

Вінницький національний технічний університет
 Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
 Кафедра Радіотехніки
 Освітньо-кваліфікаційний рівень Магістр
 Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
 (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри РТ
 д.т.н., професор О.В. Осадчук
 “ ” _____ 201_

року

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Мельника Ярослава Віталійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Оптико-електронні радіотехнічні пристрої на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором»
 керівник роботи Осадчук Володимир Степанович, д.т.н., професор кафедри РТ
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
 затверджені наказом вищого навчального закладу від “02” 10 2019 року №254
2. Строк подання студентом роботи 17 грудня 2019 року.
3. Вихідні дані до роботи: - центральна частота генерації радіосигналів – 1,12 ГГц із вихідною по-тужністю 0,3 мВт (1,45 дБм); - коефіцієнт корисної дії 7,5%; - струм живлення 15 мА при напрузі живлення 0,8 В.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити: Вступ. Отоелектронні квантові наноструктури. Лазери на квантових ямах. Наноелектронні фотодетектори. Розроблення та дослідження оптико-електронних пристроїв на основі резонансно-тунельних діодів. Економічна частина. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Перелік посилань. Додатки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Структурна та функціональна схеми радіотехнічного оптико-електронного пристрою на основі RTD-PD-LD технології. Будова та характеристика радіотехнічного оптико-електронного пристрою на основі RTD-PD-LD технології. Фізико-математична модель RTD-PD-LD. Математична модель RTD-PD-LD у нормованих змінних. Результати модельних досліджень радіотехнічного оптико-електронного пристрою на основі RTD-PD-LD технології з одним колом зворотного зв'язку. Результати модельних досліджень радіотехнічного оптико-електронного пристрою на основі RTD-PD-LD технології з двома колами зворотного зв'язку.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	д.т.н., професор Осадчук В.С.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	к.т.н., доцент Березюк О. В.		
Економічна частина	к.т.н., доцент Адлер О. О.		

7. Дата видачі завдання 04 жовтня 2019 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел. Вибір та узгодження теми МКР	02.09.2019-15.09.2019	
2.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	16.09.2019-22.09.2019	
3.	Затвердження теми. Розробка технічного завдання	23.09.2019-02.10.2019	
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми	03.10.2019-20.10.2019	
5.	Електричні розрахунки. Експериментальне дослідження	21.10.2019-29.10.2019	
6.	Розділ моделювання	30.10.2019-03.11.2019	
7.	Розробка графічної частини МКР	04.11.2019-10.11.2019	
8.	Аналіз економічної ефективності розробки	11.11.2019-15.11.2019	
9.	Охорона праці (ОП)	16.11.2019-22.11.2019	
10.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	23.11.2019-27.11.2019	
11.	Нормоконтроль	28.11.2019-29.11.2019	
12.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР	02.12.2019-06.12.2019	
13.	Захист МКР ЕК	18.06.2019-19.06.2019	

Студент

(підпис)

Мельник Я.В.

Керівник роботи

Осадчук В.С.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Мельник Я.В. Оптико-електронні радіотехнічні пристрої на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором. Магістерська кваліфікаційна робота. - Вінниця: ВНТУ, 2019. – 161 с. укр. мовою.

Бібліографій 84, ілюстрацій 40, таблиць 24.

У роботі наведено результати розроблення та дослідження оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором. Проведено аналіз новітніх НВЧ оптико-електронних квантових наноелектронних структур.

Розроблено структурну та функціональну схеми радіотехнічного оптико-електронного пристрою на основі RTD-PD-LD технології, а також цю конструкцію. Досліджено динаміку генерованих електричних коливань та отримано результати модельних досліджень радіотехнічного оптико-електронного пристрою на основі RTD-PD-LD технології з одним і двома колами зворотного зв'язку.

Графічна частина складається з 9 плакатів із результатами моделювання.

Також у роботі розроблено розділи економічної частини, охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: резонансно-тунельний ефект, резонансно-тунельний транзистор, резонансно-тунельний діод, квантова точка, генератор, випадковий сигнал, детермінований хаос, від'ємний опір.

Melnik Ya.V. Optoelectronic radio devices based on resonant-tunneled semiconductor structures with negative differential resistance. Master's thesis. - Vinnytsia: VNTU, 2019. - 161 p. ukr. language.

Bibliography 84, illustrations 21, table 24.

The paper presents the results of the development and research of optoelectronic radio engineering devices based on resonant tunneling semiconductor structures with negative differential resistance. The analysis of the latest microwave optoelectronic quantum nanoelectronic structures.

A structural and functional diagram of a radio-optical optical electronic device based on RTD-PD-LD technology was developed, as well as a whole design. The dynamics of the generated electric oscillations is investigated and the results of model studies of a radio-optical optical-electronic device based on RTD-PD-LD technology with one and two feedback circles are obtained.

The graphical part consists of 9 posters with simulation results.

Also, the sections of the economic part, occupational safety and emergency management are developed.

Key words: resonant tunneling effect, resonant tunneling transistor, resonant tunneling diode, quantum dot, generator, random signal, deterministic chaos, negative resistance

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ОТОЕЛЕКТРОННІ КВАНТОВІ НАНОСТРУКТУРИ	11
1.1 Завдання наноелектроніки.....	11
1.2 Напівпровідникові наноструктури	16
1.3 Структурний класифікатор по нанотехнологіям і наноматеріалам	18
2 ЛАЗЕРИ НА КВАНТОВИХ ЯМАХ	21
2.1. Основні принципи роботи напівпровідникового лазера	21
2.2 Умови роботи напівпровідникового лазера	23
2.3 Лазерний поріг	27
2.4 Гомоструктурний перехід і напівпровідникові лазери	29
2.5 Лазери на подвійній гетероструктурі.....	31
2.6 Лазер зі схованою гетероструктурою	33
2.7 Модуляція у лазерах	34
2.8 Об'ємні мікролазери	37
2.9 Джерела світла на квантових точках.....	41
2.10 Комп'ютерне моделювання лазера з подвійною гетероструктурою і роз- дільним обмеженням.....	45
3 НАНОЕЛЕКТРОННІ ФОТОДЕТЕКТОРИ.....	49
3.1. Інфрачервоні фотодетектори на квантових ямах.....	49
3.2. Енергетичний спектр електронів у квантовій ямі.....	51
3.3. Фоторезистивний ефект у структурах із квантовими ямами при межпідзонному поглинанні.....	55
3.4. Практична частина розділу	61
4 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ ДІОДІВ	65
4.1 Оптоелектронний генератор детермінованого хаосу типу Лієнара на основі резонансно-тунельних фотодіодів з колом запізнення у зворотному зв'язку	65
4.2 Опис RTD-PD і установка ОЕО	68
4.3 Опис математичної моделі	72
4.4 Результати експериментальних досліджень оптико-електронного ге- нератора з одним колом зворотного зв'язку	82
4.5 Результати експериментальних досліджень оптико-електронного ге- нератора з двома колами зворотного зв'язку	86

4.6 Результати математичного моделювання динаміки оптико-електронного генератора	91
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	98
5.1 Аналіз комерційного потенціалу розробки (технологічний аудит розробки) оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференціальним опором	98
5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної, дослідно-конструкторської та конструкторсько-технологічної роботи	104
5.3 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференціальним опором	112
5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та період їх окупності.....	114
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	117
6.1 Виробнича санітарія та гігієна праці.....	117
6.2 Технічні рішення щодо промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження.....	123
6.3 Визначення області працездатності оптико-електронного радіотехнічного пристрою в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій	126
6.4 Висновки до розділу	131
ВИСНОВКИ.....	132
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	134
Додаток А (Обов’язковий). Технічне завдання.....	141
Додаток Б (Обов’язковий). Структурна та функціональна схеми радіотехнічного оптико-електронного пристрою на основі RTD-PD-LD технології.....	150
Додаток В (Обов’язковий). Будова та характеристики радіотехнічного оптико-електронного пристрою на основі RTD-PD-LD технології	152
Додаток Д (Обов’язковий). Фізико-математична модель RTD-PD-LD.....	154
Додаток Е (Обов’язковий). Математична модель RTD-PD-LD у нормованих змінних	156
Додаток Ж (Обов’язковий). Результати модельних досліджень радіотехнічного оптико-електронного пристрою на основі RTD-PD-LD технології з одним колом зворотного зв’язку.....	158
Додаток К (Обов’язковий). Результати модельних досліджень радіотехнічного оптико-електронного пристрою на основі RTD-PD-LD технології з двома колами зворотного зв’язку	160

ВСТУП

Актуальність теми.

Нанотехнологія – це сукупність методів і прийомів, що забезпечують можливість контрольованим чином створювати й модифікувати об'єкти, що включають компоненти з розмірами менш за 100 нм, хоча б в одному вимірі, і в результаті цього отримати принципово нові якості, що дозволяють здійснювати їхню інтеграцію в повноцінно функціонуючі системи більшого масштабу. У більш широкому сенсі - цей термін охоплює також методи діагностики, характерології й досліджень таких об'єктів [1-3].

Наноматеріал – це матеріал, що містить структурні елементи, геометричні розміри яких, хоча б в одному вимірі, не перевищують 100 нм, і, завдяки цьому володіють якісно новими властивостями, у тому числі заданими функціональними й експлуатаційними характеристиками [1-3].

Наносистемна техніка – це створені повністю або частково на основі наноматеріалів і нанотехнологій функціонально закінчені системи й пристрої, характеристики яких кардинальним чином відрізняються від показників систем і пристроїв аналогічного призначення, створених по традиційних технологіях [3].

Розвиток сучасної напівпровідникової електроніки включає застосування нанотехнологій, які визначаються як наука й техніка створення, виготовлення, характеризації й реалізації матеріалів, функціональних структур і пристроїв на атомному, молекулярному й нанометровому рівнях. Нанотехнології повинні мати атомну точність при одержанні напівпровідникових наносистем з необхідним хімічним складом і конфігурацією й включають методи комплексної діагностики наноструктур, у тому числі контроль у процесі виготовлення й керування на цій основі технологічними процесами [4, 5].

Актуальність даної теми полягає в тому, що на даний час проводиться велика кількість досліджень в області досліджень квантових ефектів напівпровідників та їх застосування в мікроелектроніці та радіотехніці.

Аналіз останніх досліджень.

Розвиток нанотехнологій був стимульований розробкою напівпровідникових наноструктур, вирощених методами молекулярно-пучкової й металоорганічної

епітаксії, і створенням на їхній основі принципово нових приладів і пристроїв електроніки й оптоелектроніки, широко використовуваних зараз у системах зберігання, передачі й обробки інформації (лазери на квантових ямах і надрешітках, НВЧ - транзистори із двовимірним електронним газом та ін.) [6].

Потужним поштовхом розвитку нанотехнологій послужило відкриття в 80-х роках ХХ століття тунельної мікроскопії, ідеї якої лягли в основу розробки широкого спектра сучасних зондових методів діагностики матеріалів на нанорівні, а також ряду технологічних прийомів (нанолітографія, молекулярне складання, саморганізація). Істотно вдосконалені відомі технології (електронна й рентгенівська літографія, техніка сфальцьованих іонних пучків) і діагностичні методи (електронна мікроскопія надвисокого дозволу, сканувальна зондова мікроскопія, рентгенівські методи, у тому числі з використанням синхротронного випромінювання, фемтосекундна спектроскопія), що дозволяє контрольованим чином створювати наноструктури, наноматеріали й пристрої різного призначення на їхній основі [7,8].

Сучасний досвід розробки приладів і пристроїв на основі квантових гетероструктур (лазери на квантових точках, надшвидкодійні транзистори, запам'ятовувальні пристрої з гігантським магнітоопором) показує, що результати фундаментальних досліджень у цій області знаходять практичне застосування за досить короткий час. Ці досягнення вже в найближчі роки здатні привести до кардинальних змін у багатьох сферах людської діяльності - в електроніці, інформації, енергетиці, медицині й ін. По оцінках закордонних експертів обсяг світового ринку нанотехнологій до 2020 року складе понад 1 трлн. доларів США [9].

Розвиток в Україні нанотехнологій і пов'язаних з ними напрямків науки, техніки й виробництва спрямоване на підвищення конкурентоспроможності й розширення присутності України на світовому ринку, підвищення ступеня безпеки держави шляхом широкого впровадження спеціальної наносистемної техніки, удосконалювання озброєнь, військової й спеціальної техніки [10,11].

Метою роботи є розроблення та дослідження оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором.

Задачами дослідження є:

- розробка оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором;
- комп'ютерне схемотехнічне моделювання оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором;
- розрахунок електричних параметрів оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором;
- дослідження часових характеристик оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором;
- проведення розрахунків економічної частини та розділу охорони праці.

Об'єктом дослідження даної роботи є фізичні явища та ефекти, що відбуваються в тунельно-резонансних транзисторах та елементах функціональної електроніки, дія яких базується на тунельно-резонансному ефекті.

Предметом дослідження є часові та частотні параметри і характеристики сигналів тунельно-резонансних транзисторів, як елементів функціональної електроніки, дія яких базується на тунельно-резонансному ефекті.

Наукова новизна одержаних результатів – отримав подальший розвиток застосування тунельно-резонансних транзисторів, як елементів функціональної електроніки, дія яких базується на тунельно-резонансному ефекті.

Практична новизна одержаних результатів – полягає в отриманих нових результатах теоретичних і модельних досліджень радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором.

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи доповідалися та обговорювалися на XLVIII регіональна науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю

працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області (м. Вінниця, 9-10 березня 2019).

Публікації. За темою досліджень автором опубліковано 3 статті в збірнику праць міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування» (Вінниця, ВНТУ, 14-16 листопада 2019 р.) [12-14].

1 ОПТОЕЛЕКТРОННІ КВАНТОВІ НАНОСТРУКТУРИ

1.1 Завдання наноелектроніки

Сучасний науково-технічний прогрес безсумнівно визначається розвитком електроніки, основою якої є досягнення в різних областях фундаментальних наук, головним чином, фізики твердого тіла, фізики напівпровідників, а також твердотілої технології. Останні досягнення науки показують, що, на відміну від традиційної мікроелектроніки, потенційні можливості якої в найближче десятиліття, очевидно, будуть вичерпані, подальший розвиток електроніки можливо тільки на базі принципово нових фізичних і технологічних ідей [15, 16].

Так, протягом ряду десятиліть підвищення функціональної складності й швидкодії систем досягалося збільшенням щільності розміщення й зменшенням розмірів елементів, принцип дії яких не залежав від їхнього масштабу. При переході до розмірів елементів порядку десятків або одиниць нанометрів виникає якісно нова ситуація, яка полягає в тому, що квантові ефекти (тунелювання, розмірне квантування, інтерференційні ефекти) впливають на фізичні процеси в наноструктурах і функціонування електронних приладів на їхній основі.

Багатообіцяючим є також створення наноструктур, у яких роль функціональних елементів виконують окремі молекули. У перспективі це дозволить використовувати принципи прийому й переробки інформації, реалізовані в біологічних об'єктах (молекулярна наноелектроніка). Нові можливості в підвищенні потужності, температурної й радіаційної стійкості, розширенні діапазону частот, поліпшенні ергономічних характеристик приладів відкриває напрямок, у якому синтезуються ідеї й технологічні досягнення вакуумної й твердотілої електроніки (вакуумна наноелектроніка).

Створення наноструктур базується на новітніх технологічних досягненнях в області конструювання на атомному рівні твердотілих поверхневих і багатошарових структур із заданим електронним спектром і необхідними електричними, оптичними, магнітними й іншими властивостями. Необхідна зонна структура таких штучних матеріалів забезпечується вибором речовин, з яких виготовля-

ються окремі шари структури («зонна інженерія»), поперечних розмірів шарів (розмірне квантування), зміною ступеня зв'язку між шарами («інженерія хвильових функцій»). Поряд із квантово-розмірними планарними структурами (двовимірний електронний газ у квантових ямах, надрешітки) досліджуються одно- і нуль-мірні квантові об'єкти (квантові нитки й точки), інтерес до яких пов'язаний з надіями на відкриття нових фізичних явищ і, як наслідок, на одержання нових можливостей ефективного керування електронними й світловими потоками в таких структурах.

Нанотехнології покликані вирішити такі завдання в електроніці [17]:

- різке підвищення продуктивності обчислювальних систем;
- різке збільшення пропускної здатності каналів зв'язку;
- різке збільшення інформаційної ємності і якості систем відображення інформації з одночасним зниженням енерговитрат;
- різке підвищення чутливості сенсорних пристроїв і розширення спектра вимірюваних величин, що важливо, зокрема, для завдань екології;
- створення високоекономічних твердотілих освітлювальних приладів;
- істотне збільшення питомої ваги використання електронних і оптоелектронних компонентів у медичних, біологічних, хімічних, машинобудівних та інших технологіях.

Різне підвищення продуктивності обчислювальних систем необхідне у зв'язку з переходом технології інтегральних схем до нанометрового масштабу. У табл. 1.1 наведений прогноз зменшення характерних розмірів ІС пам'яті й процесорів (ITRS Roadmap 2002), у табл. 1.2 - перспектива зменшення енергії на одне перемикання.

Таблиця 1.1 – Прогноз зменшення характерних розмірів ІС пам'яті

	Year of production, нм	2003	2010	2016	2020
DRAM	1/2 Pitch	100	45	32	22
MPU	1/2 Pitch	107	45	32	22
MPU	Printed Gate Length	65	25	18	13
MPU	Physical Gate Length	45	18	13	9

Таким чином, розвиток «традиційної мікроелектроніки» має на увазі перехід до нанотехнологій. Розвиток нанотехнологій дозволить сконструювати й принципово нові елементи ІС, такі, наприклад, як «одноелектронні» пристрої, що споживають гранично малі енергії на перемикання, або надшвидкодіючі біполярні Si-Ge транзистори з базами товщиною в кілька нанометрів. Пристрої на основі наноструктур принципово необхідні й для зчитування інформації в обчислювальному процесі через гранично низькі рівні сигналів. Прикладом можуть служити магнітні зчитувальні пристрої, засновані на ефекті гігантського магнетосопротиву, що виникає в шаруватих металевих магнітвпорядкованих середовищах з товщиною шарів у кілька нанометрів.

Таблиця 1.2 – Енергія на одне перемикання

Рік	Енергія на перемикання, фДж
2003	0,137
2010	0,015
2016	0,107
2020	0,002

Різде збільшення пропускної здатності каналів зв'язку має на увазі створення високоефективних випромінюючих і фотоприймальних пристроїв для ВОЛС і пристроїв НВЧ техніки для терагерцового й субтерагерцових діапазонів. Слід зазначити, що ефективні лазерні діоди для ліній зв'язку є типовим продуктом нанотехнологій, оскільки вони являють собою квантоворозмірні наногетероструктури з характерною товщиною шарів у кілька нанометрів. Ефективні фотоприймальні пристрої також базуються на таких напівпровідникових гетероструктурах. Подальший розвиток випромінюючих і фотоприймальних приладів з неминучістю пов'язаний з розвитком нанотехнології квантових точок - нанообластей у напівпровіднику, що обмежують рух електронів у трьох на-

прямаках. Тут можна чекати появи пристроїв принципово нового типу, що використовують квантово-механічні закономірності.

Те ж відноситься й до твердотілих пристроїв НВЧ електроніки. Перехід на нанорівень дозволить істотно поліпшити характеристики НВЧ транзисторів і створити прилади, засновані на квантово-механічних ефектах (наприклад, резонансно-тунельні діоди й прилади на основі надрешіток).

Різка збільшення інформаційної ємності і якості систем відображення інформації з одночасним зниженням енерговитрат пов'язане з розвитком декількох напрямків. Насамперед, це монолітні й гібридні матриці світлвипромінюючих діодів (когерентних і некогерентних). І тут найбільш ефективні й багатofункціональні напівпровідникові джерела на основі наноструктур. Напівпровідникові лазери середньої й великої потужності, виготовлені на основі наноструктур, ефективні для використання в проєкційних системах різного призначення (у тому числі для проєкційних телевізорів). Наноструктуровані матеріали (наприклад, на основі вуглецевих нанотрубок) надзвичайно перспективні при створенні ефективних катодів для плазмених панелей будь-якої площі.

Різка підвищення чутливості сенсорних пристроїв і значне розширення спектра вимірюваних величин як шляхом поліпшення характеристик уже існуючих приладів і пристроїв при переході до розмірів, при яких стають істотними квантово-механічні ефекти, так і за рахунок створення принципово нових приладів, заснованих на можливості «калібрувати» різні об'єкти (атомні кластери й молекули) у нанометровому діапазоні розмірів і використовувати високу поверхневу чутливість наноструктурованих матеріалів. Прикладом використання нанотехнологій для таких цілей може служити створення на основі квантових напівпровідникових наноструктур лазерів далекого й середнього ІЧ діапазонів, що дозволяють контролювати забруднення атмосфери з високою чутливістю й точністю.

Створення високоекономічних твердотілих освітлювальних приладів — найважливіше завдання сучасного суспільства. На освітлення зараз витрачається близько 20 % споживаної у світі енергії, і переведення хоча б половини осві-

тлення на високоекономічні напівпровідникові джерела світла на основі наноструктур істотно зменшить світові витрати енергії.

Істотне збільшення питомої ваги використання електронних і оптоелектронних компонентів у медичних, біологічних, хімічних, машинобудівних та інших технологіях. Завдяки можливості створювати за допомогою нанотехнологій речовини й структури з наперед заданим оптичним спектром можна «набудувати» джерела й приймачі випромінювання, що дозволяє селективно впливати на біологічні й хімічні процеси й одержувати сигнали в необхідних спектральних діапазонах для контролю таких процесів. Інша важлива обставина полягає в тому, що саме завдяки застосуванню наноструктур вдається використовувати дуже компактні потужні джерела лазерного випромінювання. Це дозволить розвинути високоточні, економічні й екологічно чисті технології обробки матеріалів. Ці ж джерела дуже ефективні для застосування в медицині.

