

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

імені В. Н. Каразіна

Грищенко Сергій Володимирович



УДК 621.373.826

**СПЕКТРАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ФОТОДЕТЕКТОРІВ НА
БАГАТОШАРОВИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВІ
GaAs/InGaAs ТА GaN/AlGaN МАТЕРІАЛІВ ІЗ ВБУДОВАНИМ
МІКРОРЕЗОНАТОРОМ**

спеціальність 01.04.05 – оптика, лазерна фізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Харківському національному університеті радіоелектроніки
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Сухоіванов Ігор Олександрович, Харківський
національний університет радіоелектроніки
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри фізичних основ електронної техніки

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Маслов В'ячеслав Олександрович
Харківський національний університет імені
В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри квантової радіофізики;

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий
співробітник
Сорокін Олександр Васильович
Інститут скінтіляційних матеріалів НАН України,
завідувач лабораторії.

Захист відбудеться «22» січня 2016 року о 16 годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 64.051.03 у Харківському національному університеті
імені В. Н. Каразіна (61022, м. Харків, пл. Свободи, 4, ауд. ім. К. Д. Сінельникова).

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського
національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою 61022, м. Харків,
пл. Свободи, 4, а також на сайті фізичного факультету ХНУ імені В. Н. Каразіна.
Режим доступу: http://physics.karazin.ua/ua/dis_zachyst.html.

Автореферат розіслано

«16» грудня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Чібісов Д. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертації. Необхідність послідовного підвищення інтеграції напівпровідникових елементів у мікроелектронних приладах (мікропроцесори, плати пам'яті та інтегральні мікросхеми та ін.) стимулює проведення досліджень у галузі оптичних з'єднань. Впровадження оптичних комунікацій, які мають малі енергетичні втрати, характеризується відсутністю скін-ефекту та несприйнятливістю до електромагнітних перешкод, що стимулює заміну мідних провідників на оптичні з'єднання.

Завдяки швидкому розвитку мікроелектронних технологій побутова електроніка у майбутньому зможе працювати на тактових частотах порядку 15 ГГц, що цілком достатньо для забезпечення швидкості передачі даних на рівні 100 Гбіт/с. Це вимагає створення високошвидкісних активних компонентів та удосконалення систем оптичного зв'язку. На теперішній час у галузі оптичних комунікацій стоять завдання підвищення сумарної пропускної спроможності каналів обміну даних, зменшення комунікаційних затримок між операційною пам'яттю, кеш-пам'яттю та іншими функціональними компонентами, вдосконалення активних елементів комунікаційного тракту (випромінювачів, фотодетекторів). Одним зі способів рішення цих завдань є застосування напівпровідникових резонансних фотодетекторів (РФД) у силу їх високої квантової ефективності (КЕ), низьких енерговитрат та зручності керування спектром.

РФД є приладами, в яких активне середовище розташоване у оптичному резонаторі, яким, як правило, є решітка Брегга. Переваги такого технічного рішення полягають у посиленні оптичного поля на резонансній частоті у середині РФД. Це дає можливість при малій активній області (декілька нанометрів) отримати високу КЕ. При цьому швидкісні характеристики РФД залишаються високими завдяки малому розміру активної області. Посилення оптичного поля та спектральні характеристики залежать від якості резонатора, який також є одночасно інструментом керування оптичними властивостями РФД.

Теоретичний опис РФД вперше був зроблений С. Унлю та Р. Кішино [1]. Подальшому дослідженню властивостей та фізичних принципів роботи РФД було присвячено чимало публікацій, але викладені в них наукові результати потребують уточнень, завдяки яким можна удосконалити прилад. КЕ таких приладів ще недостатня для того, щоб вони могли бути використані в приладобудуванні. Складність отримання високої КЕ пов'язана з відсутністю теоретичної моделі, в якій об'єднанні геометричні параметри, процеси поглинання й процеси електричного характеру. Результати теоретичного опису з урахуваннями широкого спектру явищ повинні встановити фізичні закономірності, що приводять до унікальних залежностей оптичних спектральних характеристик РФД від геометричних параметрів та температури. Детальний аналіз процесів поглинання, поєднаний з аналізом оптичних, температурних та електричних властивостей та процесів, відкриває шляхи до покращення вже існуючих РФД та до проектування нових оптоелектронних приладів з високою КЕ. У зв'язку з викладеним вище тема

дисертації, в якій теоретично описані процеси детектування випромінювання у РФД та досліджені їх спектральні властивості, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами. Дисертацію виконано на кафедрі фізичних основ електронної техніки Харківського національного університету радіоелектроніки (ХНУРЕ). Отримані в роботі результати були використані в ході виконання держбюджетних науково-дослідних праць № держреєстрації 0105U002992 "Взаємодія когерентного оптичного електромагнітного випромінювання з матеріалами активних та пасивних середовищ та елементна база повністю оптичних систем", № держреєстрації 0108U002217 "Фізичні основи формування частотних характеристик напівпровідникових та чип лазерів для нанотехнології", № держреєстрації 0110U002594 "Теоретичні основи мікроелектронних систем проектування та технології їхнього виробництва для гнучких інтегральних систем". Низка результатів була отримана у рамках міжнародного співробітництва ХНУРЕ з університетами Гуанохуато (Мексіка), Гванчжу (Р. Корея), Чонбук (Р. Корея).

Мета і задача дослідження. Метою дисертаційної роботи є рішення наукової задачі, яка полягає у встановленні фізичних закономірностей процесу детектування випромінювання у багатошарових напівпровідникових структурах на основі GaAs/InGaAs та GaN/AlGaIn квантоворозмірних активних шарів, теоретичного опису їх оптичних характеристик та динамічних характеристик носіїв заряду і встановлення сутності їх впливу на спектральні властивості.

Для досягнення поставленої мети необхідно було:

- виявити основні закономірності та чинники, які визначають квантову ефективність РФД на основі квантоворозмірних шарів;
- дослідити вплив геометричних та фізичних параметрів РФД із квантоворозмірним активним середовищем на спектри відбиття та проходження, а також спектри КЕ;
- дослідити вплив температури на коефіцієнти заломлення напівпровідникових шарів детектора та на КЕ;
- дослідити спектральні та електричні характеристики квантово-каскадних РФД та визначити внесок резонатора у обмеження ефекту заповнення підзон.

Об'єктом дослідження є резонансні фотодетектори з квантоворозмірним активним середовищем GaAs/InGaAs та квантово-каскадні резонансні фотодетектори GaN/AlGaIn.

Предметом дослідження є процеси поглинання, відбивання в багатошарових середовищах.

