неосновних носіїв і квазічастинок в активній області квантоворозмірних лазерів є стабільними.

Використання спонтанного часу життя екситонного стану як параметра при моделюванні генерації в інжекційному напівпровідниковому лазері з квантоворозмірною активною областю на випромінювальних екситонних переходах є можливим.

Довгохвильовий зсув екситонних випромінювальних переходів відносно електронно-діркових становить 01-0,15 мкм.

2. На основі рішення квантовомеханічних швидкісних рівнянь в адиабатному наближенні показано, що вихідні характеристики — залежність зміни концентрації фотонів, положення квазірівня Фермі і коефіцієнта вищепорогового ненасиченого підсилення від швидкості накачування в інжекційних напівпровідникових лазерах на квантоворозмірних структурах — мають більшу температурну стабільність в легованому GaAs, ніж в нелегованому.

3. На основі класичних швидкісних рівнянь розроблена математична модель інжекційного напівпровідникового квантоворозмірного лазера з урахуванням генерації на випромінювальних екситонних переходах.

Установлено, що концентрація екситонів прямо пропорційна концентрації електронів в активній області; концентрація фотонів, випромінених у результаті екситонної рекомбінації, прямо пропорційна концентрації електронів і значно залежить від порогового значення концентрації екситонів.

Установлено сильну конкуренцію електронно-діркових і екситонних випромінювальних переходів в процесі лазерної генерації. В квантоворозмірних структурах з широкими ямами (більше 100\AA) переважають електронно-діркові переходи, а в квантоворозмірних структурах з вузькими ямами (менше 50\AA) — екситонні переходи.

4. На основі числового експеримента по запропонованій моделі можна стверджувати, що:

- із зменшенням ширини ями довгохвильовий зсув екситонних випромінювальних переходів відносно електронно-діркового збільшується, також зростає і спонтанний час життя екситонних станів;

- поріг екситонної генерації настає раніше і в вищепороговій області (області генерації) концентрація фотонів випромінених внаслідок екситонної рекомбінації зростає різкіше;

- глибина ями в квантоворозмірній структурі слабо впливає на власні значення енергії і спонтанні часи життя частинок і квазічастинок.

В додатку подані листінги програм, за допомогою яких виконано розрахунок: 1. Рівнів енергії частинок і квазічастинок; 2. Статичних характеристик ІНЛ на КРС на основі

рішення квантовомеханічних швидкісних рівнянь як для чистого, так і для легованого GaAs; 8. Статичних характеристик ПНД на КРС з урахуванням можливої екситонної генерації на основі класичних швидкісних рівнянь.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ванцан В.М. Пащенко А.Г. К решению квантовомеханических скоростных уравнений для полупроводниковых инжекционных лазеров // Радиотехника. Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 1997, вып. №101. С. 62-71

2. Ванцан В.М. Пащенко А.Г. Численное решение стационарных квантовомеханических скоростных уравнений для полупроводниковых инжекционных лазеров в приближении эффективной массы // Радиотехника. Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 1997, вып. №101. С. 71-81

3. Пащенко А.Г. Расчёт положения квазиуровня Ферми и количества фотонов в сильно легированном арсениде галлия // Радиотехника. Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 1997, вып. №101. С. 81-91

4. Ванцан В.М. Пащенко А.Г. К разработке схемы исследования и проектирования инжекционных лазеров с применением ЭВМ. Часть 1. Построение схемы исследования // Деп. в ВИНТИ.-М.: 1995, №2 (279), 12 с.

5. Ванцан В.М. Пащенко А.Г. К разработке схемы исследования и проектирования инжекционных лазеров с применением ЭВМ. Часть 2. Построение математической модели // Деп. в ВИНТИ.-М.: 1995, №2 (279), 10 с.

6. Ванцан В.М. Пащенко А.Г. К расчёту оптической мощности и ширины линии генерации полупроводниковых инжекционных лазеров // Деп. в ВИНТИ.-М.: 1996, №4(202), 15 с.

7. Ванцан В.М. Пащенко А.Г. Разработка математических моделей для расчёта и проектирования инжекционных лазеров. Часть 1. Расчёт коэффициента усиления и порогового тока // Деп. в ВИНТИ.-М.: 1996, №4(292), 11 с.