Інтерес до фізики низькорозмірних структур пов'язаний як із принципово новими фундаментальними науковими проблемами й фізичними явищами, так і з перспективами створення на основі вже відкритих явищ зовсім нових квантових пристроїв і систем із широкими функціональними можливостями для опто-і наноелектроніки, вимірювальної техніки, інформаційних технологій нового покоління, засобів зв'язку та ін. Результатом досліджень низькорозмірних систем стало відкриття принципове нових, а тепер уже широко відомих явищ, таких як цілочисельний і дробовий квантовий ефекти Хола у двовимірному електронному газі, вігнерівська кристалізація квазідвумірних електронів і дірок, виявлення нових композитних квазічастинок і електронних збуджень із дробовими зарядами, високочастотних блохівських осциляцій, а також багато чого іншого. Сучасні напівпровідникові лазери на гетеропереходах також засновані на використанні низькорозмірних систем (структури із квантовими ямами, самоорганізованими квантовими точками й квантовими нитками). Найбільш видатні досягнення в цій області відзначені трьома Нобелівськими преміями по фізиці (1985 р. - за відкриття квантового ефекту Хола; 1998 р. - за відкриття дробового квантового ефекту Хола; 2000 р. - за праці, що заклали основи сучасних інформаційних технологій).

Розвиток цієї області відкрило можливості конструювання засобами зонної інженерії й інженерії хвильових функцій і наступного виготовлення за допомогою сучасних високих технологій наноструктур (надрешітки, квантові ями, точки й нитки, квантові контакти, атомні кластери й т.д.) з електронним спектром і властивостями, необхідними для виявлення й вивчення нових фізичних явищ або для відповідних додатків. Сконструйовані в такий спосіб наноструктури є, по суті, штучно створеними матеріалами з наперед заданими властивостями.

Досягнення в розробці й виготовленні наноструктур різного призначення найбільшою мірою визначаються рівнем розвитку технологій, які дозволяють із атомною точністю одержувати наноструктури необхідної конфігурації й розмірності, а також методів комплексної діагностики властивостей наноструктур, включаючи контроль у процесі виготовлення (*in situ*) і керування на його основі технологічними процесами.

1.2. Напівпровідникові наноструктури

Використовуючи методи «зонної інженерії», можна конструювати квантово-розмірні структури із заданим електронним спектром і необхідними оптичними, електричними й іншими властивостями.

Квантові ями. Цим терміном позначаються системи, у яких є розмірне квантування руху носіїв заряду в одному напрямку. Спочатку основні дослідження квантових ям проводилися на інверсійних каналах кремнієвих МОН транзисторів, пізніше й дотепер широко досліджуються властивості квантових ям у гетероструктурах. Основні фізичні явища у квантових ямах: розмірне квантування електронного спектра, квантовий ефект Холу (цілочисельний і дробовий), при спеціальному готуванні дуже висока рухливість електронів. Основні методи одержання квантових ям на гетероструктурах: металоорганічна газова епітаксія й молекулярно-пучкова епітаксія.

Приладові застосування: високочастотні польові транзистори з високою рухливістю електронів, напівпровідникові гетеролазери й світлодіоди від ближнього ІЧ до блакитного світла, лазери далекого ІЧ діапазону, параметричні

джерела світла середнього ІЧ діапазону, фотоприймачі середнього ІЧ діапазону, примісні фотоприймачі далекого ІЧ діапазону, приймачі далекого ІЧ діапазону на квантовому ефекті Хола, модулятори в ближньому ІЧ діапазоні.

Квантові дроти – це системи, у яких досягнення носіїв заряду квантовано у двох напрямках. Перші квантові дроти виконувалися на основі квантових ям за допомогою створення потенційного рельєфу за допомогою двох затворів, розташованих над квантовою ямою. Основні фізичні явища у квантових дротах: квантування провідності, сильно корельований електронний транспорт. Основні методи одержання квантових дротів ті ж, що й квантових ям, плюс використання прецизійного травлення або спеціальних затворів. Приладових застосувань поки немає.

Квантові точки – наноб'єкти, у яких рух носіїв заряду квантований у всіх трьох напрямках. Мають дискретний енергетичний спектр (штучний атом). Основні фізичні явища у квантових точках: одноелектронні й однофотонні явища. Методи одержання ті ж, що й для квантових ям, однак трохи інші режими, якщо відбувається спонтанний ріст квантових точок по механізму Странські-Крастанова. Або використання прецизійної літографії для створення квантових точок із квантових ям.

Приладові застосування: лазери й світлодіоди в ближньому ІЧ діапазоні, фотоприймачі для середнього ІЧ діапазону, однофотонні приймачі, однофотонні генератори, одноелектронні транзистори.

Структури з тунельно-прозорими бар'єрами (системи квантових ям і надрешітки). Основні фізичні явища в таких системах: резонансне тунелювання; формування мінізонного спектра у надрешітках - періодичних системах, що містять багато квантових ям, розділених тунельно-прозорими бар'єрами; нелінійні електричні й оптичні явища у надрешітках. Методи вирощування цих структур ті ж, що й для квантових ям.

Приладові застосування: резонансно-тунельні діоди (генератори й змішувачі в гігагерцовому і терагерцовому діапазонах); потужні генератори й змішувачі на надрешітках: каскадні лазери середнього й далекого ІЧ діапазонів.

Фотонні кристали – системи, у яких є зонний спектр для фотонів. Основні фізичні явища: відсутність пропусчення (повне відбиття) світла в певному діапазоні частот, резонансні фотонні стани.

Можливі приладові застосування: ефективні лазери з низькими граничними струмами, системи керування світловими потоками.

1.3 Структурний класифікатор по нанотехнологіям і наноматеріалам

- Нанотранзистори.
- Мікросхеми на елементній базі наноелектроніки.
- Електронні наноконпоненти (елементна база) для інтегрованих надшвидкісних систем генерації, зберігання, передачі й обробки інформації.
- Оптичні наноконпоненти систем надшвидкісної «надщільної» високо захищеної передачі й обробки інформації.
- Магнітні наноконпоненти «надщільного» зберігання інформації
- Запам'ятовувальні пристрої мультитерабітної ємності. Спинтроніка.
- Наноструктуровані процесори.
- Твердотілі квантові комп'ютери
- Наноелементи й прилади з використанням квантових ефектів.
- Інтегральні наносенсорні пристрої мінімального розміру, ваги, енергоспоживання, здатні акумулювати, обробляти й передавати більші масиви даних.
- Надяскраві напівпровідникові діоди й потужні напівпровідникові лазери на основі нанорозмірних гетероструктур.
- Лазери на квантових ямах і надрешітках.
- Лазери на квантових точках.
- НВЧ транзистори із двовимірним електронним газом
- Запам'ятовувальні пристрої з гігантським магнітоопором
- Нові покоління сегнетоелектричних наноструктур для електроніки й пристроїв на їхній основі.
- Молекулярна наноелектроніка. Політроніка.

- Нанoeлектронні компоненти для датчиків, що реєструють і аналізують пристрої, що працюють в екстремальних умовах (переміщення, тиску, зношування, температури й ін.).
- Інформаційно-аналітичні системи для створення надійних віртуальних моделей нанопроцесів і нових наноструктур з використанням супер-ЕВМ.
- Системи віртуальної реальності, засновані на наноструктурній електроніці, що забезпечують більш доступні й ефективні методи тренінгу.
- Структури на основі надтонких шарів напівпровідників, металів, діелектриків, магнітних матеріалів для нанoeлектроніки й спінтроніки.
- Квантові точки й нитки
- Надрешітки, спінові надрешітки, надрешітки з напруженими шарами, леговані надрешітки, політипні надрешітки
- Фотонні кристали
- Фуллерени
- Нанотабулярні матеріали
- Полімерні напівпровідники
- Термо - і магнітоелектричні матеріали для мікропроцесорної техніки на основі напівпровідникових молекулярних з'єднань
- Нанорозмірні зондові елементи для безконтактної надлокальної високочутливої реєстрації електромагнітних, оптичних, акустичних і теплових полів і випромінювань
- Принципи й технологічні прийоми самоскладання неорганічних і органічних наноструктур
- Нанорозмірні локальні процеси нанесення, видалення й модифікування матеріалів
- Зондові й пучкові нанотехнології, що забезпечують синтез матеріалів з точністю до моноатомних (мономолекулярних) шарів
- Плазмені нанотехнології створення наноструктур, нанотрубок і покриттів
- Польові методи нанорозмірного структурування плівок матеріалів нанoeлектроніки

- Гетерогенні технології наноструктур
- Технологічне й контрольнo-діагностичне устаткування нового покоління на основі надвисоковакуумних, нанозондових і нанолітографічних систем, прецизійних засобів формування й виміри нанорозмірних об'єктів і величин
- Атомно-силові й тунельні технологічні й діагностичні пристрої
- Експрес-методи реєстрації електричних, оптичних, магнітних, акустичних і інших видів полів нанорозмірних об'єктів і їхнього впливу на екосистему.

2 ЛАЗЕРИ НА КВАНТОВИХ ЯМАХ

2.1 Основні принципи роботи напівпровідникового лазера

Інжекційна люмінесценція, обумовлена випромінювальною рекомбінацією, є результат спонтанних зона-зонних електронних переходів. У присутності електромагнітного випромінювання з відповідною довжиною хвилі можуть також спостерігатися індуковані переходи між електронними станами. При переході між станами з енергією e_1 і e_2 ($e_2 > e_1$) випромінювання має частоту $f_{21} = (e_2 - e_1)/h$, тобто у вільному просторі $\lambda_{21} = hc/(e_2 - e_1)$, де h - постійна Планка. При взаємодії випромінювання з атомом, що знаходиться в нижньому енергетичному стані, може відбутися поглинання кванта випромінювання і атом перейде на верхній рівень. Коли у взаємодії бере участь атом, що знаходиться у верхньому енергетичному стані, замість спонтанного випромінювання може відбутися випромінювання індукованого кванта. Внаслідок цього за наявності випромінювання зменшується середній час життя збудженого стану. Будь-який квант індукованого випромінювання має однакову частоту і фазу з тим, що індукує. Вони когерентні [20].

Використовувані в оптичних лініях зв'язку напівпровідникові лазери на основі подвійної гетеро структури по пристрою подібні світлодіодам з торцевим випромінюванням. Як і в інших лазерах, генерація випромінювання в них майже повністю обумовлена індукованими переходами. Характерні особливості лазерного випромінювання в порівнянні з випромінюванням світлодіодів: вузькосмуговість, спрямованість, можливість модуляції в широкій смузі частот.

Виведемо деякі важливі співвідношення, що описують процеси випромінювання і поглинання в дворівневій системі, що ідеалізується, з енергетичними станами e_1 і e_2 (рис. 2.1) і уточнимо ці співвідношення, використовуючи напівкласичне наближення і враховуючи складнішу електронну структуру напівпровідників. Потім одержимо умови лазерної генерації [20].

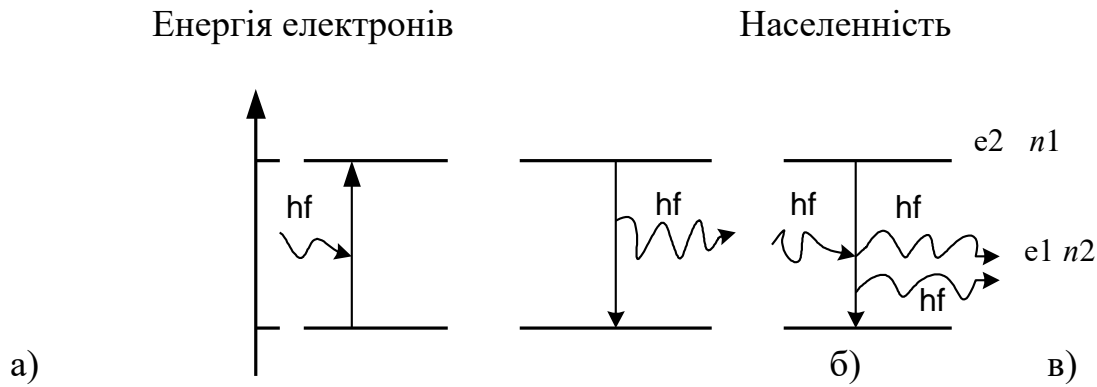


Рисунок 2.1 - Схематичне представлення процесів:

a - поглинання; *б* - спонтанного випромінювання; *в* - індукованого випромінювання для атомної системи, що ідеалізується, з двома дозволеними енергетичними станами

По-перше, розглянемо розподіл населенностей в дворівневій системі при виконанні умови термодинамічної рівноваги. Концентрація атомів, стан електронів в яких відповідає енергіям e_1 і e_2 , визначається співвідношенням Больцмана

$$\frac{n_1}{n_2} = \exp[(e_2 - e_1) / kT] \quad (2.1)$$

Розподіл енергії в спектрі рівноважного випромінювання при деякій температурі визначається законом Планка для випромінювання абсолютно чорного тіла

$$\rho(f) = \rho_{ч.т}(f) = \frac{8 \cdot \pi \cdot h \cdot f^2}{c^2 [\exp(hf / kT) - 1]} \quad (2.2)$$

де $\rho_{ч.т}$ - спектральна щільність електромагнітної енергії в одиниці об'єму, а індекс відповідає рівноважному випромінюванню абсолютно чорного тіла.

Вірогідність того, що атом, що знаходиться в нижньому енергетичному стані e_1 поглине фотон з енергією $e_f = e_2 - e_1$ за інтервал часу $\delta \cdot t$, пропорційна $\rho(f_{21})$ і $\delta \cdot t$, тобто може бути написана у вигляді $B_{12} \rho(f_{12}) \delta \cdot t$. Аналогічно вірогідність індукованого переходу атома з верхнього енергетичного стану в нижній є $B_{21} \rho(f_{21}) \cdot \delta \cdot t$. Нарешті, вірогідність спонтанного розпаду верхнього стану

$A_{21} \delta \cdot t$, причому середній час життя збудженого стану, обумовлений спонтанним випромінюванням

$$\tau_{en} = 1 / A_{21} \quad (2.3)$$

В умовах термодинамічної рівноваги, коли $p(f) = p_{ч.т}(f)$, швидкість збудження із стану 1 в стан 2 повинна співпадати із загальною швидкістю розпаду із стану 2 в стан 1. Ці швидкості, віднесені до одиниці об'єму, виходять множенням вірогідності переходу на концентрацію атомів, що знаходяться у відповідному енергетичному стані. Отже

$$A_{21}n_1 + B_{21} p_{ч.т}(f_{21}) n_2 = B_{12} p_{ч.т}(f_{21}) n_1 \quad (2.4)$$

$$p_{ч.т}(f_{21}) = \frac{A_{21} / B_{21}}{B_{12}n_1 / B_{21}n_2 - 1} = \frac{A_{21} / B_{21}}{\frac{B_{12}}{B_{21}} \exp \frac{e_2 - e_1}{kT} - 1} \quad (2.5)$$

тут використано (2.1). Оскільки (2.2) і (2.5) виконуються при будь – якій температурі, то

$$B_{12} = B_{21} = B \quad (2.6)$$

і

$$A_{21} / B_{21} = A / B = 8\pi h f_{21}^3 / c^3 \quad (2.7)$$

Коефіцієнти A і B називаються коефіцієнтами Ейнштейна.

2.2 Умови роботи напівпровідникового лазера

Розглянемо проходження пучка випромінювання через систему атомів уздовж осі z . Припустимо, що спектральна щільність потужності P [Вт/м²], а розподіл її біля частоти f_{21} має вигляд (рис. 2.2). Умови нормування

$$\int_1^{\infty} \xi(f) df = 1 \quad (2.8)$$

Так що спектральна густина електромагнітної енергії в пучку

$$p(f) = P \xi(f) / c \quad (2.9)$$

Припустимо, що її максимум значно більше, чим $p_{ч.т}(f)$. Втрати потужності пучка в процесі розповсюдження рівні енергії, поглиненій за секунду атомами, що знаходяться в одиниці об'єму

$$-(dP/dz) = B(f_{21})(n_1 - n_2) h f_{21} \quad (2.10)$$

Коефіцієнт поглинання (з врахуванням (2.9)):

$$a_{12} = -\frac{1}{P} \frac{dP}{dz} = \frac{B(n_1 - n_2) h f_{21} \xi(f_{21})}{c} \quad (2.11)$$

Якщо коефіцієнт поглинання не залежить від z , потужність пучка затухає експоненційно

$$P(z) = P(0) \exp(-a_{12} z) \quad (2.12)$$

Тут ми нехтували спонтанним випромінюванням на частоті f_{21} .

В процесі поглинання випромінювання відбувається перерозподіл населеностей по енергетичних рівнях, що відповідає зміні ефективної температури відповідно до (2.2). За наявності зовнішнього випромінювання температура росте, але n_1 залишається більшим n_2 .

Ситуація, в якій n_2 опиняється більшим n_1 називається інверсією населеностей. При цьому швидкість індукованого випромінювання перевищує швидкість поглинання. Інтенсивність пучка росте в процесі розповсюдження в речовині, тобто реалізується оптичне посилення. Величина коефіцієнта посилення g_{12}

$$g_{12} = -a_{12} = (1/P)(dP/dz) \quad (2.13)$$

Використовуючи (2.11), (2.7) і (2.3) отримуємо

$$g_{12} = \frac{Ac^2(n_2 - n_1)\xi \cdot (f_{21})}{8\pi(f_{21})^2} = \frac{c^2}{8\pi} \frac{(n_2 - n_1)\xi \cdot (f_{21})}{(f_{21})^2 \tau_{cn}} \quad (2.14)$$

Тепер густина потужності по мірі розповсюдження буде експоненційно зростати

$$P(z) = P(0)\exp(g_{12}z) \quad (2.15)$$

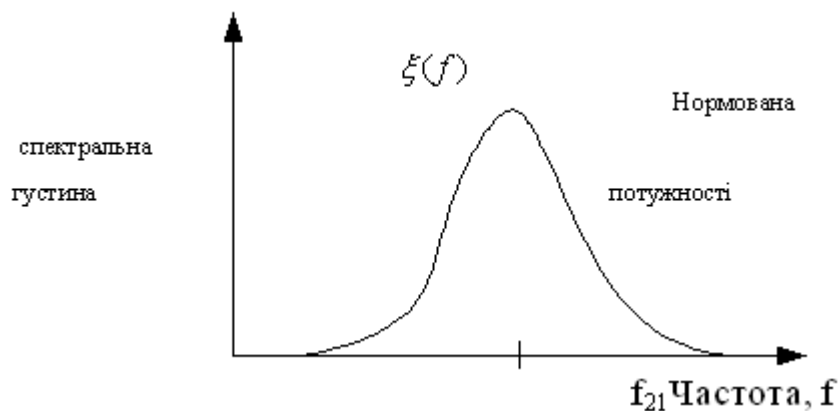


Рисунок 2.2 - Залежність спектральної щільності від частоти випромінювання

Створення інверсної населеності і отримання оптичного посилення - перший з двох істотних кроків, необхідних для роботи лазера. Другий крок - створення позитивного зворотного зв'язку, щоб перетворити оптичний підсилювач на генератор. Це можна зробити за допомогою двох дзеркал, які відображають посилене світло в підсилююче середовище. Такі дзеркала утворюють оптичний резонатор [20]. Резонатор має характеристичні резонансні частоти, що приводить до особливостей в спектрі випромінювання, що генерується дворівневою системою. Встановлюється рівноважна щільність оптичної потужності на кожній резонанс-

ній частоті, відповідна рівності посилення на прохід і втрат. У поняття втрат включена і та частина оптичної потужності, яка проходить крізь напівпрозоре дзеркало і утворює вихідний лазерний пучок. Самозбудження не може початися, поки посилення не перевищить втрати. Ця умова відповідає пороговій інверсії населеності $(n_2 - n_1)_{\text{пор}}$. Деяка частина світла, що генерується, розсівається в активному середовищі в процесі розповсюдження. Цей процес можна описати за допомогою коефіцієнта розсіяння $a_{\text{рас}}$ аналогічного коефіцієнту поглинання a_{21} . Тоді зміна оптичної потужності пучка з відстанню

$$P(z) = P(0)\exp((g_{12} - a_{\text{рас}})z) \quad (2.16)$$

Так що підсилення за два проходи по активному середовищу складе

$$P(2l)/P(0) = \exp(2(g_{12} - a_{\text{рас}})l) \quad (2.17)$$

де l - ефективна довжина активного середовища, як показано на рис. 2.3. Позначимо коефіцієнти віддзеркалення дзеркал R_1 і R_2 . Тоді умова самозбудження

$$\begin{aligned} R_1 R_2 P(2l) &> P(0) \\ R_1 R_2 \exp(2(g_{12} - a_{\text{рас}})l) &> 1 \\ g_{12} > a_{\text{рас}} + 1/(2l)\ln(1/R_1 R_2) \end{aligned} \quad (2.18)$$

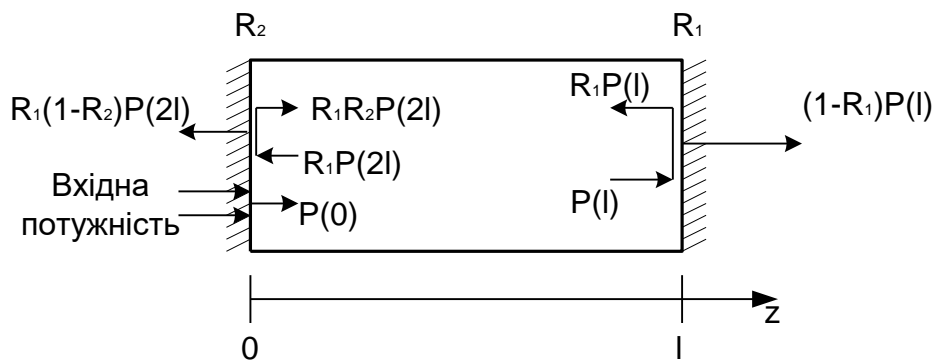


Рисунок 2.3 - Схематичне представлення умови самозбудження

$$P(z) = P(0)\exp((g_{12} - a_{\text{рас}})z)$$

З теорії виходить необмежене зростання потужності вхідного імпульсу $P(0)$, якщо $R_1 R_2 P(2l) > P(0)$. На практиці рівень потужності обмежується ефектами насичення, де a - коефіцієнт загальних втрат, який [див. (2.18)] враховує проходження світла через дзеркала. При хороших дзеркалах з лазера виходять $(1 - R_1)$ і $(1 - R_2)$ долі потужності. При рівності коефіцієнтів віддзеркалення $R_1 = R_2 = R$ порогова умова зводиться до виду

$$g_{12} > a_{\text{рас}} + 1/l \ln(1/R) \quad (2.19)$$

де g_{12} визначається формулою (2.14).