Методи дослідження. Теоретичне дослідження спектрів відбиття та проходження, а також спектрів КЕ проводили з використанням методу матриць переносу, поєднаного із законом збереження енергії. Аналіз коефіцієнту поглинання у квантово-каскадних структурах був здійснений з використанням чисельного рішення рівнянь Шрьодінгера і Блоха у формалізмі вторинного квантування. Фізичні параметри матеріалів розраховувались з використанням інтерполяції другого порядку.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі були досліджені процеси поглинання, відбиття і проходження випромінювання, впливу зміни

температури на показник заломлення напівпровідникових шарів та КЕ РФД і вперше отримано такі нові наукові результати:

1. Вперше теоретично описано компенсацію ефекту розузгодження спектральних характеристик лазерного випромінювача вертикального типу і детектора на основі GaAs/InGaAs та GaN/AlGaN матеріалів за рахунок формування плато квантової ефективності детектора.
2. Вперше визначена необхідна умова для виникнення плато спектральної характеристики КЕ у напівпровідникових багатошарових РФД із відбивачами Брегга.
3. Вперше теоретично описані процеси, що приводять до зниження ефекту заповнення підзон у квантово-каскадних GaN/AlGaN фотодетекторах за рахунок оптичного резонатора.
4. Отримав подальший розвиток теоретичний опис оптичних властивостей напівпровідникових багатошарових детектуючих пристроїв: вперше розглянуто резонансні GaN/AlGaN фотодетектори; визначено спектральні характеристики РФД із вбудованим мікрорезонатором.
5. Встановлена залежність квантової ефективності від коефіцієнтів відбиття дзеркал резонатора. Показано, що положення максимуму ефективності залежить від абсолютної величини коефіцієнта поглинання квантоворозмірного активного середовища детектора.
6. Показано, що збільшення температури підкладки приводить до зменшення амплітуди квантової ефективності і деформації плоскої вершини спектру в області резонансу, що обумовлено зміною показника заломлення.

Практичне значення одержаних результатів. Завдяки проведенню аналізу геометричних параметрів дзеркал резонатора встановлено екстремальний характер залежності КЕ РФД від коефіцієнтів відбиття дзеркал. Це може бути використано при створенні РФД для підвищення КЕ.

Під час виконання дисертаційної роботи було розроблено методику коректування спектральних характеристик при різних температурах підкладки, яка ґрунтується на розрахунку товщини шарів дзеркал детектора для компенсації зміни показника заломлення. Ця методика дає можливість визначити геометричні параметри шарів структури, враховуючи температуру підкладки та розподіл температури у РФД.

Урахування ефекту заповнення підзон у квантово-каскадних детекторах є важливим для моделювання характеристики поглинання та КЕ детектора. Одержані в роботі результати доводять доцільність використання високочастотного оптичного резонатора у квантово-каскадних детекторах.

Одержані результати можуть бути використані для подальшого розвитку теоретичних та експериментальних досліджень процесів детектування випромінювання і прикладних задачах, пов'язаних із створенням фотонних і оптоелектронних приладів.

Результати дисертаційної роботи були використані у навчальному процесі при підготовці дипломних робіт на факультеті Електронної техніки й читанні лекцій з

курсу «Квантоворозмірні прилади», а також при виконанні низки держбюджетних і ініціативних наукових тем наукової лабораторії «Фотоніка» ХНУРЕ.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати дисертації одержані особисто автором і проаналізовані ним разом з науковим керівником. Інші співавтори опублікованих праць брали участь у проведенні спільних досліджень, результати яких не увійшли в дисертацію. Здобувач здійснив: розробку методики обчислення спектральних характеристик; провів теоретичний опис впливу температурних ефектів на оптичні характеристики РФД; проаналізував результати обчислення спектрів для РФД із ефектом аномальної дисперсії; розробив програмний код для розрахунку чисельної моделі; систематизував та узагальнив дані; брав безпосередню участь у написанні статей і тез доповідей за темою дисертації.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідалися й обговорювалися на таких конференціях і семінарах: Міжнародний форум молодих науковців "Радіoeлектроніка і молодь в ХХІ столітті" (Харків 2006, 2007); Optics and high technology material science (Київ 2006); 6-th Belorussian-Russian workshop "Semiconductor Lasers and systems (Мінськ, 2007, 2009); The International workshop on Optoelectronic Physics and Technology (Харків 2007); Kharkiv young Scientist conference on Radiophysics and Electronics (Харків 2007), 1-st All-Ukrainian young conference on "Low Temperature Physics (Харків 2008), 12-th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (Одеса 2008); 8th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (Nottingham 2008); International CONFERENCE on ADVANCED OPTOELECTRONICS and LASERS (Алушта 2008, Севастополь 2010); NATO Advanced Research Workshop on Terahertz and Mid Infrared Radiation: Basic Research and Applications (Turunc-Marmaris 2009, Sevastopol 2010, Izmir 2012), SPIE Optics + Photonics 2011 (San Diego, CA, USA 2011), "Функциональная база нанoeлектроники", (Кацивели, Україна, 2011), семінарах лабораторії Фотоніка та Українського SPIE и IEEE РНО відділень.

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 25 наукових праць. З них 6 статей, у тому числі 1 без співавторів, 19 тез доповідей на міжнародних та вітчизняних конференціях, симпозіумах, семінарах.

Структура й об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, використаних джерел, одного додатку. Повний об'єм роботи становить 133 сторінок і містить 43 рисунка та 3 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації і дана оцінка сучасного стану наукової задачі, яка розглядається, сформульовано мету і завдання роботи, наукову новизну і практичну цінність одержаних результатів, подано інформацію про особистий внесок автора, відомості про апробацію роботи, про публікації та структуру дисертації.

Розділ 1 "Основні характеристики напівпровідникових резонансних фотодетекторів на квантоворозмірних структурах. Огляд літератури" містить огляд літератури, присвячений дослідженням напівпровідникових детекторів різних типів та фізичних процесів, які мають вплив на поглинання та КЕ.

Розділ 2 “Квантова ефективність резонансного фотодетектору”

присвячений дослідженню методів моделювання КЕ та спектрів відбиття, а також проходження випромінювання у РФД. Розглянуті методи моделювання розподілу температури у багатошаровій структурі фотодетектора та розрахунок поглинання у квантово-каскадних фотодетекторах.

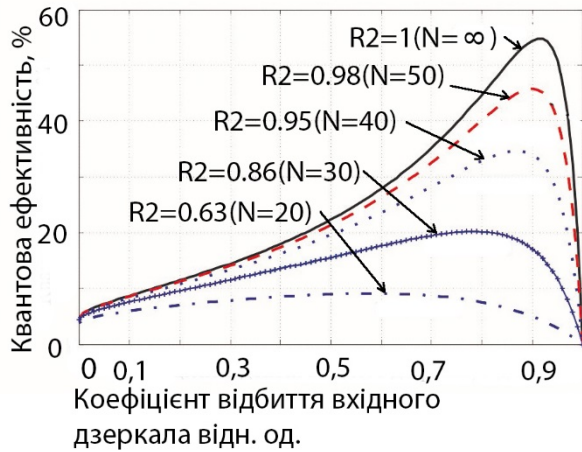


Рис. 1. Залежність КЕ від коефіцієнтів відбиття вхідного та вихідного дзеркал для коефіцієнту поглинання $\alpha = 1,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$. У дужках вказано число шарів нижнього дзеркала.