8. Ванцан В.М. Пащенко А.Г. Разработка математических моделей для расчёта и проектирования инжекционных

лазеров. Часть 2. Расчёт положения квазиуровня Ферми и количества фотонов от скорости накачки и температуры // Деп. в ВИНТИ.-М.: 1996, №4 (292), 12 с.

9. Ванцан В.М. Пащенко А.Г. Экситоны в полупроводниковых инжекционных лазерах на основе квантоворазмерных структур // Реферат докладов 6-ой Международной Крымской конференции "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии", 16-19 сентября 1996 г., Севастополь, 1996. С.16.

10. Ванцан В.М. Пащенко А.Г. Исследование экситонных эффектов в полупроводниковых инжекционных лазерах на основе квантоворазмерных структур // Сб. докладов Международ. науч.-техн. конференции "Проблемы физической и биомедицинской электроники". 27-30 мая 1996 г., Киев. С 183-185.

11. Ванцан В.М. Пащенко А.Г. К расчёту количества фотонов и положения квазиуровня Ферми в полупроводниковом инжекционном лазере // 2-я Междунар. конференция "Теория и техника передачи, приёма и обработки информации", 17-19 сентября 1996 г., Тезисы докладов. Часть 1. Харьков-Туапсе. С.181.

12. Ванцан В.М. Пащенко А.Г. Оценка стабильности лазерных экситонных уровней // 2-я Междунар. конференция "Теория и техника передачи, приёма и обработки информации", 17-19 сентября 1996 г., Тезисы докладов. Часть 1. Харьков-Туапсе. С.183.

Пащенко А.Г. Разработка математической модели для расчёта полупроводниковых квантоворазмерных инжекционных лазеров на основе **GaAs/AlGaAs** с учётом экситонных эффектов. - Рукопись. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 - физическая электроника. - Институт радиофизики и электроники НАН Украины им. акад. Усыкова А.Я. Харьков 1997. Диссертация посвящена вопросам математического моделирования физических процессов в инжекционных полупроводниковых лазерах на основе квантоворазмерных структур (ИПЛ на КРС). В разработанной модели учтены экситонные эффекты, возникающие в КРС при генерации на излучательных экситонных переходах. На основании решения этих уравнений для стационарного случая получены зависимости концентраций электронов, экситонов и фотонов от плотности тока накачки. Основные результаты работы использованы в госбюджетных НИР ХТУРЭ.

Pashchenko A.G. Development of mathematical model for calculating semiconductor quantum-well injection lasers on **GaAs/AlGaAs** taking into account exciton effects. Manuscript. Dissertation for the degree of candidate physico-mathematical sciences on the speciality 01.04.04 - physical electronics.- Institute of radiophysics and electronics of NASc of Ukraine named after acad. Usikov A.J., Kharkov 1997. Dissertation is devoted to the problems of mathematical simulation of physical process in injection semiconductor lasers on the basis of quantum-well structures (ISL on QWS). The developed model considers exciton effects emerging in the QWS when generating laser radiation. Rate equations for ISL on QWS are deduced taking into account generation on the emission exciton junctions. On the basis of these equations solution for the stationary case the dependances of electrons, excitons and photons concentrations on the pumping current density were obtained. The main results of the work were used in the state budget researchers in Kharkov State Technical University of Radioelectronics.

Ключові слова: математична модель, квантоворозмірна структура, інжекційний лазер, екситонний ефект, аналіз, швидкісне рівняння.

Наукове видання

Пащенко Олексій Георгійович

**РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ
НАПВІПРОВІДНИКОВИХ КВАНТОВОРОЗМІРНИХ
ІНЖЕКЦІЙНИХ ЛАЗЕРІВ НА ОСНОВІ GaAs/AlGaAs
З УРАХУВАННЯМ ЕКСИТОННИХ ЕФЕКТІВ**

Підп. до друку 15.05.97. Формат 60x84^{1/16}. Папір друк. Друк офсетний.
Умов. друк. арк. 1,0. Обліг вид. арк. 1,1. Тираж 100 прим.