Відзначимо, що g_{12} пропорційний $\xi \cdot (f)$, і тому обернено пропорційний ширині спектральної лінії випромінювання. Звичайно спонтанне випромінювання в дворівневій системі ініціює роботу лазера. Довжина хвилі випромінювання лежить в межах ширини спектральної лінії, яка визначається такими ефектами, як природне розширення (слідство принципу невизначеності), ефект Доплера і зіштовхувальне розширення. Так, щоб встановити порогову умову роботи лазера, розглядають нормовану спектральну лінію спонтанного випромінювання між двома лазерними рівнями.

2.3 Лазерний поріг

Коефіцієнт посилення, необхідний для початку роботи лазера, відповідно до (2.18).

$$g_{12} > a = a_{\text{рас}} + 1/(2l) \ln(1/R_1 R_2)$$

Цей результат, у принципі, можна застосувати і до напівпровідникового лазера. Проте слід ретельніше розглянути формування лазерного резонатора в напівпровідниковому лазері на подвійній гетероструктурі. Через високе значення

коефіцієнта посилення резонатор може бути зроблений дуже коротким в порівнянні з лазерами інших типів - близько 0,2 ... 1,0 мм. Крім того, коефіцієнт віддзеркалення дзеркал не критичний і звичайно виявляється достатнім френелівське віддзеркалення на межі розділу напівпровідник -повітря. Цей коефіцієнт віддзеркалення буде мати вигляд [23]

$$R = (\mu - 1)^2 / (\mu + 1)^2 = (2,7/4,7)^2 = 0,33 \quad (2.20)$$

у випадку GaAs. При формуванні резонатора р-п- перехід орієнтується уздовж одного кристалографічного напрямку під прямим кутом відколюється пластинка уздовж природної площини спайності. Площини відколу утворюють межі лазерного резонатора. На них можна нанести ті, що відображають покриття, але звичайно в цьому немає необхідності. З відколених пластин потім напилюють лазерні зразки. У більшості приладів відпиляні краї звичайно залишають шорсткими, щоб запобігти генерації лазерного випромінювання в бічному напрямі.

Подвійна гетероструктура локалізує оптичне випромінювання в межах активного шару, що пов'язано з відмінністю коефіцієнтів заломлення в ньому і навколишніх шарах. Ситуація аналогічна тій, що спостерігається в діелектричному волокні. Для зниження щільності струму, необхідної для створення інверсії населеностей, товщина активного шару повинна бути зроблена по можливості малою. Дійсно, в чисельних прикладах використовувалися величини, порівнянні з відповідними значеннями для оптичних волокон. Аналогічна ситуація складається при розгляді оптичного олокна з серцевиною малого діаметру, яке придатне для передачі тільки низькомодового випромінювання. Частина електромагнітної потужності розповсюджується зовні активного шару. Таким чином, тільки частка Γ , яка залишається в межах активного шару, може брати участь в процесах індукованого випромінювання і тим самим робити внесок в оптичне підсилення. Параметр Γ називається коефіцієнтом оптичного обмеження.

2.4 Гомоструктурний перехід і напівпровідникові лазери

Якщо до рп-переходу напівпровідника прикласти пряму напругу (напруга в прямому напрямку) V_R , то, як показано на рис. 2.4, у р-область буде відбуватися інжекція електронів, а в п-область — інжекція дірок. Ці інжектвані неосновні носії, зустрічаючись з основними носіями, будуть рекомбінувати, випромінюючи світло довжиною хвилі, що відповідає енергетичній ширині забороненої зони E_g . Тому що в цьому випадку концентрація неосновних носіїв зменшується в $\exp(-x/L_d)$ раз (де L_d — дифузійна довжина), то ширина області світлового випромінювання досягає порядку дифузійної довжини, тобто декількох мікрометрів. Оскільки дифузійна довжина електрона багато більше дифузійної довжини дірки, то світлове випромінювання виникає в основному в р-області. Тому прилад, що використовує рп-перехід напівпровідника шириною, рівній ширині забороненої зони, називають напівпровідниковим лазером з гомоструктурним переходом [25].

Робота напівпровідникового лазера на кристалі з GaAs уперше спостерігалася в 1962 р. Це був гомолазер, виготовлений за допомогою дифузії акцепторної домішки в кристалі GaAs. У цій конструкції інжектвані носії займають область обмежену дифузійною довжиною, малу в порівнянні з областю поширення світловипромінення в кристалі. Унаслідок чого ефективна взаємодія зі світлом утрудняється. Граничне значення густини струму виявляється високим (більше 50 кА/см^2), і через виділення тепла на постійному струмі при кімнатній температурі лазерна генерація не виникає. Такий лазер звичайно не працює в безупинному режимі.

Практична реалізація безупинного режиму роботи напівпровідникового лазера при кімнатній температурі вперше була досягнута в США в «Белл лабораторіях» докторами І. Хаясі і М. Б. Панішем у 1970 р. Був виготовлений лазер на подвійній гетероструктурі $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ і GaAs з різною шириною забороненої зони, що дозволило зменшити граничну густину струму при кімнатній температурі до $1,6 \text{ кА/см}^2$.

Зниження граничного струму в гетеролазерах досягається за рахунок каналювання інжектваних носіїв у вузькій області, обмеженої потенційними бар'є-

рами гетероструктури, а також за рахунок каналювання спонтанного випромінювання в цій же області під дією хвилевідного ефекту, що виникає через розходження в показниках заломлення матеріалів гетероструктури.

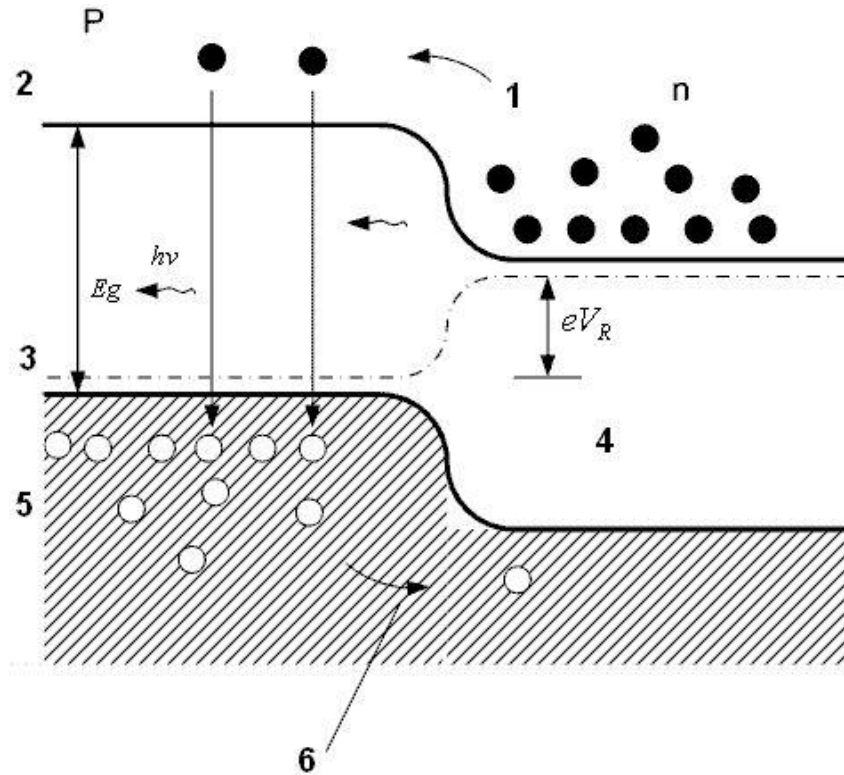


Рисунок 2.4 - Інжекція носіїв у рп-перехід:

- 1 — інжекція електронів; 2 – зона провідності;
- 3 – рівень Фермі; 4 — прикладена напруга;
- 5 – валентна зона; 6 – інжекція дірок

Оскільки діапазон довжин хвиль випромінювання AlGaAs/GaAs-лазера близько 0,8 мкм збігається з діапазоном довжин хвиль високоефективного кремнієвого фотоприймача випромінювання, то стала реальною задача практичної реалізації системи оптичного зв'язку, що поєднує в собі напівпровідникові лазери, оптичне волокно і кремнієві фотоприймачі.

2.5 Лазери на подвійній гетероструктурі

Подвійна гетероструктура являє собою два шари GaInP з вузькою шириною забороненої зони, розділених шаром In з більшою шириною забороненої зони. Лазерне підсилення виникає в GaInAsP-шарі, що називається активним шаром (активним середовищем), а InP-шар називається звичайно шаром покриття (матеріалом покриття).

Якщо в активному шарі чотирьохкомпонентного $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ напівпровідникового кристала шляхом зміни співвідношення Ga (x) і As (y) здійснити узгодження постійних ґраток із кристалом In, то виявляється можливим у широких межах змінювати ширину забороненої зони E_g . Довжина хвилі випромінювання напівпровідникового лазера λ , приблизно визначається шириною забороненої зони E_g кристала активного шару [25]

$$\lambda(\text{нм}) = \frac{1,2398}{E_g(\text{eV})}. \quad (2.21)$$

Довжини хвиль випромінювання GaInAs/InP-лазера лежать в області 1,3—1,67 мкм.

На рисунку 2.5 показана структура енергетичних зон. Так як, на поверхні гетеропереходу виникає гетеробар'єр з енергією ΔE , рівній різниці енергетичної ширини заборонених зон, то цей гетероперехід буде перешкоджати проникненню інжектованих носіїв у шар покриття. Це явище називається ефектом утримання носіїв.

Звичайно коефіцієнт заломлення напівпровідників для світла з енергією, меншою енергетичної ширини забороненої зони, монотонно зменшується зі збільшенням довжини хвилі. Тому, якщо розглядати довжини хвиль випромінювання лазера, коефіцієнт заломлення в шарі покриття з великою шириною забороненої зони виявляється менше коефіцієнта заломлення активного шару і на границях гетеропереходу виникає різниця Δn в коефіцієнті заломлення (рис. 2.3,б). Тому що світло концентрується в місці з більш високим коефіцієнтом заломлення, то, як видно з рис. 2.3, в, він буде укладений усередині активного шару. Це явище називається ефектом утримання світла.

Оскільки при використанні подвійний гетероструктури світло і носії утримуються в активному шарі й ефективно взаємодіють, то виявляється можливим одержання напівпровідникового лазера з низьким граничним значенням струму.

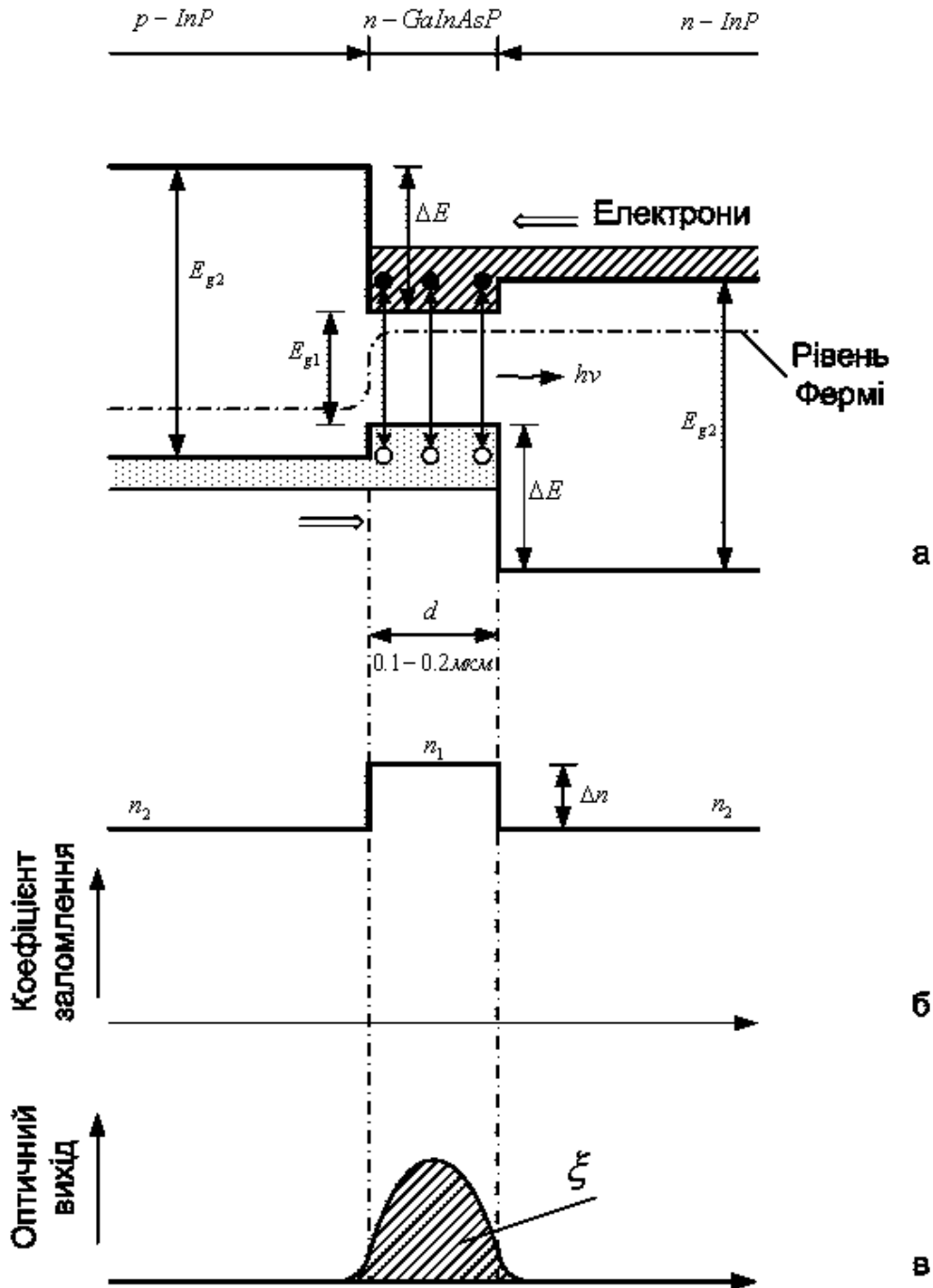


Рисунок 2.5 - Структура енергетичних зон гетеропереходу:

а – інжекція електронів і дірок в активний шар;

б – розподіл коефіцієнта заломлення; в – розподіл світлового випромінювання

При низькому гетеробар'єрі через проникнення носіїв виникає погіршення температурної характеристики граничного значення струму. У $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ -

лазері необхідно мати значення $\Delta E > 0,3$ еВ. Структуру, у якій гетероперехід є тільки з однієї сторони активного шару, називають просто гетероструктурою.

2.6 Лазер зі схованою гетероструктурою

У лазері зі схованої гететоструктурою, розробленому Тоукадою (рис. 2.6), повне обмеження інжектуючих неосновних носіїв у вертикальному і горизонтальному напрямках здійснюється шляхом досить складного процесу подвійного епітаксiального вирощування [29].

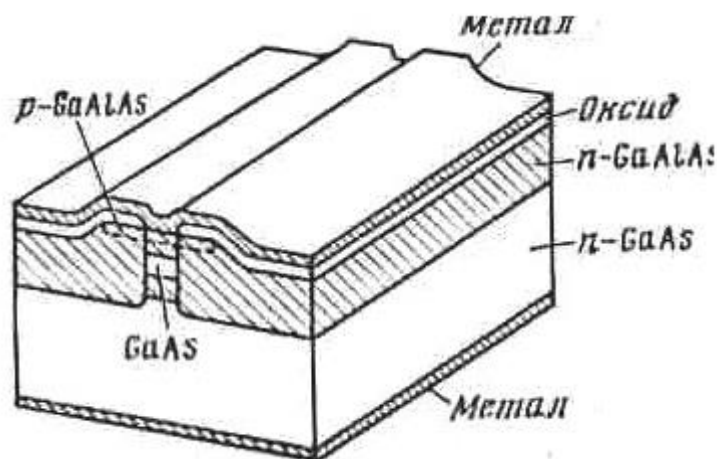


Рисунок 2.6 - Структура лазера зі схованою гетероструктурою

Були виготовлені структури з граничним струмом усього 4,5 мА при ширині смуги 0,7 мкм, що до того ж мали високу лінійність і гарну частотну характеристику. Їхня вихідна потужність обмежена і гранична щільність оптичної потужності, що викликає необоротне ушкодження лазерів з GaAs, складає $\sim 1,1$ мВт/см² чи ~ 11 мВт/мкм². Щоб домогтися надійної генерації, необхідно працювати при рівнях потужності значно нижче цієї межі, і на практиці потужність 1 мВт є максимальною робочою потужністю у неперервному режимі для лазерів зі схованою гетероструктурою, які мають активну область з малим поперечним перерізом для генерації в одномодовому режимі.

Низьке значення V потрібне для генерації однієї горизонтальної моди, означає, що добуток Δn і ширини світловода теж повинне бути малим. Напри-

клад, у випадку лазера зі смужкою шириною 5 мкм, що генерує на одній поперечній моді і з'єднаного зі світловодом зі східчастим профілем показника заломлення, повинне бути позитивним і менше $2 \cdot 10^{-3}$, це вимагає дуже ретельного контролю складу матеріалу, використовуваного для заповнення областей біля смужки. Надійність лазерів зі схованою гетероструктурою ще не досягла того рівня, що притаманні більш простим смуговим структурам. Ріст зародків на другій стадії епітаксiального осадження може погіршити експлуатаційні характеристики й утрудняє реалізацію структур з малою деформацією, що забезпечують найкращу надійність. Однак кругова симетрія розподілу випромінювання, малий граничний струм, лінійність і гарні модуляційні характеристики роблять цю структуру привабливою для одномодових світловідних систем і, можливо, для компонентів інтегральної оптики.

2.7 Модуляція у лазерах

Між початком пропускання струму через лазер і початком генерації звичайно існує затримка в декілька наносекунд, обумовлена часом, затраченим на створення достатнього збудження. Зв'язок між концентрацією нерівноважних носіїв n і потоком фотонів P викликає поява загасаючих з часом релаксаційних коливань оптичної потужності відразу ж після виникнення генерації. Якщо розглядається одномодовий режим, то цей процес можна описати за допомогою системи простих кінетичних рівнянь [30]

$$\frac{dn}{dt} = j/dq - n/\tau_n - g, \quad \frac{dP}{dt} = gP - P/\tau_s + F/\tau_n, \quad (2.22)$$

де g — коефіцієнт підсилення, що приблизно лінійно залежить від концентрації нерівноважних носіїв, d — ширина активної області, q — заряд електрона, τ_s — індукований час життя, τ_n — спонтанний час життя і F — частка спонтанного випромінювання на генеруючій моді. Пітерман, Буус і Дейвідсон узагальнили ці рівняння на випадок генерації багатьох подовжніх мод. Розв'язуючи дану сис-

тому рівнянь, можна пояснити поведінку імпульсної перехідної і частотної характеристик лазерів (рис. 2.7).

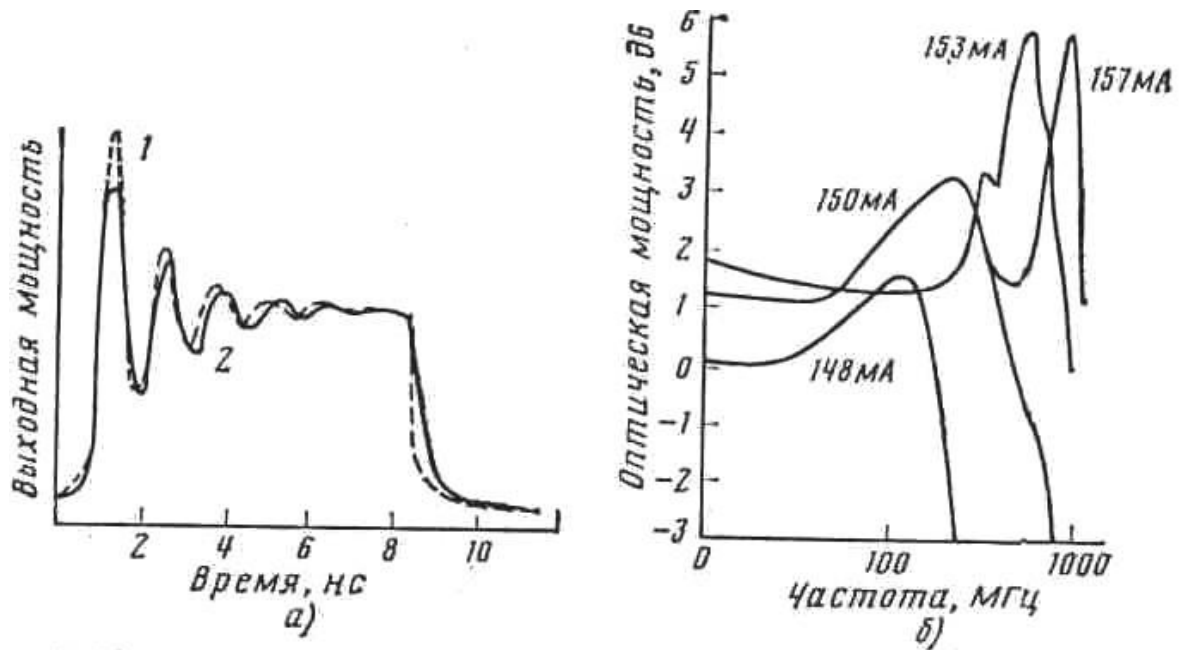


Рисунок 2.7 - Перехідна імпульсна і частотна характеристики смугових лазерів з GaAlAs: а – порівняння теоретичної й експериментальної перехідних характеристик лазера з оксидною смужкою, який зміщується постійним струмом, рівним 0,9 від граничного значення (1-результат розв’язку кінетичних рівнянь; 2— експериментальні дані); б – частотна характеристика смугового лазера, утвореного глибокою дифузією цинку і має активну область, леговану германієм (концентрація 10^{18} см^{-3})

Резонанс на частотній характеристиці і релаксаційні коливання на імпульсній характеристиці можна одержати, розв’язуючи систему кінетичних рівнянь, з яких для випадку малого сигналу випливає

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{1}{\tau_n \tau_s} \frac{(i_{cm} - i_u)}{I_u} \right\}^{1/2}, \quad (2.23)$$

де i_{cm} — струм зсуву чи кінцевий струм, i_u — граничний струм. Ці релаксаційні ефекти небажані у волоконно-оптичних системах, що вимагають мініма-

льного перекручування переданої інформації. Перший пучок на імпульсній характеристиці може бути дуже вузьким при великому струмі збудження, розмах ВЧ струму дорівнює ± 4 мА, що дозволяє використовувати лазерні джерела для оцінки частотних характеристик світловідних кабелів. Існує кілька типів одномодових (поперечних) лазерів з вузькими смужками, імпульсні характеристики яких не мають настільки явно виражених релаксаційних коливань, а на їхніх частотних характеристиках резонансні викиди відсутні аж до діапазону НВЧ.