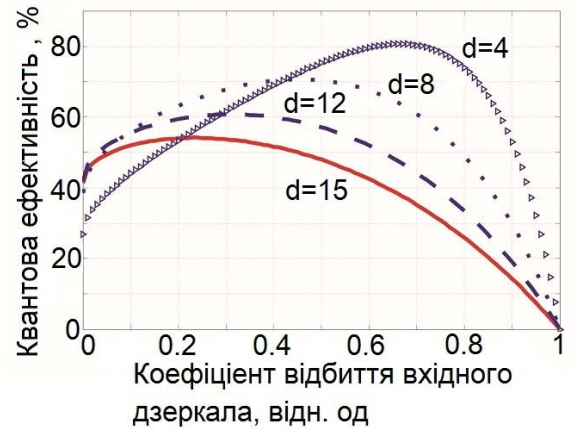


Рис. 2. Залежність КЕ від коефіцієнта відбиття вхідного дзеркала при різних товщині активного шару d .

У першому підрозділі розділу 2 викладені аналітична та чисельна моделі розрахунку КЕ та методів моделювання багатошарових структур. Аналітична модель ґрунтується на наближенні плоских хвиль та не враховує розподілу електромагнітного поля у резонаторі. Ця апроксимація слушна у випадках гетероструктур із малим контрастом діелектричних проникностей. Чисельна модель ґрунтується на методі матриць переносу, поєднаному із законом збереження енергії. Також у цьому підрозділі представлено аналіз та спосіб розрахунку бар'єрної КЕ, яка залежить від сил зображення та внутрішньої КЕ, яка має залежність від довжини вільного пробігу.

Другий підрозділ розділу 2 присвячений методам дослідження розподілу температури у багатошарових структурах. Розподіл температури в РФД було розраховано з використанням одномірного стаціонарного рівняння теплопровідності, яке було вирішено за методом кінцевих різниць. Значення теплопровідності були отримані з використанням інтерполяційних формул другого порядку. Вирішення рівняння теплопровідності здійснено з використанням методу кінцевих різниць.

У третьому підрозділі розділу 2 проаналізовано методи розрахунку поглинання у квантово-каскадних фотодетекторах. Хвильові функції електронів у зоні провідності отримані рішенням рівняння Шрьодінгера у одноелектронному наближенні. Мікроскопічна поляризація отримана з використанням рішення рівняння Блоха за методом Рунге-Кута у формалізмі вторинного квантування. Для розрахунку поглинання квантово-каскадної багатошарової структури було використано метод моделювання на основі однозонного кр-методу. У цьому поданні

гамільтоніан є системою лінійних алгебраїчних рівнянь і є нескінченною матрицею. Вибір числа елементів гамільтоніану дає можливість контролювати ступінь полінома, який виходить при обчисленні визначника матриці. Однозонне наближення відповідає поліному другого порядку. У цьому випадку, огинаючі функції можуть бути отримані з рівняння Бен-Даніеля-Дюка. Це рівняння доповнюється періодичними граничними умовами. Рівняння Пуассона і Бен-Даніеля-Дюка були чисельно вирішені з використанням методу кінцевих різниць. Моделювання переносу електронів і оптичного відгуку каскадного детектора ґрунтується на теорії матриці щільності. Коефіцієнт поглинання розраховано із діелектричної проникності, яка, в свою чергу, отримана із макроскопічної поляризації.

Розділ 3 "Чисельне моделювання квантової ефективності РФД на основі InGaAs/AlAs" присвячений дослідженню спектральних характеристик РФД та результатам моделювання КЕ та спектрів відбивання.

У першому підрозділі розділу 3 описуються геометричні та фізичні параметри багат шарової структури РФД на основі InGaAs/GaAs, що досліджується. Показано, що залежність КЕ від коефіцієнту відбиття вхідного дзеркала має екстремум та наведено аналіз залежності коефіцієнта відбиття від числа шарів дзеркала (рис.1).

Другий підрозділ розділу 3 присвячений визначенню впливу геометричних параметрів дзеркал на КЕ. Показано, що при збільшенні числа шарів дзеркал показник відбиття теж збільшується. При збільшенні шарів більше 15 з'являється насичення залежності, тобто збільшення числа шарів не приводить до значної зміни коефіцієнта відбиття. Це насичення є наслідком зменшення частки відображення окремого шару через збільшення їх загального числа.

У третьому підрозділі розділу 3 встановлено, що на величину КЕ РФД впливають два взаємозалежних чинники – товщина активної області та коефіцієнт поглинання (рис. 2). При сильному збільшенні коефіцієнта поглинання в активній області кількість проходів різко зменшується і достатньої інтерференції не спостерігатиметься. Як результат, високий коефіцієнт відбиття від детектора і відповідно низька добротність резонатора. При зменшенні коефіцієнта відбивання верхнього дзеркала необхідна кількість проходів випромінювання через резонатор зменшується і в результаті зростає добротність і КЕ. Якщо ж оптичне поглинання невелике, то потрібне велике число проходів резонатора. Наявність екстремуму визначається умовою здобуття максимального ефекту посилення в резонаторі, для якої необхідно, щоб випромінювання затримувалося в активній області. При цьому треба також враховувати товщину активного шару, який безпосередньо впливає на коефіцієнт ефективного поглинання.

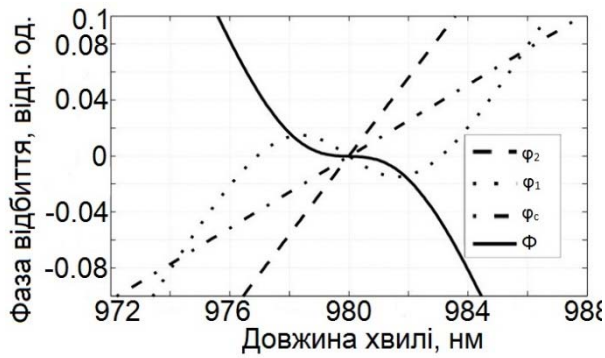


Рис. 3. Спектральна характеристика фази відбиття випромінювання для РФД з вбудованим мікрорезонатором.