Поліпшені характеристики вузькосмугових лазерів, що генерують на найнижчій моді, пояснюють у такий спосіб. У загальному випадку смужку накачують по ширині, що перевищує ширину оптичного поля але рівному половинній потужності. Індуковане випромінювання відбувається швидше всього по вісі, де оптичне електричне поле основної моди максимально, внаслідок чого по обидва боки смужки утворюються резервуари носіїв, здатних дифундувати до осі і тим самим згладжувати їхні поперечні розподіли.

Нормальні релаксаційні коливання виникають у зв'язку з тим, що число фотонів зростає до рівня, що стаціонарно інжекцію носіїв підтримувати не в змозі. У випадку лазера з вузькою смужкою дифузія носіїв від її бічних сторін дозволяє підтримувати більш ефективно це початкове число фотонів.

Очевидно, що досягнення максимальної резонансної частоти вимагає мінімізації τ_n і τ_s . Параметр τ_s являє собою індукований час життя чи час життя фотонів, яке можна зменшити, збільшуючи втрати в резонаторі лазера чи збільшуючи коефіцієнт пропускання граней лазера. Параметр τ_n відповідає спонтанному часу життя, що у високолегованих активних шарах назад пропорційно концентрації донорної чи акцепторної домішки. Дифундуючі частки, що визначають рівномірність коефіцієнта підсилення лазера, являють собою неосновні носії, якими в матеріалі р-типу є електрони. Електрони дифундують швидше дірок і тому ефективніше згладжують кожне зменшення числа нерівноважних носіїв, чим дірки. Отже, можна сказати, що для одержання найкращої частотної характеристики і широкої смуги частот лазер повинний стабільно працювати на одній поперечній моді, мати високолегований активний р-шар для мінімізації

τ_n бути коротким, мати грані з високим коефіцієнтом пропускання для мінімізації τ_s і, нарешті, мати вузьку смужку, у яку подається накачування по ширині, що перевищує ширину оптичного поля.

2.8 Об'ємні мікролазери

Об'ємні мікролазери являють собою мініатюрні твердотільні лазери на об'ємних (тобто не мають смугових властивостей) кристалах, активованих іонами неодиму. Мініатюрність конструкції визначається застосуванням ефективної системи накачування з використанням напівпровідникових лазерів і СВД на ПГС GaAlAs. Досить вузька (~ 100 ГГц) однорідна розширена лінія підсилення іонів неодиму в кристалах обумовлює досить високу монохроматичність випромінювання мікролазерів з характерною для іонів неодиму гарною температурною стабільністю центральної довжини хвилі. Спрямованість випромінювання мікролазерів вище, ніж у напівпровідникових лазерів, це збільшує ефективність уведення їхнього випромінювання в одномодові світловоди [31].

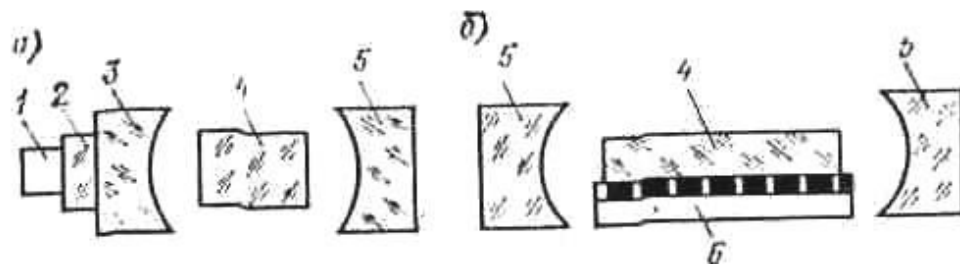


Рисунок 2.8 - Конструкції об'ємних мікролазерів: а) – з торцевим накачуванням; б) – з поперечним накачуванням: 1 – СВД чи ЛД; 2 – коліміруюча лінза; 3 – дзеркало резонатора, прозоре для випромінювання накачування; 4 – активний кристал, 5 – дзеркало резонатора; 6 – лінійка СВД на радіаторі

У мікролазерах, так само як і у волоконних лазерах, може здійснюватися подовжнє накачування в торець активного елемента і поперечне накачування лінійками СВД через бічну поверхню кристала (рис. 2.8). В іншому випадку для

збільшення ефективності накачування використовуються відбивачі. Генерація випромінювання в мікролазерах можлива з використанням цілого ряду активних середовищ: на кристалах з малою (близько 1 %) концентрацією неодиму Nd, із середньою (3—8 %) концентрацією цих іонів, наприклад кристала калій-гадоліневого вольфрамату, і на висококонцентрованих середовищах – кристалах $\text{LiNd}_4\text{O}_{12}$ і Nd_4O_{12} . Використання висококонцентрованих середовищ найбільше ефективно, посилення в них досягає 10 дБ/см [8]. Але кристали з високою концентрацією неодиму, як правило, мають малі розміри (<1 см) і використання їх як оптичні підсилювачі є досить проблематичним.

На основі мікролазера на кристалі $\text{LiNd}_4\text{O}_{12}$ створена конструкція одночастотного передавача з довжиною хвилі випромінювання 1,317 мкм для систем передачі з одномодовими волоконними світловодами. Вона схематично зображена на рисунку 2.9.

Конфокальний резонатор утворений зовнішніми дзеркалами, через одне з яких виробляється накачування кристала довжиною 300 мкм. Оригінальна схема накачування, що здійснюється 7 лазерами на GaAlAs. Випромінювання кожного з лазерів вводиться в багатомодовий волоконний світловод, а потім через об'єднувач на стрижневих градієнтних лінзах – в активний кристал. У блоці з резонатором лазера розташований оптичний вентиль, після якого випромінювання лазера за допомогою градієнтної лінзи вводиться в планарний електрооптичний модулятор, виконаний методом дифузії титана в кристал LiNbO_3 . Передавач, що працює в одночастотному режимі, має гарні характеристики: гранична потужність накачування – 6 мВт; потужність випромінювання на виході лазера – 1,4 мВт; втрати у вентилі, модуляторі і з'єднаннях – 9дБ; потужність, що вводиться в одномодове волокно – 0,17 мВт; смуга частот модуляції складає 2,8 ГГц, передавач працює з модуляцією в коді МК2 зі швидкістю 2 Гбит/с. Напруга, подавана на модулятор при 100 %-ній глибині модуляції, складає 6 В. Ця конструкція демонструє високі можливості мікролазерів як джерел випромінювання для швидкісних систем передачі, однак необхідно відзначити, що досягається це завдяки складній технології виготовлення і юстуванню лазера, вентиля, модулятора й погоджувачих елементів.

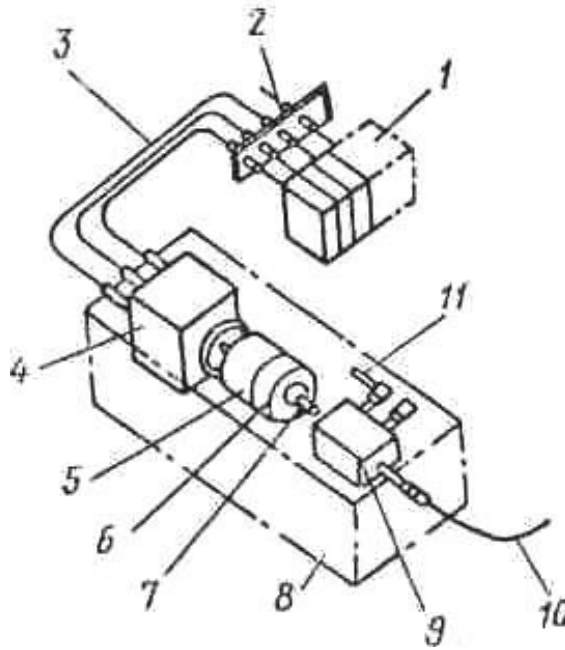


Рисунок 2.9 - Одночастотний лазер на кристалі $\text{LiNd}_4\text{O}_{12}$: 1 – блок лазерних діодів накачування; 2 – різні оптичні з'єднувачі; 3 – багатомодове волокно; 4 – оптичний об'єднувач; 5 — резонатор лазера; 6 – оптичний вентиль; 7 – погоджуюча градієнтна лінза; 8 – корпус; 9 – модулятор; 10 – одномодове волокно; 11 – рознімач для електричного сигналу

Приведений приклад характеризує загальні проблеми, які є перед розроблявачами мікролазерів для світловідних систем. Одною з переваг таких пристроїв перед напівпровідниковими лазерами є висока спрямованість випромінювання, що знімає необхідність в застосуванні зовнішнього планарного модулятора і відповідної погоджуючої оптики.

Перспективним представляється використання мікролазерів як джерел випромінювання для фазових ВОЛС. У цьому випадку модулятор не потрібний, спрощується конструкція і зростає потужність, що вводиться в одномодовий волоконний світловод.

Лазер на основі напівпровідникового р-n-переходу називають лазерним діодом. Якщо основою роботи СВД є спонтанна емісія, то в ЛД фотони генеруються за допомогою стимульованої (індукованої, змушеної) емісії. Це процес, при якому первинні фотони підштовхують збуджені атоми до генерації нових

фотонів за рахунок стимулювання додаткових актів рекомбінації електронів і дірок. При стимульованому випромінюванні згенеровані і вихідний фотони мають ту саму фазу і частоту (довжину хвилі). Результируюче випромінювання близьке до когерентного, а його спектр звужується до декількох нанометрів (близький до монохроматичного).

Принципова відмінність лазера від інших випромінювачів у тому, що він є генератором електромагнітних коливань оптичного діапазону. З радіотехніки відомо, що для перетворення підсилювача в генератор, необхідне виконання амплітудних і фазових умов самозбудження. Стосовно до лазера амплітудна умова означає, що підсилення в активній області напівпровідника повинне перевищувати втрати (на поглинання в матеріалі і на випромінювання в зовнішнє середовище). Фазова умова вимагає введення позитивного зворотного зв'язку. У лазері, ця умова забезпечується переміщенням активного середовища у середину оптичного резонатора. У найпростішому випадку це резонатор типу Перо-Фабрі-Перо – два плоскопаралельних дзеркал.

Для виникнення стимульованої емісії необхідна інверсія населеності, тобто число збуджених електронів у зоні провідності повинне бути більше, ніж дірок у валентній зоні. У лазерах інверсію забезпечують за допомогою накачування. У напівпровідниковому лазері накачування здійснюється інжекцією (впорскуванням) струму високої щільності в активний шар. Коефіцієнт підсилення світла активним середовищем пропорційний щільності струму, що протікає через неї. Характер випромінювання змінюється від спонтанного до стимульованого, коли підсилення перевищує усі види втрат (амплітудна умова генерації). Необхідний для цього струм інжекції називається граничним струмом I_p .

2.9 Джерела світла на квантових точках

Джерела світла на квантових точках і проводах є одним з перспективних напрямків створення лазерних діодів, оскільки збільшення ступеня локалізації

носіїв заряду значно покращує характеристики таких приладів у порівнянні з їх аналогами в об'ємних матеріалах. Із теоретичних міркувань витікає, що лазерні пристрої на квантових точках і проводах повинні мати більш високі коефіцієнти підсилення, малі значення порогового струму, дуже вузькі і низькі лінії випромінювання в порівнянні з лазерами на подвійних гетеропереходах або квантових ямах. Слід підкреслити, що на практиці квантові точки і квантові проводи мають дефекти, розкид розмірів, обмежене захоплення носіїв заряду, внаслідок чого характеристики експериментальних зразків лазерних пристроїв поки що далекі від теоретичних прогнозів. Проте технологія створення квантових структур безперервно удосконалюється в напрямках якості поверхонь поділу, однорідності проводів, розробки оптичних резонаторів з високим коефіцієнтом локалізації і т. п., тому ця область досліджень є дуже цікавою і перспективною [1, 4, 5, 6].

Розташування носіїв заряду у квантових точках обмежено за всіма трьома вимірюваннями в дуже невеликих просторових областях, що приводить до квантових ефектів в електронних властивостях напівпровідникових матеріалів. Для застосування в оптичних приладах квантові точки повинні локалізувати електрони зони провідності і дірки валентної зони в одну просторову область. Функція щільності станів для напівпровідникових квантових точок має дуже гострі піки, які відповідають відповідним переходам між дискретними енергетичними рівнями електронів і дірок, причому поза цими рівнями щільність станів стає майже нульовою. Електронна структура квантових точок схожа на електронну структуру окремих атомів, тому лазери на квантових точках нагадують структуру іонних газових лазерів, проте перевагою квантових точкових лазерів є те, що їх електронною структурою можна керувати шляхом вибору напівпровідникового матеріалу, а також розмірів і форм точок.

Для надійної роботи квантової точки необхідно, щоб різниця між першими двома енергетичними рівнями для електронів і дірок була набагато більша теплової енергії kT , тобто $E_{1q} - E_{2q} \gg kT$ і $E_{2h} - E_{1h} \gg kT$. В цьому випадку всі інжектовані електрони і дірки будуть займати лише нижчі рівні, внаслідок чого всі вони будуть брати участь в стимульованих переходах між рівнями E_{1q} і E_{1h} ,

що дозволяє знизити пороговий струм відносно будь-якої системи з меншим ступенем локалізації. Як показують теоретичні і експериментальні дослідження останніх років, що лазери на квантових точках мають найнижчі значення порогового струму. Якщо теплова енергія системи менша різниці першого і другого рівнів енергії, то лінія випромінювання ідеального лазера повинна бути виключно гострою і не залежати від температури, тобто квантові точки забезпечують гарну температурну стабільність і не потребують охолодження. На рис. 9.9 подано розраховані залежності коефіцієнта підсилення для ідеальних систем різних розмірностей з квантовою локалізацією [24]. Квантові точки дозволяють отримати максимальної гостроти піки спектра при найвищих значеннях коефіцієнта підсилення.

В системах реальних квантових точок існує деякий розкид за розмірами, який приводить до розширення ліній спектра і зниження коефіцієнта підсилення, проте цей недолік компенсується можливістю регулювання спектральних характеристик за рахунок зміни розмірів, що дозволяє створювати лазери на квантових точках з широкою перебудовою спектра.

При створенні реальних структур лазерів на квантових точках виникають технічні труднощі при реалізації потрібних масивів однорідних за розмірами і бездефектних квантових точок. Одним з перспективних є метод самоорганізації квантових точок на поверхні поділу двох матеріалів з різними параметрами кристалічних ґраток. При цьому такий матеріал, як InAs, вирощується хімічним осадженням пари з газової фази, епітаксією металоорганічних сполук з газової фази і молекулярно-пучковою епітаксією на підкладці з кристала з великим значенням сталої кристалічної ґратки і великою шириною забороненої зони, наприклад, GaAs. Спочатку в такій системі виростає зародковий шар, на базі якого формуються островкові структури. Такий режим приводить до появи когерентних масивів пірамідальних квантових точок на поверхні зародкового шару, внаслідок чого цей шар починає епітаксіально розростатися на вершинах квантових точок, що створює гетероструктури з гарними характеристиками між двома монокристалічними матеріалами, тобто квантовими точками і оточуючою їх матрицею.

На рис. 2.10 схематично подано пристрій джерела світла на основі квантових точок з крайовою емісією на самоорганізуючих точках. Структура складається з декількох шарів матеріалів: підкладка n-GaAs, шар n-AlGaAs, шар GaAs з власною провідністю, який містить квантові точки, шар p-AlGaAs і верхній шар p-GaAs, які створюють $p-i-n$ діод. Зовнішнє джерело постійної напруги прикладається до металевих контактів на підкладці і верхньому шарі.

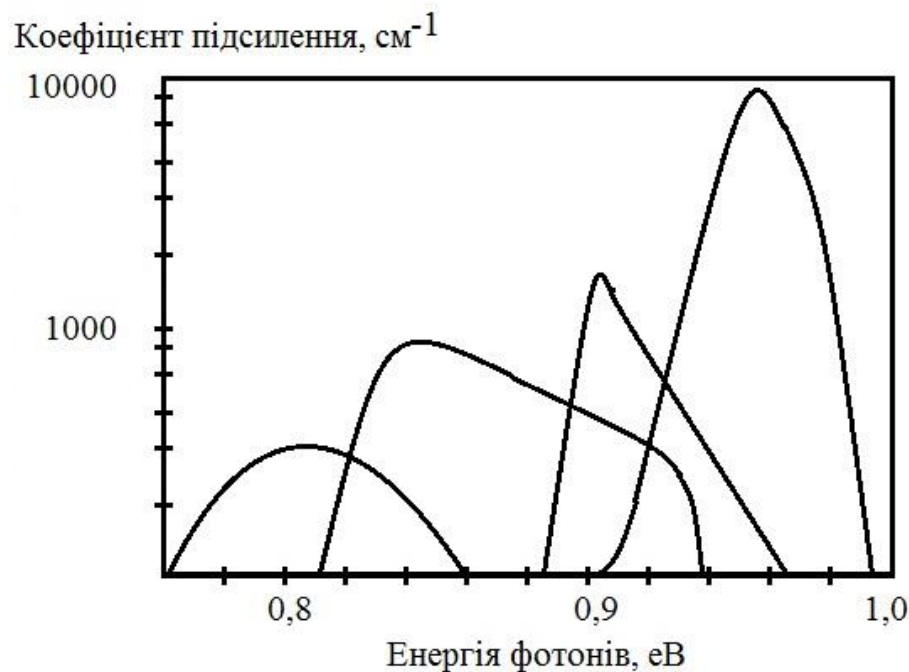


Рисунок 2.10 – Діапазон коефіцієнтів підсилення для лазерів на ідеальних об'ємних напівпровідниках, квантових ямах, квантових проводах і квантових точках [24]

При подачі прямого зміщення електрони і дірки інjektуються у внутрішній шар GaAs з власною провідністю або в активний шар, де вони попадають у квантові точки з меншою шириною забороненої зони, де відбувається рекомбінація. Довжина хвилі випромінювання при цьому відповідає міжзонним переходам у квантових точках InAs. Шар GaAs, який розташований між шарами AlGaAs з меншим коефіцієнтом заломлення, локалізує випромінювання, що приводить його до більш ефективної взаємодії з носіями заряду. Зародковий шар InAs підвищує ефективність дифузії носіїв заряду у квантові точки, оскільки його ширина забороненої зони менша, ніж у GaAs. Оскільки зародковий шар є дуже тонким, ширина забороненої зони для нього перевищує відповідну ши-

рину квантових точок, внаслідок чого носії заряду, які попадають в нього з GaAs, швидко дифундують всередину квантових точок. Для підвищення поверхневої щільності квантових точок використовують декілька зародкових шарів з пірамідальними квантовими точками. Перші джерела світла з самоорганізуючими квантовими точками з резонатором Фабрі-Перо були створені у 1994 році на основі точок InGaAs в матриці GaAs [24].

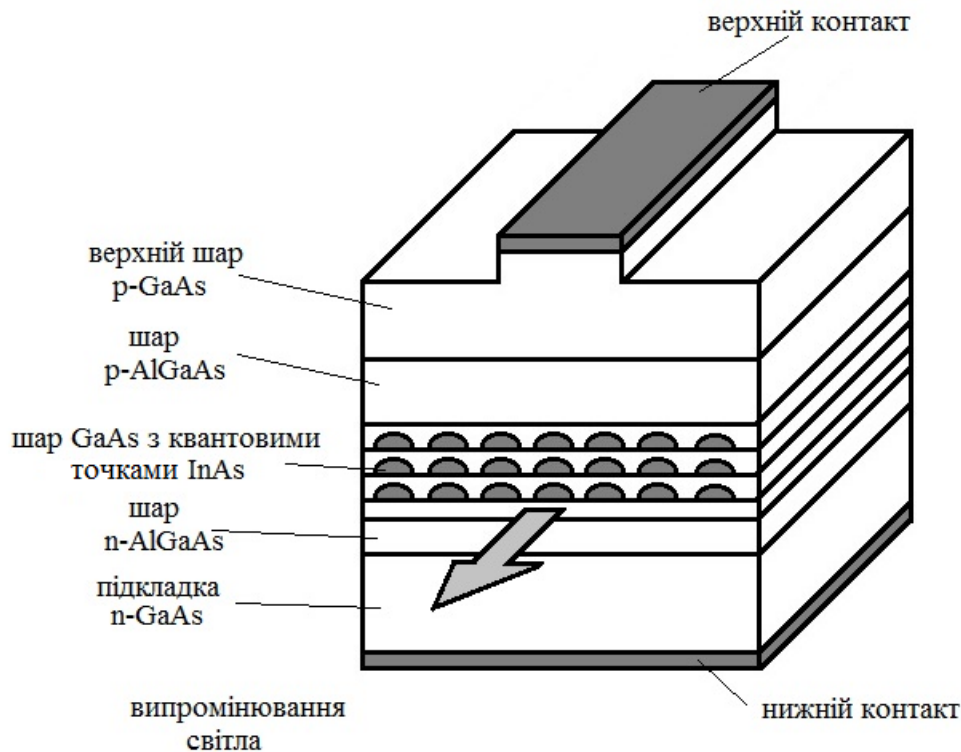


Рисунок 2.11 – Конструкція лазера з крайовим випромінюванням на самоорганізуючих квантових точках

Лазерні джерела світла на основі квантових точок мають ряд переваг у порівнянні з лазерами на квантових ямах. Це, насамперед, широкий спектр підсилення, температурна стабільність режимів роботи, можливість випромінювання у видимому та інфрачервоному діапазонах, що дозволяє використовувати їх в телекомунікаційних підсилювачах і процесах перебудови частоти випромінювання. Лазери на квантових точках в структурах InGaAs/GaAs дозволяють використовувати добре розвинену технологію підкладок GaAs і в той же час довжина хвилі їх випромінювання лежить у діапазоні пропускання оптоволокна (1,3 мкм) оптоволоконних локальних мереж.

2.10 Комп'ютерне моделювання лазера з подвійною гетероструктурою і роздільним обмеженням

Комп'ютерне моделювання (КМ) електронних приладів застосовується для вивчення фізичних процесів, що відбуваються в них, і для оптимізації їхніх технічних характеристик. Методологічно ця сфера наукової й інженерної діяльності може бути поміщена між теорією й експериментом. При цьому КМ не заміняє теорію й експеримент, а доповнює їх. Коректно проведене КМ може полегшити розуміння фізичних явищ, допомогти в плануванні експерименту й в інтерпретації експериментальних даних.

Предметом дослідження в нашій роботі є напівпровідниковий лазер на основі AlGaAs з подвійною гетероструктурою (ПГС) і роздільним обмеженням (РО), що є одним з найпоширеніших приладів сучасної оптоелектроніки [24].

Для моделювання електричних (вольт-амперних) і оптичних (ват-амперних) характеристик напівпровідникового лазера з подвійною гетероструктурою і роздільним обмеженням методом кінцевих елементів ми використовували пакет програм приладо-технологічного моделювання Sentaurus TCAD фірми Synopsys [25]. Моделювання велося в рамках дрейфово-дифузійної моделі напівпровідника. Моделювання було спрямовано на вивчення впливу параметрів КЯ на підпорогові й граничні електрооптичні характеристики лазера з подвійною гетероструктурою і роздільним обмеженням. При цьому, ширина квантових ям визначалася геометричним розміром d_a активної області. Глибину квантових ям ми могли змінювати задаючи різні значення x молярної частки Al в області $Al_xGa_{1-x}As$ хвилеводу.

Ми встановили, що підпорогові й граничні характеристики лазера з подвійною гетероструктурою і роздільним обмеженням залежать від числа зв'язаних рівнів квантових ям й близькості вищих рівнів у ямі до рівня дна зони провідності або до рівня стелі валентної зони в матеріалі хвилеводу. Обробляючи результати моделювання, ми побудували залежність граничного струму лазера

I_{th} від ширини квантових ям d_a . На цій залежності ми виявили розриви у вигляді порогів [26, 27].

Провівши ретельний аналіз результатів моделювання, ми прийшли до висновку, що спостережувані розриви відбуваються, коли верхній зв'язаний рівень у квантових ямах перетинає зону провідності (E_{CVO}) або валентну зону (E_{VBO}) [26, 27]. При моделюванні в [26, 27] ми використовували параметри, що визначають час розсіювання на квантових ямах, запропоновані в програмі TCAD за замовчуванням.

У даній роботі ми досліджуємо вплив ролі часу розсіювання носіїв заряду на квантових ямах на залежність граничного струму від ширини квантових ям лазера з подвійною гетероструктурою і роздільним обмеженням. Ми виявили, що час розсіювання носіїв на квантових ямах визначає амплітуду розривів на залежності граничного струму від ширини квантових ям. Результати моделювання показують, що щільність струму нижче порога генерації й гранична щільність струму зменшуються зі збільшенням часу розсіювання носіїв на квантових ямах. При цьому амплітуда розривів також зменшується (рис. 2.12).

Ми моделюємо лазер, що має розміри, структуру й рівні легування відповідно лазеру, що досліджувався Андрєєвим і ін. у роботах [28, 29], з довжиною хвилі 808 нм, шириною квантових ям, d_a , 12 нм і шириною обох хвилеводів 0,2 напівтемний. Параметри моделювання, пов'язані з поглинанням світла й розсіюванням носіїв заряду, ми задавали, опираючись на доступні експериментальні дані.

Значення параметрів $eQWMobility$ і $hQWMobility$ рівні 9200 і 400 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, відповідно. Для кривих від А до D (зверху долілиць) значення пари параметрів, використаних в Synopsys TCAD, ($QweScatTime$, $QwhScatTime$) у секундах: $(10^{-13}, 5\cdot 10^{-14})$, $(8\cdot 10^{-13}, 4\cdot 10^{-13})$, $(4\cdot 10^{-12}, 2\cdot 10^{-12})$, $(10^{-11}, 5\cdot 10^{-12})$.

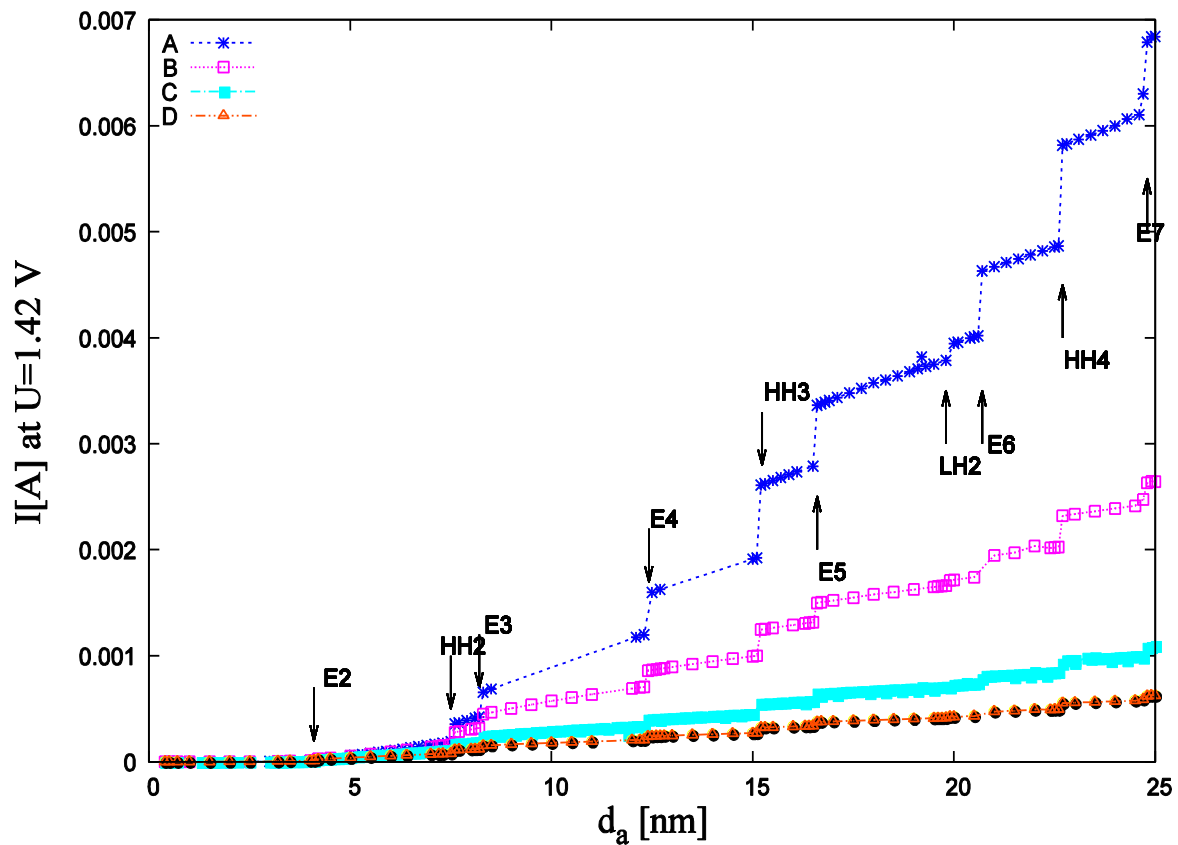


Рисунок 2.12 - Залежність струму від ширини квантових ям

Ефект повинен бути більше виражений при низьких температурах, що підтверджується результатами моделювання $I(d_a)$ при температурі рідкого азоту [3]. Ефект спостерігається також при моделюванні струму залежно від глибини ями (від концентрації Al у хвилеводі).

Ми прийшли до висновку, що подібний ефект повинен спостерігатися й при моделюванні струму через напівпровідниковий лазер як функції температури при постійній напрузі на напівпровідниковий лазер. При цьому параметри квантових ям повинні бути обрані так, щоб самий верхній енергетичний стан квантових ям проходило через край квантової ями при зміні температури в розглянутому діапазоні. Ми припускаємо, що експериментальне вивчення характеристик напівпровідника в умовах зміни одноосьового або гідростатичного тиску може допомогти пронаблюдати і вивчити ефект граничної зміни характеристик. Результати нашого дослідження можуть бути корисні при проектуванні напівпровідниковий лазер, дозволяючи оптимізувати концентрацію Al , товщину активної області й т.д. Виміри й аналіз характеристик напівпровідниковий ла-

зер із граничними розривами може виявитися основою нової практичної методики спектроскопії квантових рівнів квантових ям.

3 НАНОЕЛЕКТРОННІ ФОТОДЕТЕКТОРИ

3.1 Інфрачервоні фотодетектори на квантових ямах

Інфрачервоні фотодетектори, що працюють у діапазоні довжин хвиль 3 - 12 мкм, застосовуються для ідентифікації газів в атмосфері, тому що багато хімічних сполук мають характеристичні спектри поглинання в цій області. Вони також використовуються в приладах нічного бачення, оскільки пік випромінювання чорного тіла кімнатної температури лежить у районі 10 мкм і в цій області атмосфера має вікно прозорості.

Існують різні типи фотодетекторів, використовуваних у цьому спектральному діапазоні:

- а) на міжзонному поглинанні у вузькозонних напівпровідниках (CdHgTe, InSb і ін.) (рис. 2.1 а),
- б) на домішковому поглинанні (рис. 3.1 б),
- в) на внутрішньозонних переходах у квантово-розмірних гетероструктурах (рис. 3.1 в).

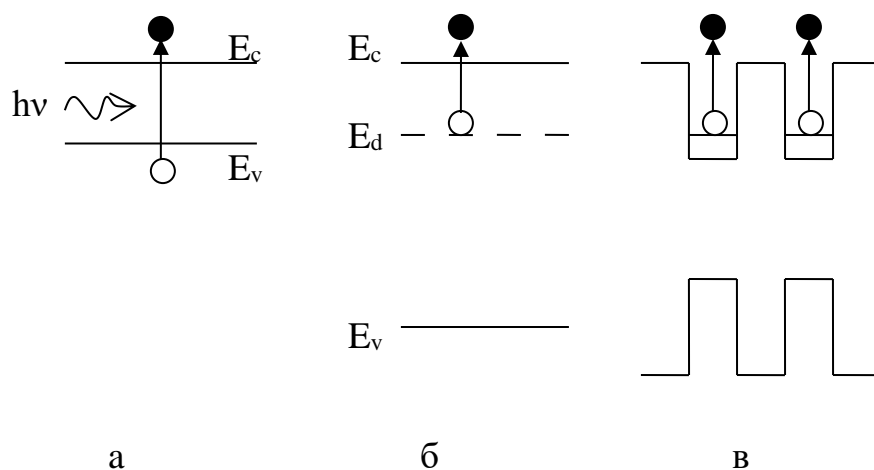


Рисунок 3.1 – Типи ІЧ фотодетекторів: а) на міжзонних оптичних переходах, б) на домішкових переходах, в) на внутрішньозонних переходах у квантово-розмірних структурах

Червона границя fotocутливості фотодетекторів першого типу визначається шириною забороненої зони напівпровідника; другого типу - енергією іонізації домішки, третього типу - висотою потенційного бар'єра у квантово-розмірних шарах. У детекторах третього типу на багат шарових структурах із квантовими ямами (МСКЯ) з'являється можливість управляти характеристиками приладу зміною ширини й состава квантових ям.

Фотопровідність у таких фотодетекторах здійснюється за рахунок порушення носіїв заряду (електронів або дірок) із шарів з розмірним квантуванням у стани над бар'єром і наступним дрейфом їх у зовнішнім електричному полі. Принципова відмінність цих детекторів від детекторів на домішковому поглинанні полягає, по-перше, в упорядкованому положенні фотоактивних носіїв у шарах, розділених потенційними бар'єрами. Бар'єрні шари обмежують величину наскрізного темного струму й дозволяють варіювати концентрацію легуючої домішки в них у широких межах, що важливо для детекторів цього типу. По-друге, просторове обмеження електрона й дірки в квантових ям забезпечує більшу силу осцилятора й тим самим збільшує коефіцієнт поглинання. По-третє, зміна геометрії й состава квантово-розмірних шарів дозволяє змінювати спектральні й інші характеристики фотоприймальних пристроїв (спектр fotocутливості, темновий струм і ін.) у широких межах.

Найбільше поширення одержали квантово-розмірні гетероструктури на основі з'єднань A^3B^5 (GaAs і його твердих розчинів). Потенційна перспективність таких гетероструктур полягає у високому рівні розвитку GaAs-Технології, включаючи технологію молекулярно-променевої й газо-фазної епітаксії, і в можливості високого рівня інтеграції фотоприймальних елементів і електронних елементів обробки сигналів.

Недоліком фотодетекторів на основі багат шарових квантових ямах є низька квантова ефективність біля 2-3%, тоді як для фотоприймачів на міжзонних переходах в вузкозонних напівпровідниках біля 60-90%.

3.2 Енергетичний спектр електронів у квантовій ямі

Розглянемо питання про енергетичний спектр 2D газу на прикладі гетероструктури GaAs/In_xGa_{1-x}As з однієї КЯ, утвореної шляхом вбудовування тонкої (~1÷10 нм) прошарку твердого розчину In_xGa_{1-x}As у відносно більше товстий (~1 мкм) шар GaAs. Оскільки ширина забороненої зони твердого розчину In_xGa_{1-x}As $E_g(x)$ менше ширини забороненої зони GaAs ($E_{g0} \approx 1.426$ еВ) і на границі цих матеріалів утвориться гетероперехід так званого « \llcorner » типу, що охоплює. Розриви зони провідності $\Delta E_c(x)$ і утворять потенційну яму для електронів у напрямку осі z , перпендикулярної площини шаруючи (рис. 3.2). Якщо ширина ями l_a порівнянна з дебройлевською довжиною хвилі електронів і дірок, розмірне квантування z -компонента хвильового вектора \mathbf{k} і відповідного компонента енергії стає істотним.

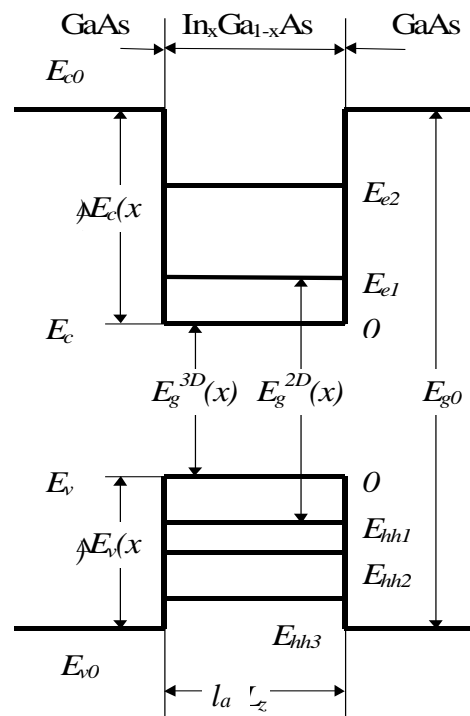


Рисунок 3.2 – Енергетична діаграма КЯ InGaAs в GaAs

Енергетичний спектр електронів у ямі E_n і хвильова функція, що обгинає $n(z)$ перебувають із одноелектронного рівняння Шредингера

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m_e} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + E_c(z) \right) \chi_n(z) = E_n \chi_n(z), \quad (3.1)$$

де m_e - ефективна маса електронів, функція $E_c(z)$ описує профіль потенційної ями.

У площині квантової ями рух електронів залишається необмеженим. Тому про електрони у квантовій ямі говорять як про двовимірний електронний газ. Енергетичний спектр x - x і y -компонент енергії 2D газу є квазінеперервним, як і в тривимірному матеріалі.

У наближенні квадратичного закону дисперсії (параболічних зон) повна енергія електрона у квантовій ямі може бути записана у вигляді:

$$E = \frac{\hbar^2}{2m_e} (k_x^2 + k_y^2) + E_n. \quad (3.2)$$

Для найпростішого випадку прямокутної потенційної ями з нескінченно високими стінками

$$E_n = E_{e1} n^2, \quad (3.3)$$

$$E_{e1} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_e l_a^2} \quad (3.4)$$

хвильові функції, Що Обгинають, двох зв'язаних у КЯ станів і стану в безперервному спектрі показані на рис. 3.3.

Проаналізуємо міжпідзонні переходи в зоні провідності. Припускаючи рівність ефективних мас для ями й бар'єра, можна показати, що матричні елементи для переходів між станами з однієї зони пропорційні $\delta_{pp'}$ (тобто 2 D-D- мірний імпульс p зберігається) і визначаються поперечною хвильовою функцією $\varphi_n(z)$

$$\langle n\mathbf{p}|\hat{v}_i|n'\mathbf{p}'\rangle = \delta_{\mathbf{p}\mathbf{p}'} \begin{cases} 0, & i = x, y, \\ v(n, n'), & i = z; \end{cases} \quad (3.5)$$

$$v(n, n') = \frac{1}{m} \int dz \varphi_n^*(z) \hat{p}_z \varphi_{n'}(z),$$

де n, n' - квантові числа, що характеризують рух у напрямку z для симетричної КЯ.

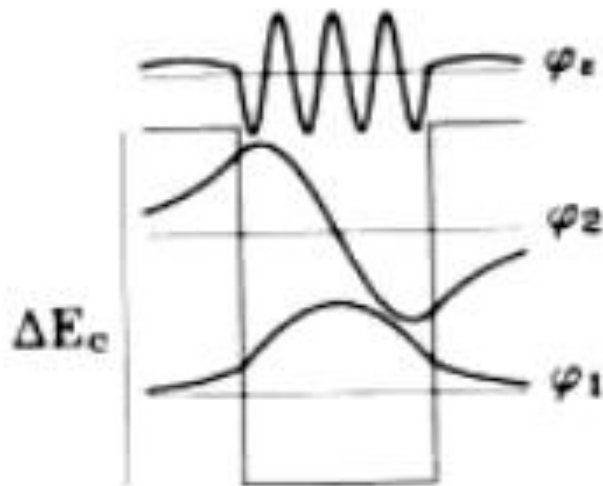


Рисунок 3. 3 – Хвильові функції електронів у КЯ

Використовуючи (3.5), можна показати, що переходи між станами з однаковою парністю заборонені, і матричний елемент $v(n, n')$ обернено пропорційний ширині ями d для переходів між дискретними станами. Для переходів з основного стану ($n=1$) у безперервний спектр, де стану характеризується поперечною енергією $E_t = E - p^2/2m$, матричні елементи пропорційні $1/\sqrt{l_a}$. Біля краю безперервного спектра, для $E_t \approx 0$ матричний елемент $v(n, E_t)$ має сингулярність (особливість) для певних резонансних ширин ями. Причиною цієї сингулярності є те, що при таких значеннях d яма містить дрібний зв'язаний стан з дуже низькою енергією зв'язку, що приводить до резонансного посилення цього переходу при малому E_t . Хвильова функція резонансного стану безперервного спектра локалізована

поблизу ями й має гарне перекриття з основним станом, що приводить до збільшення відповідного матричного елемента.

Коефіцієнт ІЧ поглинання квантових, обумовлений як відношення поглиненої потужності випромінювання до падаючої, для переходів із заповненого основного стану $|1\rangle$ з концентрацією N_{2D} у перший порожній збуджений стан $|2\rangle$ визначається вираженням:

$$\alpha_v = \frac{2\pi q^2}{\nu c \sqrt{\epsilon}} \cos^2 \theta |\nu(1, 2)|^2 N_{2D} \delta_{\Gamma}(\epsilon_1 - \epsilon_2 + h\nu), \quad (3.6)$$

де θ – кут між напрямком електричного поля електромагнітної хвилі \mathbf{E} і одиничним вектором по осі z \mathbf{e}_z . З (2.6) треба, що при внутрішньозонних переходах, на відміну від міжзонних переходів, КЯ не поглинає випромінювання, що падає по нормалі до площини ями. Оскільки висвітлення зразка через бічний відкол мало ефективно, те звичайно в таких приладах уведення випромінювання здійснюється під кутом до площини КЯ через ямки травлення (рис. 3.4.).