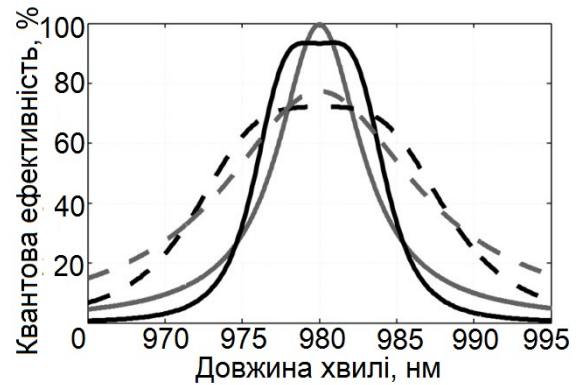


Рис. 4. Спектральна характеристика КЕ. Сірим - $N_1 = 8$ (суцільна крива); $N_1 = 3$ (пунктирна крива). Чорним, де $p = 21$, $q = 4.5$, $N_1 = 26$ (суцільна крива); $p = 15$, $q = 1.5$, $N_1 = 17$ (пунктирна крива).

У четвертому підрозділі розділу 3 розглядається багатошарова структура РФД із вбудованим у вхідне дзеркало мікрорезонатором за присутності якого виникає ефект аномальної дисперсії. Показано, що змінюючи число шарів вхідного дзеркала, можна досягти компенсації повної фази відбиття Φ у певному діапазоні довжини хвилі. У цьому діапазоні довжини хвилі, перша похідна повної фази відбиття буде близька до нуля (рис. 3). Встановлено, що у тому діапазоні довжин хвиль, в якому резонанс внутрішнього електромагнітного поля між дзеркалами практично не залежить від довжини хвилі, КЕ теж не змінюється, якщо смуга високого поглинання матеріалу досить широка. Ці умови приводять до появи плато КЕ (рис. 4). Наявність плато КЕ дає можливість зменшити необхідну точність при узгодженні частоти випромінювання лазера із спектральною характеристикою детектора. Також це дає можливість запобігти застосування систем перебудови частоти, що ґрунтуються на використанні температурного тюнінгу. Показані на рис. 4 криві відповідають різному p і q , які є числом пар шарів $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}/\text{GaAs}$ вхідного дзеркала $((\text{HL})^q\text{H}(\text{LH})^p)$ і повинні задовольняти $p > q$. Запропонована багатошарова структура має спектральну характеристику КЕ 92.5% та 6 нм спектральної ширини плато.

Розділ 4 "Залежність спектрів відбиття, проходження та квантової ефективності РФД від розподілу температурних полів." присвячений аналізу поведінки спектральних характеристик РФД за присутності температурного градієнту. Розглядалась багатошарова напівпровідникова структура на основі $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ поєднань та відбивачів Брегга із $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ в якості дзеркал резонатора.

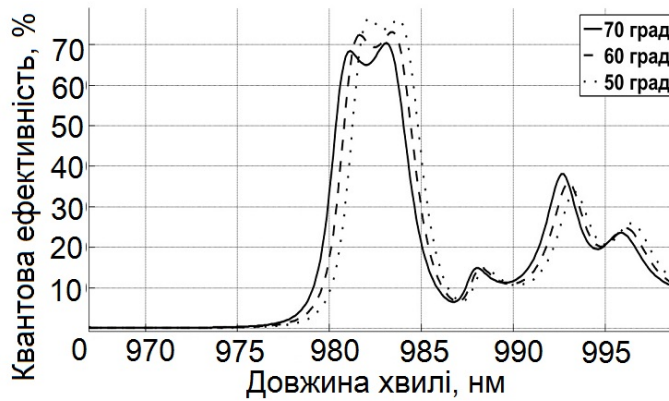


Рис. 5. Залежність КЕ від температури підкладки.

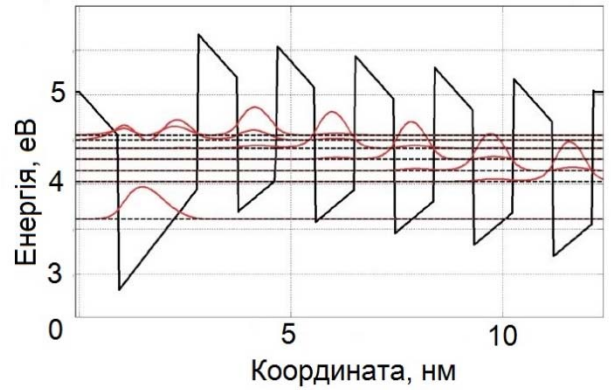


Рис. 6 Діаграма зони провідності одного каскаду із побудованими хвиловими функціями.

Перший підрозділ розділу 3 присвячений аналізу впливу температури на показник заломлення шарів детектора та дзеркал. Показано, що зсув робочої частоти приводить до неузгодженості спектральних характеристик передавача і детектора та може призвести до сильного погіршення характеристик оптичного з'єднання. Ця проблема стає особливо важливою в оптичних міжкомпонентних з'єднаннях на інтегральних схемах, де в якості пристроїв прийому-передачі вигідно використовувати лазери з вертикальним резонатором і РФД.

У *другому підрозділі* розділу 3 наведена багатошарова структура на основі InGaAs/GaAs, що досліджувалась та викладені розрахунки стаціонарного рівняння теплопровідності.

У *третьому підрозділі* розділу 3 досліджується температурна залежність коефіцієнту заломлення. Викладений метод дає можливість зробити аналіз впливу температури також для непрямозонних напівпровідників. Показано, що дія температури на показник заломлення сильно впливає на спектр квантової ефективності. Спостерігається зменшення амплітуди спектрального максимуму і "червоний" зсув. Для дзеркал AlGaAs/GaAs при зміні температури на 10°C спектральний максимум квантової ефективності зміщується в довгохвильову область на 1 нм (рис. 5). Деформація плоскої вершини спектру і зниження максимуму квантової ефективності є наслідком зміни спектральних характеристик. Нерівномірне збільшення оптичної товщини напівпровідникових шарів Брегговського дзеркала приводить до збільшення відбивання на резонансній довжині хвилі і зсуву спектру квантової ефективності.

Розділ 5 "Дослідження поглинання у детекторах квантово-каскадного типу" присвячений опису результатів дослідження процесів електронного переносу в РФД з активною областю, виготовленою на основі напівпровідникової квантово-каскадної структури.

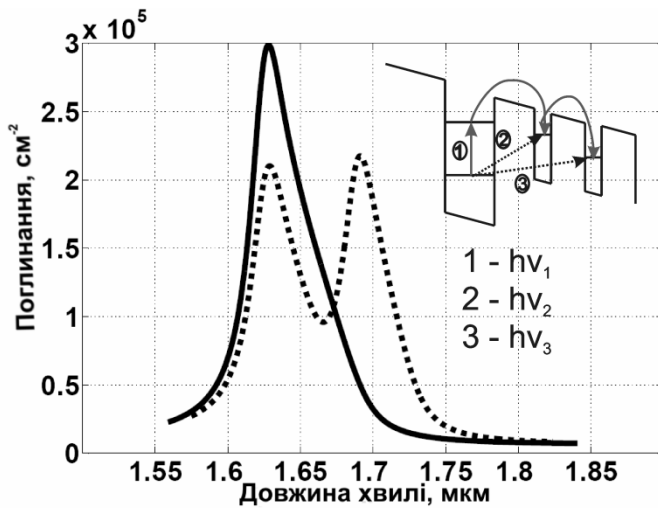


Рис. 7 Поглинання у квантово-каскадному детекторі. Суцільна крива – враховує тільки перехід 1, пунктирна – враховує переходи 1, 2, 3.