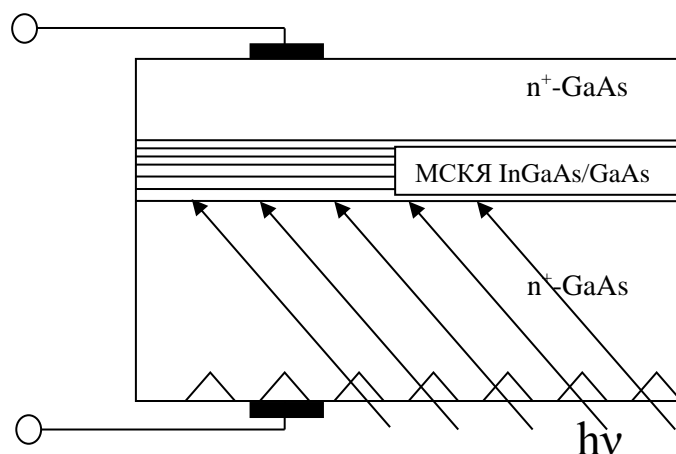


Рисунок 3.4 – Структура фоторезистивного ІЧ-фотодетектора

Пік міжпідзонного поглинання має кінцеву ширину. Величина поглинання в піку для однієї КЯ може досягати декількох відсотків.

3.3 Фоторезистивний ефект у структурах із квантовими ямами при межпідзонному поглинанні

Зонна діаграма частини МСКЯ InGaAs/GaAs (число ям порядку 10) зображена на рис. 3.5. Товщина шарів КЯ InGaAs l_a і бар'єрних шарів GaAs l_b ~ 5 і ~ 50 нм відповідно.

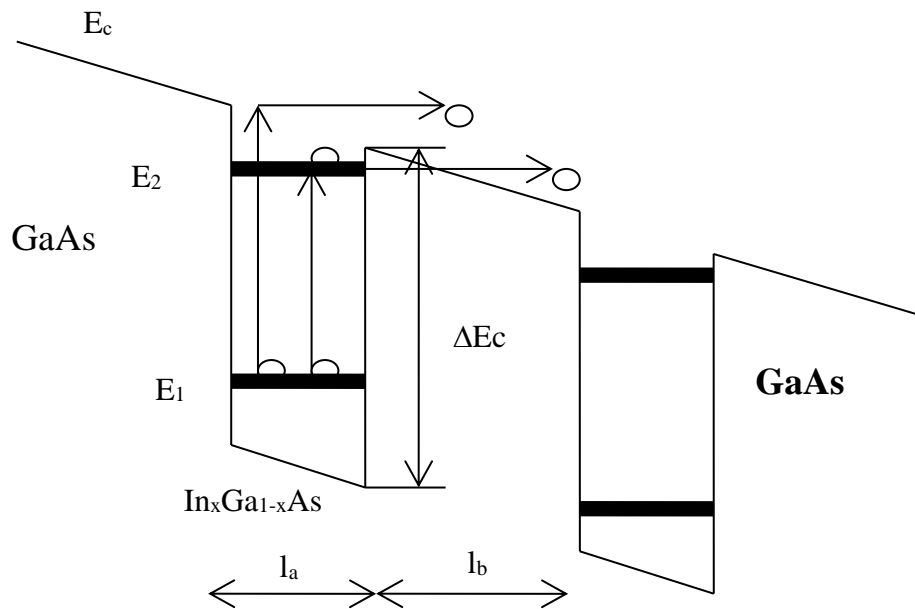


Рисунок 3.5 – Енергетична діаграма зони провідності МСКЯ: E_1 і E_2 – рівні розмірного квантування для поперечного руху електронів, E_c – край зони провідності бар'єра.

Бар'єрні шари GaAs легуються донорною домішкою Si з концентрацією, що забезпечує часткове заповнення першої підзони з поверхневою концентрацією електронів у квантовій ямі

$$N_{2D} = \frac{m}{\pi \cdot h^2} \cdot \Delta E, \quad (3.7)$$

де $\Delta E = E_F - E_1$, E_F – рівень Фермі. Збільшення ΔE збільшує коефіцієнт поглинання й, отже, фоточутливість, однак, при цьому зростає наскрізний темновий

струм через структуру, що збільшує рівень шуму й зменшує граничну виявляюча здатність детектора. Оптимальне заповнення першої підзони в КЯ $\Delta E \sim 50$ мэВ визначається з умови оптимізації цих характеристик. При оптимальному ΔE електронний газ у КЯ InGaAs сильно вироджені.

Параметри фотоприймача (спектральна залежність фоточутливості, гранична виявляюча здатність, темновий струм і ін.) залежать від положення рівнів квантування E_n відносно один одного й щодо потенційного бар'єра (край зони провідності GaAs), від величини тягнучого електричного поля, робочої температури й розмірів окремого фотоприймального елемента. Для приймача випромінювання найважливішим параметром є гранична інтенсивність випромінювання P_{th} , при якій реєструємий фотострум дорівнює власним струмовим шумам фотоприймача.

Установлено, що основним шумом у багатошаровій квантовій ямі є дробовий шум темного струму

$$i_n = \sqrt{4qI_d\gamma\Delta f}, \quad (3.8)$$

де q – заряд електрона, I_d – темновий струм, $\gamma = \frac{L}{N(l_a + l_b)}$ – так зване фотоелектричне посилення фотодетектора (L — довжина вільного пробігу фотоелектронів у МСКЯ, l_b – ширина бар'єра GaAs, l_a – ширина КЯ InGaAs, $N(l_a + l_b)$ – повна товщина структури з N періодів), Δf – смуга пропускання підсилювального тракту.

Зміною параметрів квантової ями (ширини й состава) і рівня легування бар'єра домагаються зменшення I_d при заданому спектральному діапазоні й квантовій ефективності.

Темновий струм I_d у структурі, зображеної на рис. 3.4, складається з термоактиваційної і тунельної складових і в загальному випадку має вигляд:

$$I_d = \frac{qm^*\nu(V)}{\pi\hbar(l_a + l_b)} \int_{E_1}^{\infty} f(E)T(E,V)dE, \quad (3.9)$$

де

$$v(V) = \frac{\mu_n F}{\sqrt{1 + \mu_n F / v_s}} \quad (3.10)$$

- дрейфова швидкість електронів у бар'єрних шарах GaAs в електричному полі

$$F = \frac{V}{N(l_a + l_b)} \quad (3.11)$$

$v_s = 2 \cdot 10^7$ см/з – дрейфова швидкість насичення, $\mu_n = 4000$ див²/(В с) – рухливість електронів в GaAs, E_1 – енергія першого рівня квантування в шарі КЯ In_xGa_{1-x}As, $f(E)$ – функція Фермі розподілу двовимірного електронного газу, $T(E, V)$ – імовірність емісії електронів із шару InGaAs у стани над бар'єром, N – число КЯ In_xGa_{1-x}As.

Залежність $T(E, V)$ від зовнішнього зсуву V ураховує зниження висоти бар'єра ΔE_c (рис. 3.5) для гарячих електронів, що мають енергію $E \approx \Delta E_c$. При $E > \Delta E_c$, якщо не враховувати відбиття від границі InGaAs/GaAs, можна покласти, $T(E, V) = 1$.

Падаюче на фотодетектор випромінювання інтенсивністю P (квант/см² с) створить фотострум:

$$I_\phi = q\eta N\gamma \quad (3.12)$$

де $\eta \ll 1$ квантова ефективність одного періоду багат шарової квантової ями, γ - коефіцієнт фотоелектричного посилення.

Гранична інтенсивність випромінювання

$$P_{th} = \frac{i_n}{q\eta N\gamma}$$

(3.13)

Оптимізація параметрів фотоприймача складається в зменшенні значення P_{th} при збереженні діапазону спектральної фоточутливості багатощарової квантової ями. З (3.4) слідує, що спектр фоточутливості МСКЯ залежить від ширини квантової ями l_a . P_{th} залежить від положення E_2 другі рівні квантування щодо краю зони провідності GaAs, концентрації носіїв N_{2D} у шарі InGaAs і середньої довжини вільного пробігу, що визначає значення γ .

Положення рівня Ферми в КЯ визначається виразом:

$$E_F = E_1 + \frac{N_{2D}\pi\hbar^2}{m^*} . \quad (3.14)$$

Темновий струм

$$I_d \sim e \frac{N_{2D}\pi\hbar^2}{m^*kT} \quad (3.15)$$

експоненціально росте зі збільшенням концентрації легуючої домішки, що визначає величину N_{2D} . Коефіцієнт поглинання змінюється пропорційно концентрації N_{2D} . Легко показати, що оптимальна концентрація N_{2D} , при якій досягається мінімальне значення P_{th} ,

$$N_{2D} = \frac{2m^*kT}{\pi\hbar^2} . \quad (3.16)$$

Другим важливим параметром, що визначає P_{th} , є висота бар'єра ΔE_c , що визначається матеріалом бар'єрного шару (GaAs).

Існує два типи фоточутливих структур. Структури із дрібною квантовою ями, коли

$$\Delta E_c < \frac{2\pi\hbar^2}{m^*l_a^2} \quad \text{і} \quad h\nu + E_1 > \Delta E_c . \quad (3.17)$$

У цьому випадку є тільки одна підзона в квантовій ямі, і збудження фотоелектронів відбувається з рівнів цієї підзони в стани квазінеперервного спектру над бар'єром з наступним дрейфом у зовнішнім полі.

Структури із глибокої квантової ями, коли

$$\Delta E_c > \frac{2\pi\hbar^2}{m^* l_a^2}. \quad (3.18)$$

У цьому випадку можливі також переходи між двома підзонами з наступним або тунелювання через залишковий бар'єр висотою $\Delta E_c - E_2$ або релаксацією в основний стан.

Якщо $\hbar\nu + E_1 > \Delta E_c$, те коефіцієнт поглинання й квантова ефективність зменшуються зі збільшенням кінцевої енергії фотоелектрона $\hbar\nu + E_1$ у зв'язку зі зменшенням сили осцилятора для таких переходів. З іншого боку, якщо

$$\Delta E_c \gg \frac{2\pi\hbar^2}{m^* l_a^2} \text{ й } \hbar\nu + E_1 < \Delta E_c, \text{ те переходи здійснюються між двома підзонами в квантовій ямі. Квантова ефективність також буде мала через зменшення ймовірності емісії електронів з квантової ями в бар'єр.}$$

Квантова ефективність також буде мала через зменшення ймовірності емісії електронів з квантової ями в бар'єр.

Оптимальної є структура МСКЯ, при якій рівень E_2 перебуває поблизу вершини бар'єра ΔE_c і задовольняється умова

$$W(V) = \frac{1}{\tau_w} \gg \frac{1}{\tau_{21}}, \quad (3.19)$$

де $W(V)$ — ймовірність тунелювання через трикутний у зовнішнім електричному полі (3.11) бар'єр в GaAs, $\tau_{21} \approx 10^{-13}$ с — час життя на збудженому рівні стосовно випущення оптичного фонона, тобто час релаксації в основний стан, τ_w — час життя стосовно емісії електрона з квантової ями.

При цьому зі зростанням величини $\Delta E_c - E_2 > 0$ збільшується коефіцієнт поглинання через більшу локалізацію хвильової функції стану з енергією E_2 .

Час життя τ_w на рівні порушення E_2 стосовно тунелювання через трикутний бар'єр

$$\tau_w = \frac{2l_a m^*}{\sqrt{2m^* \varepsilon_2 W^2}}, \quad (3.20)$$

де ймовірність тунелювання

$$W(\varepsilon) = \exp(-4(\Delta E_c - E_2)^{1.5} \frac{\sqrt{2m^*}}{3\hbar q E}). \quad (3.23)$$

Як уже було сказано вище, для досягнення високої квантової ефективності необхідне виконання умови $(t_{21}/t_w) \gg 1$. Звичайно застосовуються МСКЯ-структури із числом шарів $N = 50$ і періодом 50 нм. Напряга зсуву V на структурі вибирається в діапазоні 0.5 – 2.0 В.

Фотострум I_ϕ у загальному випадку має два компоненти

$$I_\phi = I_b(h\nu, V) + I_1(h\nu, V), \quad (3.24)$$

де $I_b(h\nu, V)$ – фотострум при порушенні електронів у стани над бар'єром, $I_1(h\nu, V)$ – фотострум, пов'язаний з порушенням фотоелектронів у другу підзону в ямі InGaAs.

У першому наближенні компонента фотоструму мають вигляд

$$I_b(h\nu, V) = \alpha(h\nu) n_0 t_{b1}(V) v(V) q S P, \quad (3.25)$$

$$I_1(h\nu, V) = \alpha(h\nu) n_0 W(E) t_{b1}(V) v(V) q S P / (W(E) - \tau_w / \tau_{21}), \quad (3.26)$$

де дрейфова швидкість у бар'єрному шарі

$$v(V) = \frac{\mu V}{N(l_a + l_b) \sqrt{1 + \left(\frac{\mu V}{v_s N(l_a + l_b)}\right)^2}}, \quad (3.27)$$

μ – рухливість електронів і v_s – дрейфова швидкість насичення в GaAs, τ_{b1} – час життя збудженого носія заряду в стани в зоні провідності GaAs стосовно захвата на основний рівень у ямі InGaAs, $\alpha(\hbar\omega)$ - коефіцієнт поглинання ІЧ-випромінювання, S – площа фотоприймача, n_0 – концентрація носіїв першої підзони InGaAs, при низьких температурах $n_0=N_{2D}$.

3.4 Практична частина розділу

Для спектральних досліджень у середньому й далекому ІЧ діапазоні в даній роботі використовується фур'є-спектрометр. В основі фур'є-спектрометра лежить двопроменевий інтерферометр Майкельсона, у якому передбачається паралельне переміщення одного із дзеркал уздовж оптичної осі приладу (рис. 3.6).

При фотоелектричних вимірах досліджуваний зразок поміщають в одне із плечей інтерферометра й виміряється залежність фотосигналу F зразка (фотонапруга або фотострум) від різниці ходу Δ двох пучків світла в інтерферометрі, що називається інтерферограмою $F(\Delta)$. Типовий вид інтерферограми наведений на рис 3.7.

Другий етап складається в розшифровці інтерферограми. Шляхом зворотного перетворення Фур'є функції $F(\Delta)$ у комп'ютері визначається спектр фоточутливості зразка $S_{ph}(\lambda)$, з урахуванням розподілу інтенсивності в спектрі падаючі на зразок випромінювання $P(\lambda)$.

Оптична схема фур'є-спектрометра Digilab FTS-7000 наведена на рис. 3.7. Інтерферометр приладу складається з нерухливого й рухливого дзеркала й світлоподільника. Світлоподільник для середнього ІК діапазону являє собою плоскопаралельний кристал KBr. Він відбиває половину падаючі на нього світла на

рухливе дзеркало, а половина проходить крізь нього на нерухливе дзеркало. Відбиваючись від цих дзеркал, світло вертається до світлоподільника й, вийшовши з інтерферометра, фокусується параболічним дзеркалом на поверхню зразка.

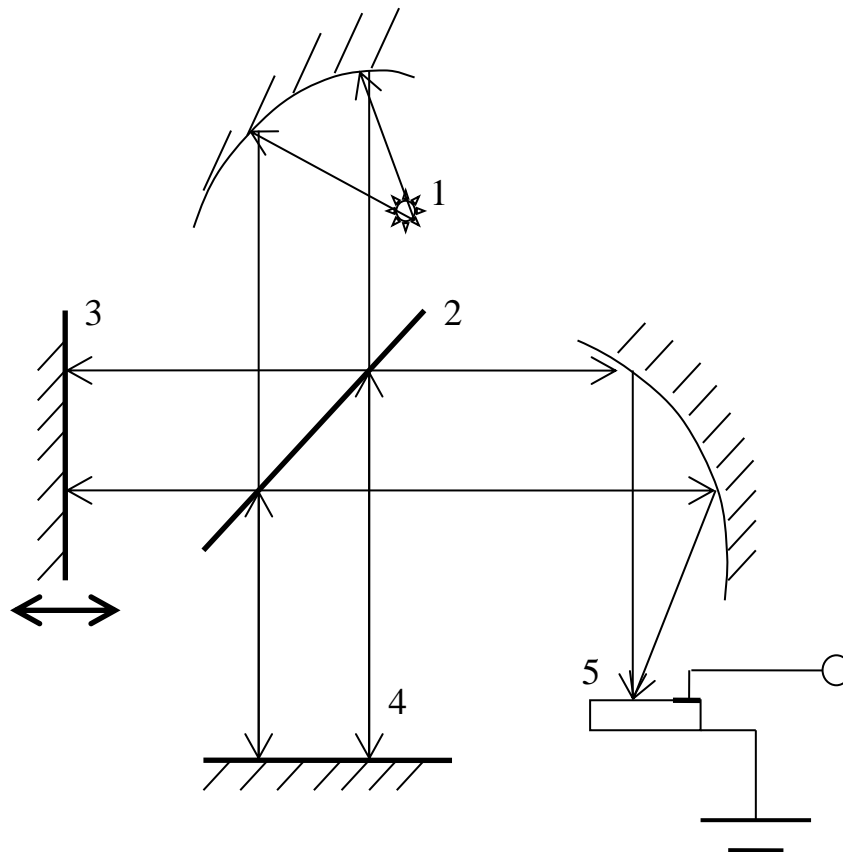


Рисунок 3.6 – Структурна схема фур'є-спектрометра:

- 1 - джерело світла, 2 - світлоподільник, 3 - рухливе дзеркало,
4 - нерухливе дзеркало, 5 - досліджуваний зразок

При різних положеннях рухливого дзеркала змінюється різниця ходу між двома інтерферуючими променями. Інтенсивність падаючого на зразок пучка, таким чином, залежить від положення рухливого дзеркала. Для визначення різниці ходу в приладі використовується He-Ne лазер. Промінь цього лазера також проходить через інтерферометр і попадає на детектор випромінювання He-Ne лазера. Таким чином, при русі дзеркала одночасно із записом інтерферограми зразка записується опорний сигнал по якому, знаючи довжину хвилі He-Ne ла-

зера (632,8 нм), визначається різниця ходу. Стабільність довжини хвилі випромінювання лазера забезпечує високу точність визначення різниці ходу.

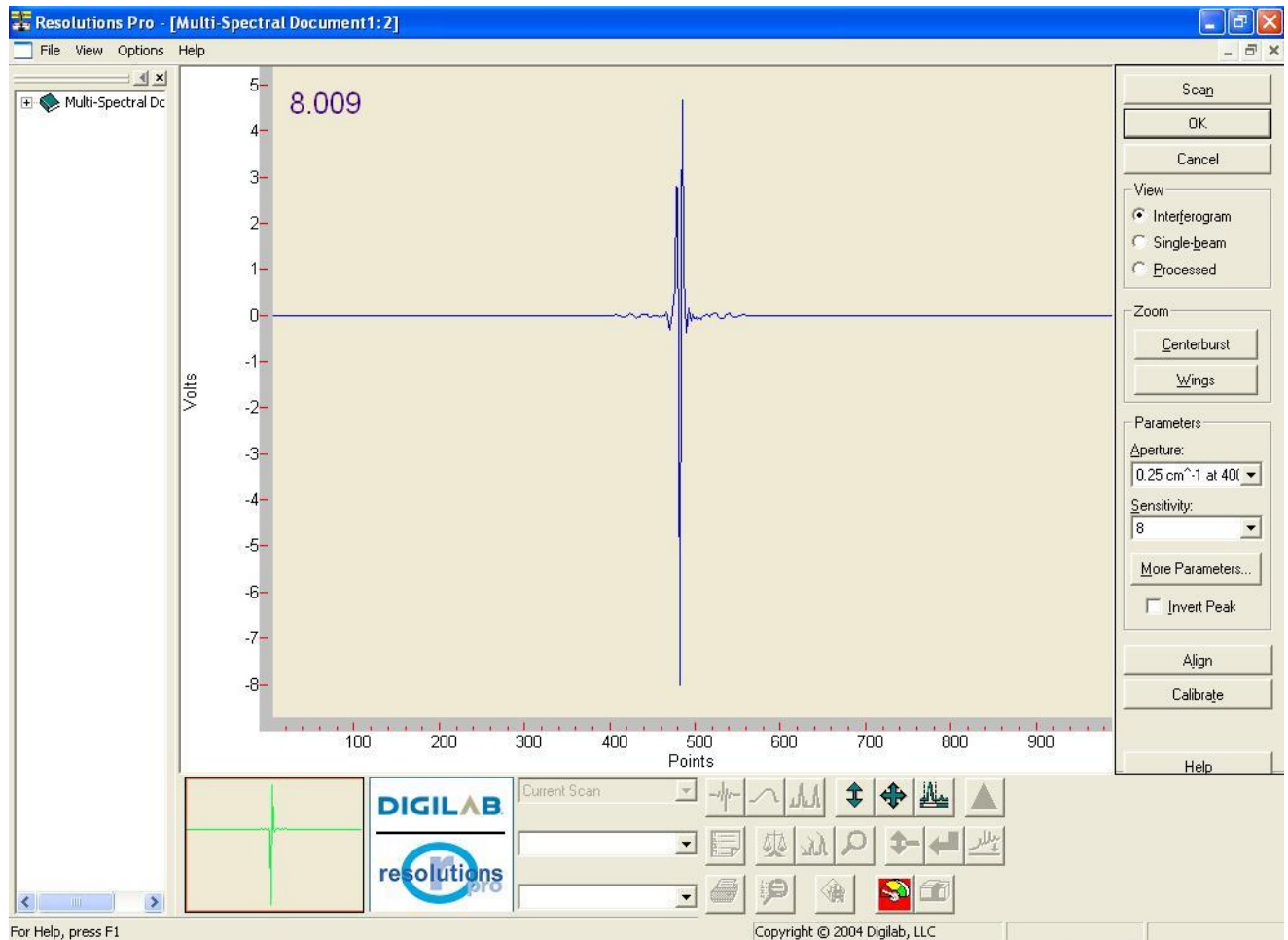


Рисунок 3.7 - Вікно програми Resolutions Pro. Інтерферограма

Для виміру фотопровідності багатошарових квантових ям включається в електричне коло наведену на рис. 3.9. Сигнал, пропорційний току через багатошарові квантові ями знімається з опору навантаження R_n приблизно рівного опору зразка. Для подачі напруги зсуву використовується батарея V_B .