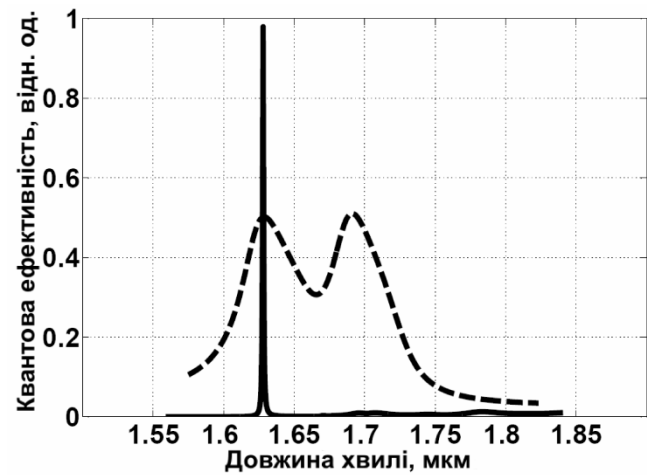


Рис. 8 Квантова ефективність квантово-каскадного детектора. Суцільна крива – із резонатором, пунктирна – без резонатору.

У першому підрозділі розділу 5 показана багатошарова структура квантово-каскадного РФД, який досліджується. Викладені основні властивості нітридних матеріалів та їх особливості важливі для багатошарових фотодетекторів. Оскільки наведені матеріали є сегнетоелектриками, в гетероструктурі виникає внутрішнє електричне поле високої напруженості. Наявність внутрішніх електростатичних полів приводить до нахилу потенціального рельєфу квантових ям.

У другому підрозділі розділу 5 представлені результати обчислення форм-факторів електрон-фононного розсіювання. Основним параметром, що характеризує процеси електронного переносу в екстракторі досліджуваної квантово-каскадної структури, є швидкість розсіювання на фононах або відповідний час життя електронів, що заселяють різні енергетичні підзони квантових ям екстрактора. Ці величини визначають швидкість оптичного відгуку фотодетектора і залежать як від температури, так і від концентрації електронів в гетероструктурі, яка, в свою чергу, визначається легуванням. Показано, що в процесі міжпідзонного розсіювання хвильові вектори початкового і кінцевого електронних станів також не можуть бути одночасно рівними нулю.

Третій підрозділ розділу 5 присвячений аналізу температурної залежності швидкості розсіювання електронів. Температурна залежність швидкості розсіювання електронів на фононах була отримана з використанням формули Харрісона, що ґрунтується на золотому правилі Фермі, яке описує ймовірності розсіювання електронів на фононах.

У четвертому підрозділі розділу 5 представлені результати обчислення відносної населеності підзон і динамічного відгуку квантово-каскадної структури. Хвильові функції електронів у зоні провідності одержані рішенням рівняння Шрьодінгера у одноелектронному наближенні (рис. 6). Мікроскопічна поляризація отримана з використанням рішення рівняння Блоха методом Рунге-Кута у формалізмі вторинного квантування. Коефіцієнт поглинання розраховано із

діелектричної проникності, яка, в свою чергу, одержана із макроскопічної поляризації.

П'ятий підрозділ розділу 5 присвячений дослідженню електронних переходів у квантово-каскадному фотодетекторі. Розглянуто ефект заповнення підзон і спектральна характеристика випромінювання. Дослідження проведені з використанням аналізу дипольних матричних елементів переходу, які отримані з використанням інтегралів перекриття хвильових функцій. Встановлено, що завдяки сильній внутрішній поляризації квантово-каскадної структури на основі нітридних з'єднань зонна структура активного середовища має нахил. Це дає можливість запобігти необхідності використання зовнішньої напруги (рис. 6). Показано, що ефект заповнювання зон приводить до деградації характеристики поглинання та КЕ у випадку нітридного квантово-каскадного детектора (рис. 7). Якщо імовірність переходу електрона на вищий енергетичний рівень у квантовій ямі може бути порівняна із імовірністю переходу у найближчу квантову яму, виникає ефект заповнювання зон. Цей ефект приводить до зменшення поглинання, яке відбувається завдяки заповненню рівня енергії в наступній квантовій ямі, блокує таким чином переміщення збуджених електронів через каскад згідно з твердженням принципу Паулі.

Шостий підрозділ розділу 5 присвячений аналізу спектрів відбиття та проходження багатошарового резонатора, заповненого повітрям. Щоб оцінити ефективність застосування запропонованої напівпровідникової багатошарової структури резонансного фотодетектора необхідно вивчити характеристики резонатора, в якому відсутні шари напівпровідника.

Сьомий підрозділ розділу 5 присвячений спектральним характеристикам квантово-каскадного резонансного фотодетектора на основі GaN/AlGaN. Запропоновано спосіб зменшення впливу ефекту заповнення підзон, який був розглянутий у підрозділі 5.5. Використання високоякісного резонатора створює можливість отримати вузький спектральний діапазон випромінювання, яке потрапляє у активне середовище (рис. 8). Внаслідок цього зменшується число електронних переходів із базового енергетичного рівня поглинаючої ями до найближчої квантової ями $h\nu_2$. Показано, що таким чином можна запобігти ефекту заповнювання зон та суттєво підвищити КЕ детектора. На спектральній характеристиці поглинання виникає додатковий максимум, який відповідає енергії переходу $h\nu_2 = 0,7351$ (1,691 мкм). При цьому спостерігається зменшення поглинання на основній частоті і $\alpha(h\nu_1) < \alpha(h\nu_2)$, що є наслідком більш сильного перекриття хвильових функцій енергетичних станів електронів у разі переходу 2. Це повинно бути враховано під час моделювання поглинання та КЕ квантово-каскадних детекторів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено поставлену задачу, яка полягає у встановленні фізичних закономірностей процесу детектування випромінювання у багатошарових напівпровідникових структурах на основі GaAs/InGaAs та

GaN/AlGaN квантоворозмірних активних шарів, теоретичного опису їх оптичних характеристик та динамічних характеристик носіїв заряду і встановлення сутності їх впливу на спектральні властивості. Основні наукові та практичні результати такі:

1. На основі побудованого теоретичного опису оптичних властивостей РФД досліджені спектри відбиття, поглинання та КЕ. Встановлено закономірність поведінки спектрів відбиття та КЕ від геометричних параметрів напівпровідникової багатошарової структури РФД. Показано, що залежність КЕ від коефіцієнта відбиття вхідного дзеркала має екстремум, положення якого залежить від абсолютного значення коефіцієнта поглинання. Визначено, що збільшення товщини активної квантової ями приводить до зниження внутрішньої КЕ за рахунок збільшення непружного розсіяння збуджених електронів.
2. Використання вхідного дзеркала з вбудованим мікрорезонатором дає можливість отримати плато спектру КЕ завдяки ефекту аномальної дисперсії. Доведено, що необхідною умовою для виникнення плато спектру КЕ є $\partial\phi(\omega)/\partial\omega = 0$. Подальший аналіз показав, що ця умова може бути виконана шляхом підбору положення і товщини дефекту мікрорезонатора у вхідному дзеркалі. Мікрорезонатор повинен знаходитись ближче до зовнішнього краю дзеркала, яке є відбивачем Бреґґа зі структурою $((\text{HL})^q\text{H}(\text{LH})^p)$. Тобто, умова $p > q$ теж повинна бути виконаною.
3. Вперше теоретично описано компенсацію ефекту розузгодження спектральних характеристик лазерного випромінювача і детектора за рахунок формування плато КЕ РФД. Запропонована напівпровідникова багатошарова структура має ширину плато КЕ 6 нм, тому такий детектор може бути використаний у системах передачі даних із лазерами вертикального типу.
4. Шляхом рішення рівняння теплопровідності за методом кінцевих різниць отримано розподіл температури у багатошаровій структурі РФД. Розв'язано задачу щодо встановлення залежності показників заломлення напівпровідникових матеріалів від температури. Показано, що зміна показника заломлення для прямозонних та непрямозонних напівпровідників має однаковий характер. У температурній смузі 50-70°C зміна показника заломлення для *GaAs* склала 0,02.
5. Встановлена закономірність зміни форми спектру та його зсув від розподілу температурного поля у структурі. Вперше показано, що підвищення температури підкладки призводить до нерівномірної зміни показників заломлення напівпровідникових шарів дзеркал резонатора. Доведено, що збільшення температури підкладки призводить до зменшення амплітуди квантової ефективності і деформації плоскої вершини спектру в області резонансу. Для дзеркал AlGaAs/GaAs при зміні температури на 10°C спектральний максимум квантової ефективності зміщуються в довгохвильову область на 1 нм.
6. Вперше детально проаналізовано ефект заповнення підзон у квантово-каскадних детекторах. Встановлена закономірність поглинання випромінювання у квантово-каскадних структурах при сильному впливі ефекту

заповнення підзон. Показано, що завдяки перекриття хвильових функцій електрони здійснюють переходи до наступної квантової ями у каскаді. Подальший аналіз показав, що спектральна характеристика поглинання за рахунок цього ефекту має додатковий максимум, а абсолютна величина поглинання зменшується.

7. Вперше теоретично описані процеси, що приводять до зниження ефекту заповнення підзон. Показано, що завдяки вузькій смузі проходження резонатора число електронних переходів до найближчої квантової ями може бути зменшене до 20%.
8. Зменшення числа пар шарів приводить до розширення і зсуву піку максимуму КЕ. При зменшенні числа шарів Брегговського дзеркала зменшується і ефективна глибина проникнення випромінювання в дзеркало. Це пояснює малий зсув положення піку пропускання резонатора і квантової ефективності. Показано, що зменшення коефіцієнта відбивання від вхідного дзеркала є причиною розширення смуги пропускання. Зменшення числа шарів вхідного дзеркала на 1-у пару (з 7-ми пар до 5-ти) збільшує на півширину спектрального максимуму удвічі а проходження на $h\nu_2 = 0,7351$ (1,691 мкм) зростає до 40%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Gryshchenko S. V.** Quantum efficiency of the resonant photodetector for ultrashort optical connections / S. V. Gryshchenko, A. A. Dyomin, V. V. Lysak, S. I. Petrov // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2008. – Vol. 67, № 19. – P. 1749–1763.
2. **Gryshchenko S. V.** Spectral characteristics of quantum efficiency of resonance cavity photodetector with temperature gradient / S. V. Gryshchenko // *Vestnik of Kharkov National University im. V. N. Karasina*. – 2009. – Vol. 15, № 883. – P. 8–11.
3. **Gryshchenko S. V.** Influence of anomalous dispersion mirror properties on the quantum efficiency of InGaAs/GaAs resonant cavity photodetector / S. V. Gryshchenko, A. A. Dyomin, V. V. Lysak, I. A. Sukhoivanov // *Opto-Electronics Review*. – 2011. – Vol. 19, № 3. – P. 296–300.
4. **Gryshchenko S. V.** Modeling of Optical Spectral Characteristics of Nitrides-Based Quantum-Cascade Detectors / S. V. Gryshchenko, M. V. Klymenko, V. V. Lysak, I. A. Sukhoivanov // *Terahertz and Mid Infrared Radiation. Detection and Applications* / ed. M. F. Pereira, O. Shulica. – Berlin : Springer, 2011. – P. 59–64. – (NATO Science for Peace and Security. Series B : Physics and Biophysics).
5. **Gryshchenko S. V.** Temperature dependence of electron transport in GaN/AlGaIn quantum cascade detectors / S. V. Gryshchenko, M. V. Klymenko, O. V. Shulika, I. A. Sukhoivanov, V. V. Lysak // [Superlattices and Microstructures](#). – 2012. – [Vol. 52, № 4](#). – P. 894–900.
6. **Gryshchenko S. V.** Population dynamic in quantum cascade GaN/AlGaIn photodetector structure / S. V. Gryshchenko, V. V. Lysak, I. A. Sukhoivanov // *Terahertz*

and Mid Infrared Radiation. Detection and Applications / ed. M. F. Pereira, O. Shulica. – Berlin : Springer, 2013. – P. 33–38. – (NATO Science for Peace and Security. Series B : Physics and Biophysics).

7. Грищенко С. В. Исследование влияния спин-орбитального взаимодействия на спектры усиления инжекционных полупроводниковых лазеров / С. В. Грищенко, М. В. Клименко // Материалы 9-го Междунар. молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», 19–21 апр. 2005 г. – Харьков, 2005. – С. 137.

8. Грищенко С. В. Исследование квантовой эффективности резонансного GaAs фотодетектора / С. В. Грищенко, М. В. Клименко // Материалы 10-го юбилейного Междунар. молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», 10–12 апр. 2006 г. – Харьков, 2006. – С. 161.

9. Gryshchenko S. V. Quantum efficiency of the GaAs/InGaAs resonant cavity enhanced photodetector for the ultrashort optical connection / S. V. Gryshchenko, A. A. Dyomin, V. V. Lysak, I. A. Sukhoivanov // Proceeding of the science conference «Scientific Problems of Optics and High Technology Material Science» (SPO-2006). – Kiev, 2006.

10. Грищенко С. В. Влияние сил изображения на движение электронов в гетероструктуре InGaAs/GaAs / С. В. Грищенко, А. А. Демин // Материалы 11-го междунар. молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», 10–12 апр. 2007 г. – Харьков : ХНУРЭ, 2007. – Ч. 1. – С. 239.

11. Gryshchenko S. V. Influence of mirrors reflectivity properties on the quantum efficiency of InGaAs/GaAs resonant cavity enhanced photodetector / S. V. Gryshchenko, A. A. Dyomin, V. V. Lysak, I. A. Sukhoivanov // Proceeding of the 6th Belorussian-Russian workshop «Semiconductor Lasers and systems», June 4–8, 2007, Belorussia. – Minsk, 2007. – P. 179–182.

12. Gryshchenko S. V. Theoretical study of the quantum efficiency of InGaAs/GaAs resonant cavity enhanced photodetectors / S. V. Gryshchenko, A. A. Dyomin, V. V. Lysak // Proceeding of the International Workshop on Optoelectronic Physics and Technology, June 20–22, 2007, Ukraine. – Kharkov, 2007. – P. 20–22.

13. Gryshchenko S. V. Calculation the quantum efficiency spectrum of resonant cavity enhanced photodetector with top mirror defect / S. V. Gryshchenko, A. A. Dyomin, V. V. Lysak // Proceeding of the Kharkiv young Scientist conference on Radiophysics and Electronics (YSC), Dec. 12–14, 2007. – Kharkiv, 2007. – P. 93.

14. Gryshchenko S. V. Effect of anomalous dispersion layer thickness on optical absorption in resonant-cavity detector / S. V. Gryshchenko, A. A. Dyomin, V. V. Lysak, I. A. Sukhoivanov // 1st All-Ukrainian young conference on «Low Temperature Physics», May 20–23, 2008 / B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Science of Ukraine. – Kharkov, 2008. – P. 114.

15. Gryshchenko S. V. Influence of anomalous dispersion layer thickness and position on optical absorption and quantum efficiency in the resonant-cavity detector / S. V. Gryshchenko, A. A. Dyomin, V. V. Lysak, I. A. Sukhoivanov // Proceeding of the 12th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, June 29 – July 2, 2008. – Odesa, 2008. – P. 133–135.

16. Gryshchenko S. V. Optical absorption and quantum efficiency in the resonant-cavity detector with anomalous dispersion layer / S. V. Gryshchenko, A. A. Dyomin,

- V. V. Lysak, I. A. Sukhoivanov // Proceeding of IEEE 8th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, NUSOD'08, Sept. 1–4, 2008, University of Nottingham, United Kingdom. – IEEE, 2008. – P. 77–78.
- 17. Gryshchenko S. V.** Quantum efficiency and reflection in resonant cavity photodetector with anomalous dispersion mirror / S. V. Gryshchenko, A. A. Demin, V. V. Lysak // Proceeding of the 4th International CONFERENCE on ADVANCED OPTOELECTRONICS and LASERS, Sept. 29 – Oct. 4, 2008, Alushta, Crimea. – Kharkiv, 2008.
- 18. Gryshchenko S. V.** The thermal shift effect of absorption spectra in RCE detectors / S. V. Gryshchenko, M. V. Klimenko, V. V. Lysak, I. A. Sukhoivanov // Proceeding of the 7th Belarusian-Russian Workshop «Semiconductor Lasers and systems», June 1–5, 2009, Belarus. – Minsk, 2009. – P. 250.
- 19. Gryshchenko S. V.** Absorbtion and Quantum Efficiency Calculation for Quantum Cascade Photodetector / S. V. Gryshchenko, M. V. Klimenko, O. V. Shulika, V. V. Lysak // NATO Advanced Research Workshop on Terahertz and Mid Infrared Radiation: Basic Research and Applications, TERA–MIR 2010, Sept. 12–14, 2010, Ukraine. – Sevastopol, 2010. – P. 278–279.
- 20. Gryshchenko S. V.** Temperature dependence of electron transport in GaN/AlGaIn quantum cascade detectors / S. V. Gryshchenko, M. V. Klymenko, V. V. Lysak, O. V. Shulika, I. A. Sukhoivanov // Proceedings of the SPIE. – 2011. – Vol. 8155 : Infrared Sensors, Devices, and Applications; and Single Photon Imaging II, August 22–25, 2011, San Diego, California, USA. – P. 81550O-1–81550O-6.
- 21. Sukhoivanov I. A.** Electron transport in quantum cascade photodetectors / I. A. Sukhoivanov, S. V. Gryshchenko, M. V. Klymenko, O. V. Shulika, S. O. Iakushev, G. V. Tkachenko // Функціональна база наноелектроніки : сб. науч. тр. IV Междунар. науч. конф., 30 сент. – 3 окт. 2011 г. – Харьков ; Кацивели, 2011. – С. 56–59.
- 22. Sukhoivanov I. A.** Optical spectroscopic characterization of the indium surface segregation in InGaIn/GaIn quantum well structures” / I. A. Sukhoivanov, S. V. Gryshchenko, M. V. Klymenko, O. V. Shulika, S. O. Iakushev // Функціональна база наноелектроніки : сб. науч. тр. V Междунар. науч. конф., 30 сент. – 5 окт. 2012 г. – Харьков ; Кацивели, 2012. – С. 433–437.
- 23. Gryshchenko S. V.** Population dynamic in quantum cascade GaN/AlGaIn photodetector structure / S. V. Gryshchenko, M. V. Klymenko, V. V. Lysak, I. A. Sukhoivanov // Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Detection of Explosives and CBRN (Using Terahertz), TERA-MIR 2012, Nov. 3–6, 2012, Cesme, Izmir, Turkey. – Berlin : Springer, 2013. – P. 33–38.
- 24. Klymenko M. V.** Optical gain modulation of quantum-cascade lasers via interband optical pumping / M. V. Klymenko, S. I. Petrov, S. V. Gryshchenko // Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Detection of Explosives and CBRN (Using Terahertz), TERA-MIR 2012, Nov. 3–6, 2012, Cesme, Izmir, Turkey. – Berlin : Springer, 2013. – P. 17–18.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Unlu M. S. Resonant Cavity enhanced photonic devices / M. S. Unlu, S. Strite // Journal of Applied Physics. – 1995. – Vol. 78, № 2. – P. 607–639.

АНОТАЦІЯ

Грищенко С.В. Спектральні властивості фотодетекторів на багатошарових напівпровідникових структурах на основі GaAs/InGaAs та GaN/AlGaN матеріалів із вбудованим мікрорезонатором. - Рукопис

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика. – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 2014;

У дисертації проведено теоретичний опис та дослідження квантової ефективності напівпровідникового резонансного фотодетектора (РФД). Були одержані залежності квантової ефективності від коефіцієнта відбивання вхідного дзеркала резонатора при різних параметрах багатошарової структури. Визначені значення коефіцієнта відбивання вхідного дзеркала в залежності від фізичних параметрів структури. Використання мікрорезонатора, вбудованого у вхідне дзеркало, дало можливість отримати плато квантової ефективності РФД.