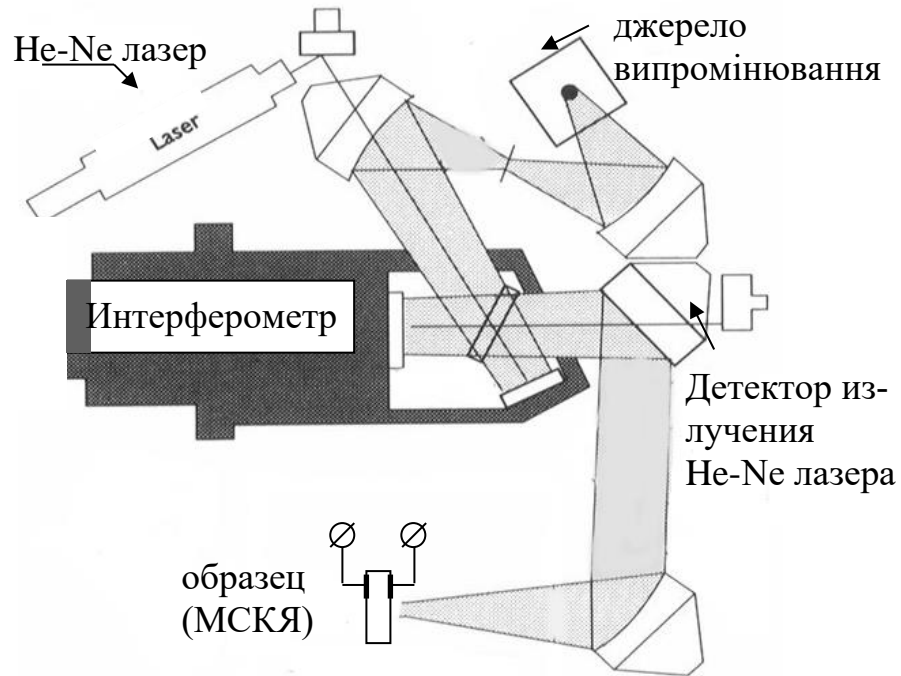


Рисунок 3.8 – Схема фур'є-спектрометра Digilab FTS-7000

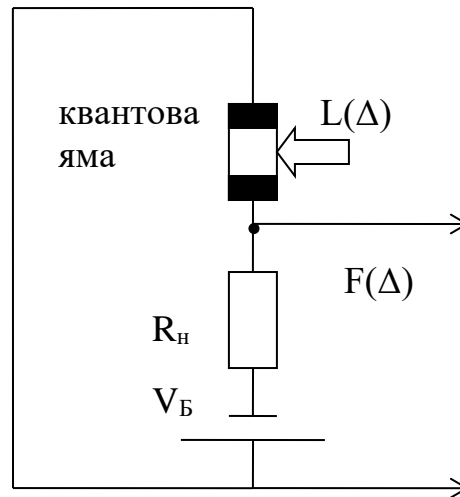


Рисунок 3.9 - Електрична схема для виміру фотопровідності

4 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ПРИБОРІВ НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ ДІОДІВ

4.1 Оптоелектронний генератор детермінованого хаосу типу Лієнара на основі резонансно-тунельних фотодіодів з колом запізнення у зворотному зв'язку

Системи з затримкою зворотного зв'язку поширені в наукових областях, таких як фізіологія, біологія, хімія та лазерні системи [31]. Залежно від того, як він налаштований, додавання петлі зворотного зв'язку із затримкою в систему може стабілізувати вихідний сигнал, генеруючи високостабільні періодичні сигнали [32], або може створювати надзвичайно складну динаміку, а саме хаос [33] - [35]. Крім того, було продемонстровано, що динаміку таких систем можна легко синхронізувати і контролювати за допомогою зовнішніх збурень або параметрів зворотного зв'язку [36], [37].

Ефект відстроченої зворотного зв'язку полягає в повторному введенні в систему однієї або декількох змінних стану з затримкою. В області лазерної динаміки найбільш яскравими прикладами є зміни оптоелектронної зворотного зв'язку [38], оптичної зворотного зв'язку [39] - [41] і оптоелектронного генератора (ОЕО) [32]. Оптоелектронна зворотний зв'язок складається з повторного введення струму виявленого вихідного сигналу лазера з використанням швидкодіючого фотодіода, який генерує струм, який є зображенням вихідної потужності лазера, і який додається після часу затримки до току збудження лазера. У зовнішній оптичної зворотного зв'язку лазерних систем зовнішнє дзеркало використовується для оптичного повторного введення частини світла, випромінюваного лазером, в його активну область, а час кругового переміщення світла в зовнішній порожнині вносить затримку. У системах ОЕО зовнішні елементи (електрооптичні модулятори, радіочастотні генератори і т. Д.) Використовуються для створення нелінійностей, а лазерний діод (LD) використовується тільки в якості джерела світла. Структурна та функціональна схеми пристрою наведені у Додатку Б (08-36.МКР.006.00.001 ПЛ).

Оптоелектронні генератори, що поєднують електронні та фотонні компоненти, інтенсивно вивчалися для досягнення стабільних і високочистих радіочастотних сигналів. Типовий ОЕО включає в себе лазерний джерело, модулятор інтенсивності, фотоприймач, смуговий фільтр і РЧ-підсилювач в одноконтурній конфігурації оптичного волокна [32]. В даний час число описаних однопетльовою архітектур ОЕО значно велике і охоплює від ОЕО, заснованих на декількох типах модуляторів, до реалізацій, що використовують порожнини типу шепоче галереї (WGM), і ОЕО з волоконними лазерами, серед іншого (огляд у [42]). Також були запропоновані топології подвійного контуру ОЕО для подолання обмежень появи дуже сильних піків бічних мод в одиночних петлях на основі волокон [43] - [45].

Повідомлялося про інших конфігураціях ОЕО, що використовують блокування самоін'єкцій СВЧ-генераторів для компактних і недорогих ОЕО. Як приклад були продемонстровані топології ОЕО високої чистоти з використанням СВЧ-осциляторів з гетеропереходів на основі фосфіду індію (InP НВТ), монолітно інтегрованих з фотодіодами [46]. Зовсім недавно вперше був продемонстрований стабільний нізкофазний ОЕО, що включає в себе резонансний тунельний діод (RTD), монолітно інтегрований з хвилеводним фотодетектором (PD), і гібрид, інтегрований з лазерним діодом, і затримку оптичного волокна. лінія [47], як показано на блок-схемі рис. 4.1.

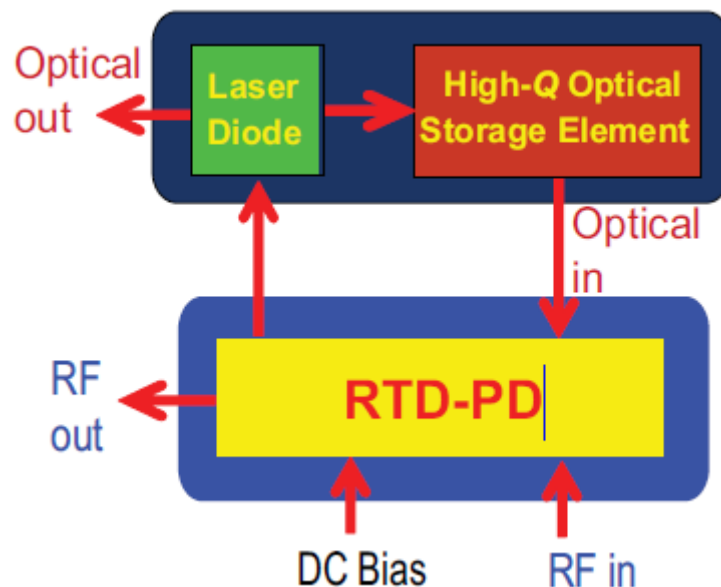


Рисунок 4.1 – Блок-схема системи RTD-ОЕО зі зворотним зв'язком по часу

ОЕО на основі RTD-PD має низькі вимоги до потужності (схеми, які використовуються в ОЕО, про яких тут повідомляється, споживають, як правило, менше 70 мВт електроенергії) без необхідності в додаткових високошвидкісних дорогих компонентах, таких як електричні підсилювачі, фотодетектори або модулятори. Крім того, RTD-ОЕО відрізняється від звичайних систем ОЕО тим, що, коли оптоволоконний контур розімкнений (елемент пам'яті з високим Q на рис. 4.1), все ще присутні самоподдерживаючіся релаксаційні коливання, які можна використовувати для електричних [48] або оптичних [49], [50], інжекційне блокування в додатках мікрохвильової фотоніки [51]. Це означає, що замість створення мікрохвильового коливання, як в типових конфігураціях ОЕО, контур зворотного зв'язку в RTD-ОЕО призводить до блокування уприскування із затриманою копією самопідтримувальних коливань.

У роботі представлено всебічне дослідження ОЕО на базі одно-і двоконтурних RTD-PD. Ми досліджуємо, як нелінійна динамічна система, заснована на диференціальних рівняннях із запізненням (DDE), може бути застосована, щоб допомогти зрозуміти резонансні тунельні діодні оптоелектронні генератори, які можуть дати початок новим технологіям, які за своєю природою є нелінійними і складного аналізу. Чисельна модель включає систему генераторів Лієнара з запізнілої зворотним зв'язком, керовану білим гаусівським шумом і пов'язану з рівняннями швидкості лазерного випромінювання. Хоча заснована на великій кількості підгінних параметрів модель, обговорювана тут, добре відображає основні особливості динаміки RTD-ОЕО, включаючи вільний спектральний діапазон (FSR) і коефіцієнт придушення бічних мод (SMSR) конфігурацій з одним і двома контурами. модель не вимагає надмірних тривалих обчислювальних симуляцій, які звичайно потрібні при аналізі систем DDE.

Лієnard оптико-електронний осцилятор (ОЕО) з затримкою зворотного зв'язку, представлений тут, надає простий спосіб вивчення динамічних систем ОЕО з затримкою зворотного зв'язку, що містять генератори негативного опору. Крім того, модель може бути розширена, щоб включити різні шумові характеристики RTDOEO, щоб краще описати кількісно наше ОЕО, надаючи корис-

ний інструмент для цілей проектування, а також дослідити складну поведінку осциляторів на основі RTD, викликане затримкою зворотного зв'язку.

План цього документа є наступним. У розділі II ми почнемо з опису RTD-PD і експериментальної установки RTD-OEO з затримкою за часом і принципу її роботи. У розділі III представлена чисельна модель RTDOEO, заснована на системі DDE з вхідним білим гауссовским шумом. У розділі IV ми показуємо експериментальні та чисельні результати одноконтурної конфігурації RTD-OEO. Розділ V слід з результатами конфігурації RTD-OEO з двома контурами і порівнянням з сучасними OEO. У розділі VI ми представляємо висновки нашої роботи.

4.2 Опис RTD-PD і установка OEO

RTD-PD являє собою пристрій з подвійною бар'єрної квантової ямою (DBQW), вбудоване в оптичну хвилевідну структуру [52], рис. 4.2, яке показує типову нелінійну вольт-амперну характеристику (IV) пристроїв RTD з негативним диференціальним опором (NDR).) Область, вставка рис. 4.2 (а). Така структура забезпечує в той же час виявлення світла, електричне посилення і дуже високошвидкісні функціональні можливості [53] (хоча в цій роботі ми представляємо результати тільки в мікрохвильовому діапазоні низьких частот спектра). RTD-PD функціонує як хвилеводний фотодетектор з енергією, близькою або перевищує енергію забороненої зони ядра хвилеводу. Його структура була вирошена методом молекулярно-променевої епітаксії в системі Varian Gen II на підкладці $n + \text{InP}$ і складалася з 2-нанометрових AlAs-бар'єрів, розділених InGaAs шириною 6 нм, вбудованих в ребристий хвилевід RTD-PD товщиною 1 мкм, які відповідають до фотопровідним верствам, як показано на діаграмі енергетичної зони на рис. 4.2 (б). Оптичний хвилевід складався з уніполярної структури InAlAs / In_{0.53}Ga_{0.42}Al_{0.05}As / InP RTD-PD (докладніше див. [49], [52]). Будова пристрою наведена у Додатку В (08-36.МКР.006.00.002 ПЛ).

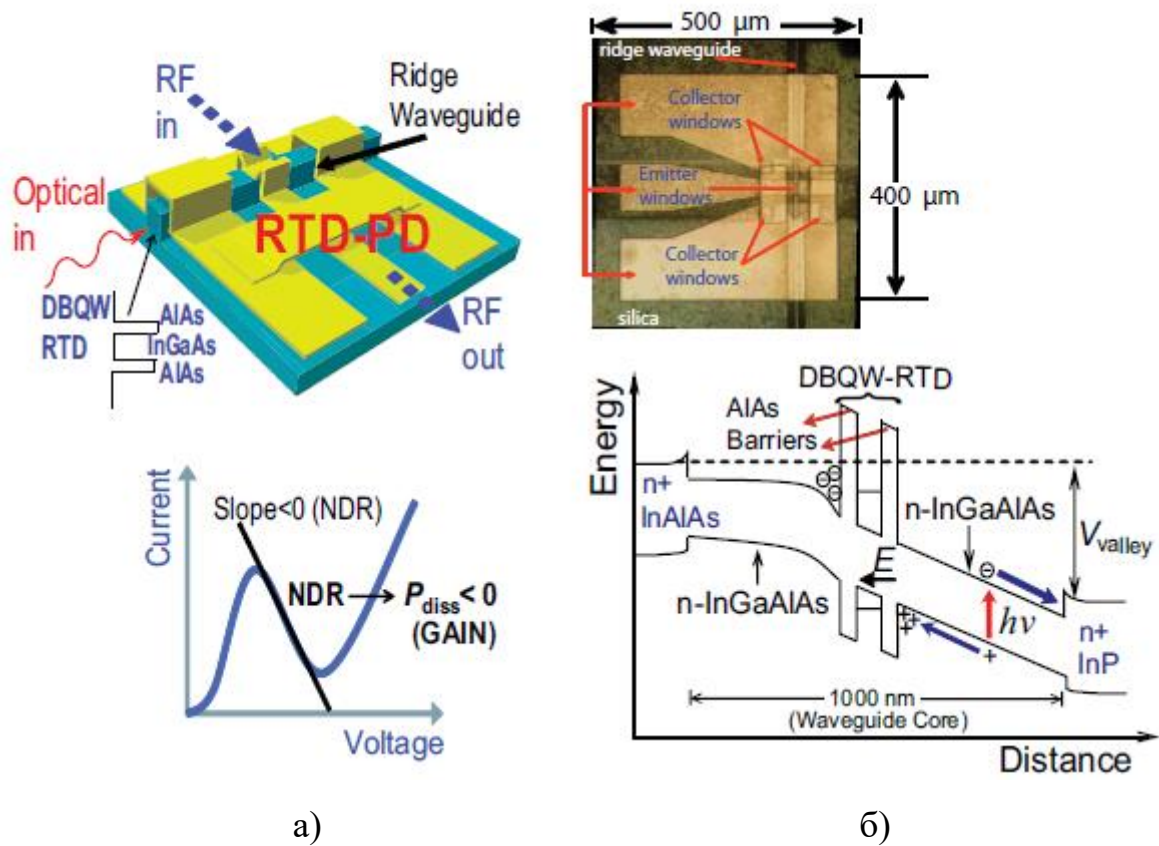
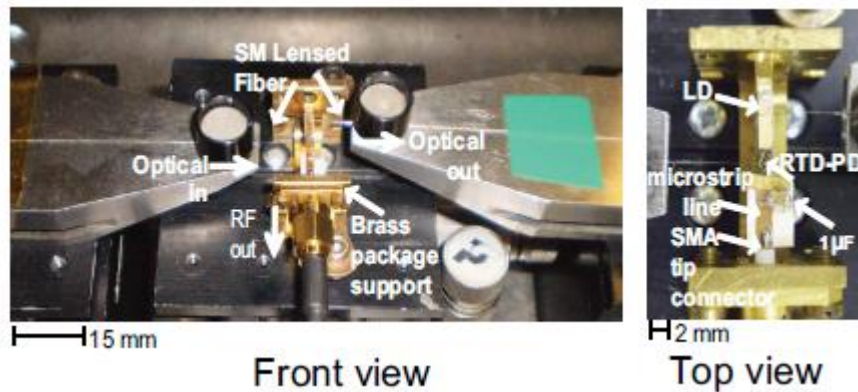


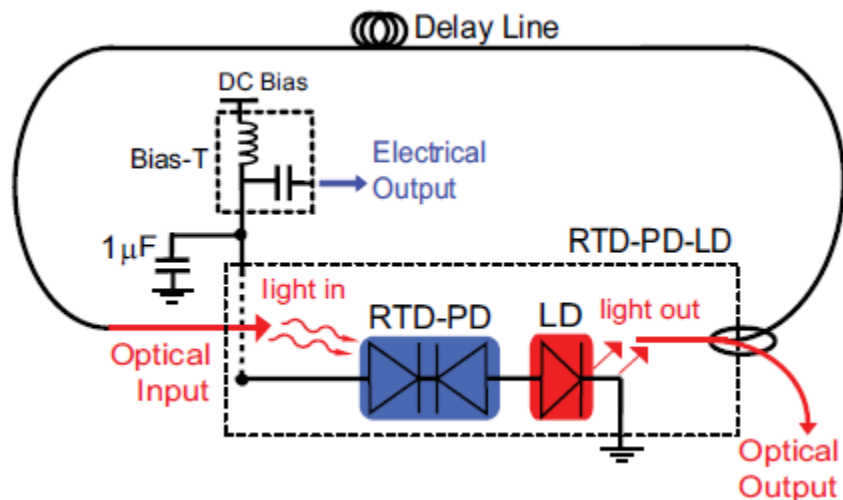
Рисунок 4.2 - Принципова схема пристрою RTD-PD (а), показує ребристий оптичний хвилевід і область DBQW. Нелінійна вольт-амперна характеристика RTD-PD, показує область NDR. (б) RTD - вид зверху матриці, що показує вікна емітера і колектора і гребінчастий хвилевід (гребінчастий хвилевід визначає активну область пристрої). RTD-PD однополярна енергетична діаграма $\text{InAlAs}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.42}\text{Al}_{0.05}\text{As}/\text{InP}$

RTD-PD-LD складається з монолітного термометра опору, вбудованого в хвилеводний фотодетектор, з'єднаного послідовно з чіпом лазерного діода, встановленого на швидкодіючому тримачі носія і з'єднаного дротом з мікрополосковою лінією друкованої плати 50, рис. 3 Лазерний діод з безперервною хвилею (CW) працював близько 1550 нм з пороговим струмом 6 мА і ефективністю 0,23 Вт/А. Лінія передачі використовувалася для з'єднання з шунтувальним конденсатором 1 мкФ, а також для забезпечення вихідного порту для генерується ВЧ-потужності. ВЧ-потужність була виміряна, і зміщення постійного струму було забезпечено через зсув-Т (детальний опис оптоелектронних ланцюгів на основі RTD див. у [54]). Як показано на рис. 4.3 (а) і схематично пока-

зано на рис. 4.3 (б), при цій топології ми отримуємо схему як з оптичним входом, так і з вихідні порти, що дозволяє працювати RTD-PD-LD в декількох режимах ОЕО.



a)



б)

Рисунок 4.3 – (а) Вид спереду і вигляд зверху реалізованого RTD-PD-LD генератор встановлений на трьохосному каскаді з оптичними входними та вихідними портами і радіочастотним портом. Також показано світлове з'єднання і розв'язка у вільному просторі з використанням лінзових SMF. (б) Принципова схема одноконтурного RTD-OEO

Коли RTD-PD послідовно з LD з'єднані паралельно з шунтувальним конденсатором 1 мкФ, рис. 4.3 (б), і зміщені в області NDR кривої RTD-PD-LD IV, рис. 4.4, шунт. Конденсатор працює як елемент зворотного зв'язку, який допомагає підтримувати стійкі коливання, частота яких визначається головним чи-

ном резонансним резервуаром LC-ланцюга $f_0 \approx 1/2\pi \sqrt{LC}$, де L - еквівалентна індуктивність від золотих проводів і лінії передачі, а C позначає Еквівалентна ємність RTD-PD, Рис. 4.5. Самостійні коливання струму релаксації RTD-PD пускають у хід лазерний діод, а RTD-PD-LD працює як оптоелектронний генератор, керований напругою (OVCO) [48], [55], так як його частота вільного ходу може контролюватися шляхом регулювання напруги зміщення постійного струму. На рис. 4.4 представлений діапазон настройки частоти, коли напруга постійного струму сканувати в області NDR. Схема, яка використовується в експериментах, коливається зі своєю частотою в діапазоні від 0,944 ГГц до 1,129 ГГц (що було обумовлено, головним чином, довжиною склеювання проводів area 3-4 мм і активною областю RTD-PD 150 мкм × 4 мкм).