Встановлена залежність спектрів відбивання і квантової ефективності РФД від температури підкладки. З використанням математичної моделі, яка ґрунтується на вирішенні рівнянь Шредінгера і Блоха у формалізмі вторинного квантування досліджені дипольні матричні елементи переходів і спектр поглинання квантово-каскадних фотодетекторів. Показано, що на поглинання випромінювання в квантово-каскадних фотодетекторів на внутрішньозонних переходах істотно впливає ефект заповнення підзон. Запропоновано спосіб зменшення впливу цього ефекту за рахунок використання оптичного резонатора з високою добротністю. З використанням математичного моделювання поглинання в квантово-каскадному РФД на основі нітрідних з'єднань отримано зниження впливу ефекту на 80%.

Ключові слова - Квантова ефективність, спектри відбивання, поглинання, ефект заповнення підзон, резонансний фотодетектор, квантово-каскадний фотодетектор, розподілений відбивач Брегга.

АННОТАЦИЯ

Грищенко С.В. Спектральные свойства фотодетекторов на многослойных полупроводниковых структурах на основе GaAs/InGaAs и GaN/AlGaN материалов с встроенным микрорезонатором. - Рукопись

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика, лазерная физика. – Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, 2014

В диссертации проведены теоретическое описание и исследование квантовой эффективности полупроводникового резонансного фотодетектора (РФД). Математическая модель включает физические параметры фотодетектора и учитывает длину волны излучения, отражательную способность зеркал и оптическое поглощение во всех слоях детектора. Были получены зависимости квантовой эффективности от коэффициента отражения входного зеркала резонатора при различных параметрах структуры. Найдены значения коэффициента отражения верхнего зеркала в зависимости от физических параметров структуры. Использование микрорезонатора, встроенного во входное зеркало, позволило получить плато квантовой эффективности РФД.

1. Внедрение в входное зеркало микрорезонатора полуволновой толщины приводит к возникновению эффекта аномальной дисперсии. Показано, что изменяя число слоев входного зеркала, можно достичь компенсации полной фазы отражения Φ в определенном диапазоне в окрестности резонансной длины волны. В этом диапазоне длины волны, первая производная полной фазы отражения будет близка к нулю. Установлено, что в том диапазоне длин волн, в котором резонанс внутреннего электромагнитного поля между зеркалами практически не зависит от длины волны, КЭ тоже не меняется, если полоса высокого поглощения материала достаточно широка. Эти условия приводят к появлению плато КЭ. Доказано, что необходимым условием для образования плато спектра КЭ является $\partial\varphi(\omega)/\partial\omega = 0$. Выполнение этого условия достигается путем подбора положения и толщины микрорезонатора в верхнем зеркале. Микрорезонатор должен находиться ближе к внешнему краю зеркала, которое представляет собой отражатель Брегга со структурой $((HL)^qN(LH)^p)$, причем условие $p > q$ также должно быть выполнено.

Исследована зависимость спектров отражения и квантовой эффективности РФД от температуры подложки. Одним из ключевых параметров, определяющих квантовую эффективность фотодетектора, является коэффициент поглощения. Его расчет, исходя из геометрических параметров и материалов активной области, представляет собой задачу, которая состоит из нахождения спектра энергетических состояний электронов и дырок и вычисления неравновесного распределения носителей заряда в структуре, учитывая, основываясь на тщательном изучении процессов электронного переноса и учитывая различные процессы рассеяния носителей заряда. В диссертационной работе энергетический спектр электронов и дырок был получен с использованием kr -метода в приближении огибающей

функции. Результатом применения этих методов является решение уравнения Бен-Даниеля-Дюка совместно с уравнением Пуассона с использованием метода конечных разностей. Уравнение Пуассона было решено в процессе самосогласованной процедуры для учета экранирования потенциального рельефа гетероструктуры электронно-дырочной плазмой. Моделирование переноса электронов и оптического отклика каскадного детектора основано на теории матрицы плотности. Усреднение К-зависимых скоростей рассеяния приводит к избавлению от зависимости элементов матрицы плотности от волнового вектора, что значительно уменьшает число кинетических уравнений. Время эволюции элементов матрицы плотности является решением уравнения Лиувилля фон-Неймана.

С помощью математической модели, основанной на решении уравнений Шрёдингера и Блоха в формализме вторичного квантования, исследованы дипольные матричные элементы переходов и спектр поглощения квантово-каскадных фотодетекторов. Волновые функции используются для вычисления дипольного матричного элемента, определяющего правила отбора для оптических межзонных переходов. Параметры уравнений, определяющие зонную структуру и волновые функции носителей заряда, связаны с параметрами материалов и геометрией гетероструктуры. Показано, что на поглощение излучения в квантово-каскадных фотодетекторах на внутризонных переходах существенно влияет эффект заполнения подзон. Предложен способ уменьшения влияния этого эффекта за счет использования оптического резонатора с высокой добротностью. С помощью математического моделирования поглощения в квантово-каскадном РФД на основе нитридных соединений получено понижение влияния эффекта на 80%.

Ключевые слова - Квантовая эффективность, спектры отражения, поглощения, эффект заполнения подзон, резонансный фотодетектор, квантово-каскадный фотодетектор, распределенный Брегговский отражатель.

SUMMARY

Gryshchenko S.V. Spectral properties of semiconductor multi-layered photodetector based on GaAs/InGaAs and GaN/AlGaIn materials with microresonator – Manuscript.

Thesis for a doctor philosophy degree (Ph.D.) in physical-mathematical sciences by according to scientific specialty 01.04.05 – optics, laser physics – V.N. Karazin Kharkiv national university, Kharkiv, 2014

In dissertation the theoretical description and research of quantum efficiency of semiconductor resonance photodetektor (RFD) is presented. Dependences of quantum efficiency from top mirror reflectivity were got at the different parameters of structure.

The values of the top mirror reflectivity are found depending on the physical parameters of structure. Use of microcavity, built-in in a top mirror allowed to get the quantum efficiency flat-top in the RFD. With the use of method of harmonic oscillators dependence the spectrums of reflection and quantum efficiency of the temperature of RP substrate has been investigated.

By a mathematical model based on the solving of Schrödinger of and Blokh equations the dipole transitions matrix elements and spectrum of absorption of quantum-cascade photodetector are investigated. It is showed that subband filling effect has significantly influence on absorption of radiation in quantum-cascade photodetectors.

The method of diminishing of influence of this effect is offered due to the use of optical resonator with high good quality. Modeling of absorption in quantum-cascade RFD on the basis of nitride compounds shows lowering influence of this effect by 80%.

Keywords - Quantum efficiency, reflection, absorption spectrum, subband filling effect, resonance photodetector, quantum-cascade photodetector, distributed Bragg reflector.