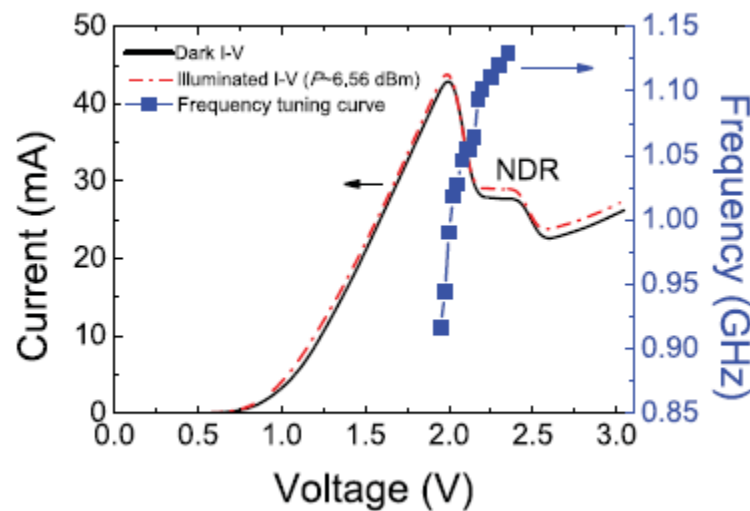


Рисунок 4.4 – Темно-світлі ВАХ пристрої RTD-PD послідовно з LD, яка б показала область NDR. Відповідна крива перебудови частоти в умовах недостатнього освітлення також залежить від напруги зсуву

Для роботи в режимі зі зворотним зв'язком, як схематично представлено на рис. 4.3 (б), частина оптичного виходу лазерного діода була розв'язана з використанням лінзового одномодового волокна (SMF) і відправлена через лінію затримки оптичного волокна для запуску в RTD-PD з використанням аналогічної лінзи SMF, рис. 4.3 (а). Оскільки частина оптичного виходу з лазерної модуляцією (після проходження через довгу лінію оптичної затримки) запускається

ся в область фотодетектування RTD, лінія оптичної затримки забезпечує маршрут зворотного зв'язку для самоінжекційної блокування, яка дуже ефективно використовує оптичне волокно. з низькими втратами і великим високим Q.

Експерименти проводилися без контролю температури або вібрації волоконних петель. У цій конфігурації конфігурації RTD-ОЕО є простим ОЕО з низькими вимогами до потужності (електрична потужність <70 мВт, споживана схемою RTDPD-LD). RTD-PD управляє лазерним діодом з мікрохвильової несучої, виявляє частина оптичного виходу, модульованого лазерним діодом, що рухається в контурі зворотного зв'язку оптоволоконна, і забезпечує широкопasmовий електронний коефіцієнт посилення, який генерує самостійні коливання.

4.3 Опис математичної моделі

Розробка обчислювальної моделі RTD-ОЕО, здатної відтворювати різноманітні динамічні ефекти, що спостерігаються експериментально, а саме рівень бічних мод через довгої лінії затримки і різних джерел шуму, може бути складним завданням через різних джерел шуму система. Крім того, оскільки шкала часу проходження сигналу в обох напрямках, відповідна інтервалу між модулями резонатора оптичного волокна, набагато вище (зазвичай в діапазоні мкс), ніж шкала часу частоти коливань генератора, звичайно потрібні тривалі симуляції і великий обсяг пам'яті. призводить до трудомісткого моделювання. У цьому розділі ми представляємо комплексну числову модель однопетльовою RTD-ОЕО системи зі зворотним зв'язком з використанням диференціальних рівнянь з затримкою. Модель включає генератор зі зворотним зв'язком із затримкою за часом, який моделює електричну динаміку RTD з контролем зворотного зв'язку ОЕО, рівняння швидкості лазерного випромінювання, що описують динаміку LD, і джерело білого гаусівського шуму, який описує домінуючі джерела шуму ОЕО, теплові і дробові шуми. Фізико-математична модель пристрою наведена у Додатку Д (08-36.МКР.006.00.003 ПЛ).

4.3.1 Математична модель RTD-PD

Динаміка генератора RTD-PD аналізується з урахуванням зосередженої електричного кола на рис. 4.5. Ця схема еквівалентна генератору Ліенара [48], [55], який включає в себе фотострум (I_{ph}) і струмовий шум (I_n). RTD-PD представлений своєю власною ємністю, паралельної джерела струму, що залежить від напруги, $F(V)$, а його поведінка в області фотодетектування моделюється як джерело струму, що залежить від оптичної потужності, модульований оптичним виходом, I_{ph} [49]. Представлений тут аналіз дійсний для ланцюгів, де час RC домінує над часом проходження збідненого шару і часом життя резонансного стану, тобто паразитні складові гібридної ланцюга визначають частоту коливань.

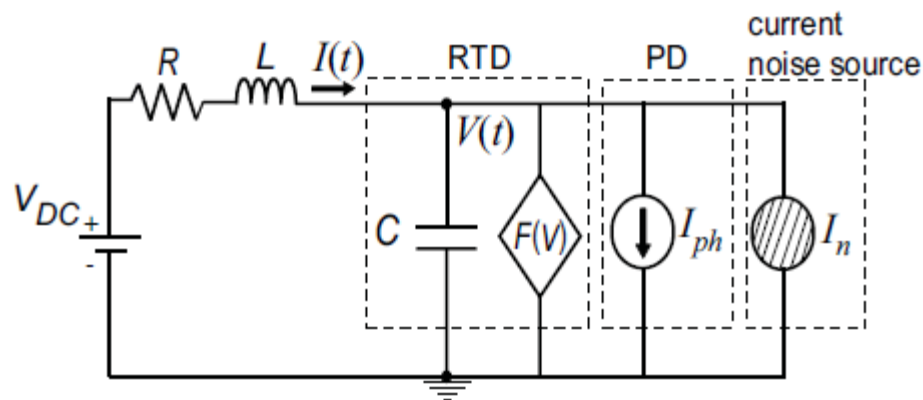


Рисунок 4.5 – Схема еквівалентної електричної схеми резонансного тунельного діодного фотоприймального генератора зі струмовим інжекційним шумом. Резистор R і індуктивність L враховують послідовний і паразитний опір ланцюга та індуктивність ланцюга RTD-PD-LD відповідно

Застосовуючи правила Кірхгофа (використовуючи закон Фарадея) до схеми на рис. 4.5, напруга $V(t)$ на ємності C і струм $I(t)$ через індуктор L задаються наступним набором з двох автономних першого порядку Диференціальні рівняння, які відповідають узагальненій системі Ліенара з інжекцією струму (фотострум і гаусів шум):

$$\dot{V}(t) = \frac{1}{C} [I(t) - F(V) - I_n - I_{ph}], \quad (4.1)$$

$$\dot{i}(t) = \frac{1}{L} [V_{DC} - RI(t) - V(t)], \quad (4.2)$$

де $F(V)$ - математичне уявлення вольт-амперної характеристики RTD-PD, заданий в [56]. Хоча характеристика DC IV для RTD-PD є функцією як напруги, так і оптичної потужності, в цій роботі, щоб уникнути моделювання великого часу роботи і максимально зменшити кількість параметрів, ми припустили статичну модель кривої IV в темні умови. Як показано на рис. 4.4, в умовах помірної освітленості, використовуваних в цій роботі, і з урахуванням рівнів чутливості використовуваних RTD-PD (нижче 0,25 А / W, таблиця I) RTD-PD-LD IV злегка зміщується до більш низьким напруженням через на генерований фототок, не надаючи великого впливу на загальну характеристику IV. У випадках, коли оптичне повторне введення істотно змінює характеристику IV, зменшуючи їх ставлення піку до долини, і, отже, область NDR, можна використовувати уточнення моделі, використовуючи, наприклад, ті, про які повідомлялося в [57], що включають вплив світла на статичну модель вольт-ампер постійного струму з урахуванням фотопровідності і ефекти накопичення заряду в двобар'єрної RTD-структурах.

У рівнянні (1) згенерований RTD-PD струм I_{ph} у відповідь на модульований оптичний сигнал $P(\lambda)$ визначається як:

$$I_{ph} = \eta_{ph} \frac{e\lambda}{hc} P(\lambda), \quad (4.3)$$

де λ - робоча довжина хвилі, e - одиниця електричного заряду, h і c - постійна Планка і швидкість світла у вакуумі відповідно η_{ph} - хвильова ефективність квантового фотоприймача, яка визначається як:

$$\eta_{ph} = k(1 - R_{ref})(1 - e^{-\alpha\gamma_{ph}\Lambda}), \quad (4.4)$$

де k - коефіцієнт зв'язку світла, R_{ref} - коефіцієнт відображення фасета хвилеводу, α - коефіцієнт поглинання сердечника хвилеводу, γ_{ph} - інтеграл перекриття

електричного і оптичного полів і довжина ФД активного хвилеводу. У таблиці I наведені типові значення, використані при моделюванні, оцінені за характеристиками виявлення експериментальних пристроїв RTD-PD [49].

Таблиця 4.1 - Параметри електричного кола і фотодетектори RTD

№	Символ	Значення	Типова чисельна величина
1.	R	Опір	7,8 Ом
2.	L	Індуктивність	$3,1 \times 10^{-9}$ Гн
3.	C	Ємність	$3,25 \times 10^{-12}$ Ф
4.	λ	Розрахункова довжина хвилі	$1,55 \times 10^{-6}$ м
5.	k	Коефіцієнт легкого зв'язку	0,35
6.	R_{ref}	Відбивна властивість хвилеводу	0,3
7.	α_v	Коефіцієнт поглинання хвилеводу	400 см^{-1}
8.	γ_{ph}	Інтеграл перекриття електричного і оптичного поля	0,25
9.	Λ	Довжина контакту хвилеводу	150×10^{-6} м

4.3.2 Модель LD

Щоб спів ставити відгук лазерного діода з його фізичними параметрами, ми використовуємо одномодові рівняння швидкості для опису його динамічної поведінки. Рівняння швидкості для щільності фотонів $S(t)$ і інжектованих носіїв $N(t)$ в активній області:

$$\dot{N}(t) = \frac{I_m(t)}{qv_{act}} - \frac{N(t)}{\tau_n} - g_0 [N(t) - N_0] \cdot [1 - \varepsilon_n S(t)], \quad (4.5)$$

$$\dot{S}(t) = \Gamma g_0 [N(t) - N_0] \cdot [1 - \varepsilon_n S(t)] \cdot S(t) - \frac{S(t)}{\tau_p} + \Gamma \beta \frac{N(t)}{\tau_n}, \quad (4.6)$$

$$\frac{S(t)}{P_f} = \frac{\Gamma \tau_p \lambda_0}{V_{act} \eta_l h c}. \quad (4.7)$$

де $I_m(t)$ - коливально-модульований струм, створюваний RTD-PD [згідно моделі Лієнара, рівняння (4.1) і (4.2)], плюс постійний струм зміщення IDC для забезпечення роботи лазера, θ_{act} - обсяг активної області лазера, τ_n і τ_p - час спонтанного часу життя електрона і фотона відповідно; коефіцієнт спонтанного випромінювання β - це частка спонтанного випромінювання, пов'язаного з модою генерації; N_0 - щільність носіїв для прозорості, а g_0 - диференційний коефіцієнт посилення; n - значення коефіцієнта стиснення нелінійного підсилення; ε_n це коефіцієнт оптичного обмеження; λ_0 - довжина хвилі випромінювання; η_1 - диференціальна квантова ефективність на фасетку; P_f - вихідна потужність лазера.

4.3.3 Безрозмірний зворотний зв'язок із затримкою. Модель Лієнара ОЕО

Щоб нормалізувати рівняння (4.1) і (4.2), ми вибираємо V_0 і I_0 в якості параметрів шкали з фізичними розмірами струму і напруги ($I_0 = 1$ А і $V_0 = 1$ В) відповідно, а масштабування $V(t) = x(t) V_0$, $I(t) = y(t) I_0$, $t = \tau (\omega_0)^{-1}$, $V_{DC} = v_0 V_0$, $\omega_0 = (\sqrt{LC})^{-1}$ і $R = \gamma (V_0/I_0)$. Змінні $x(t)$ і $y(t)$ безрозмірні. Безрозмірні рівняння одномодових швидкостей отримані з використанням нормованих щільності носіїв заряду $n(t)$ і фотонів $s(t)$ і масштабування $N(t) = n(t) N_{th}$ і $S(t) = s(t) S_0$ де $S_0 = (\tau_p/\tau_n) N_{th}$ і $N_{th} = N_0 + (g_0\tau_p)^{-1}$ - гранична щільність носіїв; час нормовано на характеристичну частоту резонансного резервуара LC, $\omega_0 = (\sqrt{LC})^{-1}$, отже, $\tau = \omega_0 t$. Нарешті, перевизначивши τ як t і ввівши в систему затриману зворотний зв'язок $\eta s(t - \tau_d)$, де η - сила зворотного зв'язку, а τ_d - затримка за часом по відношенню до безрозмірного часу t , динамічна система лазерного діода Лієнара є перетворені в наступні безрозмірні пов'язані DDE:

$$\dot{x}(t) = \frac{1}{\mu} \left[y(t) - f(t) - \chi \xi(t) - \eta s(t - \tau_d) \right], \quad (4.8)$$

$$\dot{y}(t) = \mu \left[v_0 - \gamma y(t) - x(t) \right], \quad (4.9)$$

$$\dot{n}(t) = \frac{1}{\tau'_n} \left[\frac{i_m(t)}{i_{th}} - n(t) - \frac{n(t) - \delta}{1 - \delta} \{1 - \varepsilon s(t)\} s(t) \right], \quad (4.10)$$

$$\dot{s}(t) = \frac{1}{\tau'_n} \left[\frac{n(t) - \delta}{1 - \delta} \{1 - \varepsilon s(t)\} s(t) - s(t) + \beta n(t) \right]. \quad (4.11)$$

Рівняння (4.8) - (4.11) представляють систему рівнянь RTD-PD-LD з затримкою зворотного зв'язку через змінну $s(t - \tau_d)$. Параметр сили зворотного зв'язку η залежить від характеристик виявлення RTD-PD, рівняння (4.3), і частки вихідної оптичної потужності P_f лазера, повторно вводиться в петлю зворотного зв'язку з запізненням, рівняння (4.7). Рівняння (4.8), (4.9) представляють осцилятор Лієнара, де функція $f(x)$ визначається нормуванням $F(V)$, а $\mu = V_0/I_0\sqrt{C/L}$ - безрозмірний параметр. Рівняння (4.10), (4.11) є безрозмірними рівняннями швидкості, що описують LD нормалізовані щільності фотонів $s(t)$ та інжектованих носіїв $n(t)$. Носій заряду в лазерних рівняннях (10), (11) нормовані на порогове значення, як в [48]; $I_m(t)$ враховує струм зміщення і частку коливань вихідного струму, що створюються електричної моделлю RTD-PD (4.8), (4.9), які модулюють LD, та i_h - безрозмірний пороговий струм лазерного діода. Параметри τ_n і τ_p беруться з масштабування за часом. У таблиці 4.2 представлені безрозмірні параметри, які використовуються при чисельному моделюванні.

Таблиця 4.2 - Параметри використані для моделювання RTD-OEO

№	Символ	Значення	Типова чисельна величина
1.	μ	$V_0/I_0\sqrt{C/L}$	$3,238 \times 10^{-2}$
2.	γ	$R(V_0/I_0)$	7,8
3.	τ'_n	Термін служби безрозмірного носія	0,30578
4.	τ'_p	Термін служби безрозмірного носія	0,01395
5.	δ	N_0/N_{th}	0,613
6.	ε	$\varepsilon_n S_0$ (безрозмірна насиченість лазера)	$1,72 \times 10^{-3}$
7.	β	Спонтанна емісія	4×10^{-4}

У реальних системах неминучі джерела шуму впливають на динаміку, вносячи амплітудні і фазові флуктуації навіть в найстабільніші періодичні сигнали. У нашому випадку кілька джерел або випадкових процесів, наприклад, наприклад, теплові і дробові шуми. Ми моделюємо їх загальний ефект як ефективний

дельта-корельований гаусівський білий шум з нульовим середнім $\chi\xi(t)$ [49], рівняння (4.8), де параметр χ - безрозмірна дисперсія розподілу і позначає силу шуму.

Для цілей чисельного моделювання, рівняння (4.8) - (4.11) були інтегровані зі стандартним методом Рунге-Кутта з постійним розміром кроку четвертого порядку [50]. Як вже говорилося раніше, оскільки потрібен тривалий моделювання і великий обсяг пам'яті, ми зв'язали інтегратор часу C++ з MATLAB і Octave [51] через інтерфейс mex [52]. Це забезпечує високу продуктивність, ефективні можливості сценаріїв, а також просте розгортання кластера, три характеристики, які корисні для розширених параметричних досліджень. Наявність відкладеного вкладу у формулі (4.8) вимагають особливого догляду. Дійсно, щоб просунути рішення з кроком h з $t_n = nh$ до $t_{n+1} = (n+1)h$, алгоритм Рунге-Кутта вимагає оцінки значень $s(t - \tau_d)$ в проміжних точках $t_{mid} = (n + 1/2)h$. Однак $s(t_{mid} - \tau_d)$ невідомо і має бути інтерполювати з минулих значень, наприклад, $s(t_{n-1} - \tau_d)$, $s(t_n - \tau_d)$, $s(t_{n+1} - \tau_d)$ і т. д, порядок відповідно до алгоритму інтегрування. Тому на додаток до минулих значень $s(t)$ ми також зберегли похідну за часом $\dot{s}(t)$, тобто величину, легко доступну при інтегруванні по часу, яка дозволяє побудувати поліном Ерміта третього порядку між $t_n - \tau_d$ і $t_{n+1} - \tau_d$. Оцінюючи цей інтерполант затриманого члена в $t_{mid} - \tau_d$, ми забезпечуємо загальну точність четвертого порядку. Внесок стохастичного шуму $\chi\xi(t)$ у формулі (4.8) додається після детермінованого кроку, просто використовуючи метод Ейлера [49]. На рисунку 4.6 представлена блок-схема, що показує відповідне математичне представлення моделі ОЕО.

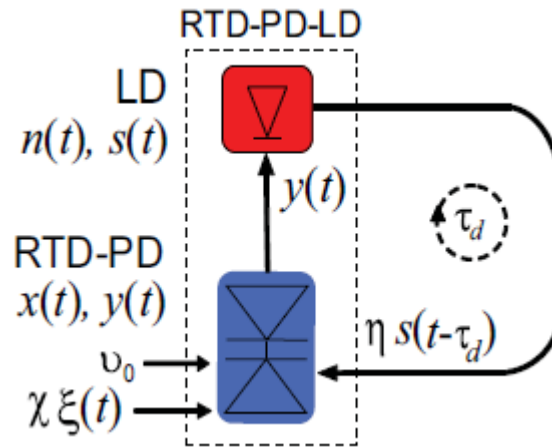


Рисунок 4.6 – Структурна схема системи зі зворотним зв'язком з безрозмірною лазерною діодною затримкою

Далі обговорюється внесок шуму в динамічні системи ОЕО на основі RTD і виводяться типові фізичні значення інтенсивностей шуму.

4.3.4 Шум в системах RTD-PD ОЕО

Основні джерела шуму в системі ОЕО RTD-PD складаються з теплового шуму, дробового шуму і лазерного шуму відносної інтенсивності (RIN), які для цілей аналізу можна розглядати як все що відбувається з фотодетектора, так як фото- детектор монолітно інтегрований зі структурою RTD. Тому нас в основному цікавлять джерела теплового і дробового шуму RTD-PD. У пристрої RTD-PD теплової шум або шум Джонсона складається з випадкових флуктуацій температури, викликаних тепловими носіями матеріалів з кінцевим питомим опором. Ці флуктуації характеризуються випадковим гаусівським процесом, і вони можуть моделюватися як джерело шуму еквівалентного струму паралельно з безшумним резистором. Електронний дробовий шум пов'язаний з проходженням носіїв через потенційний бар'єр, такий як зустрічаються в напівпровідникових р-п- діодів і транзисторів. Статистика, яка описувала рух заряду, визначає характеристики шуму. Коли число подій, що відбуваються в одиницю часу, велике, розподіл Пуассона можна замінити розподілом гаусівського процесу з нульовим середнім і спектральної щільністю білої потужності.

Тепловий шум RTD-PD можна оцінити по узагальненій формулі Найквіста [53], де спектральна щільність потужності визначається як:

$$S_T = 4k_B T G . \quad (4.12)$$

де G - диференціальна провідність RTD-PD. Для типових RTD з $G = 0,2 \text{ S}$ при $T = 300 \text{ K}$ отримуємо $S_T = 0,33 \times 10^{-20} \text{ A}^2/\text{Гц}$. Спектральна щільність потужності електронного дробового шуму RTD-PD визначається як:

$$S_I = 2e\gamma I , \quad (4.13)$$

де I - середній струм, а γ - коефіцієнт дробового шуму. У структурах з подвійним бар'єром повідомлялося про явище, званому придушенням дробового шуму, через зниження γ нижче 0,5 [54] в області позитивного диференціального опору I-V до NDR, див. рис. 4.4. Коли пристрій зміщене по постійному струму в NDR очікується посилення шуму пострілу щодо шуму повного пострілу [55]. Тут для простоти моделі ми приймаємо $\gamma = 1$. Тому для постійного струму 25 мА (RTD-PD, зміщеного поблизу області долини, рис. 4.4), отримуємо $S_I = 0,8 \times 10^{-20} \text{ A}^2/\text{Гц}$. Ці значення порівнюються з шумом струму RTD, викликаним дробовим шумом, про який повідомлялося в [53] для структур InGaAlAs, аналогічних тим, які обговорювалися тут.

Можна пов'язати безрозмірну інтенсивність шуму χ з фізичним значенням шуму, виявленого в експериментальних системах RTD-OEO, з урахуванням теплових і дробових шумів, які обговорювалися раніше в рівняннях (4.12) і (4.13). Параметр χ визначає рівень шуму, а $\xi(t)$ - гаусівський розподіл, доданий в рівняння (4.8) після детермінованого кроку. Тому, якщо ми хочемо зв'язати χ зі значеннями інтенсивності фізичного шуму, ми повинні звернути увагу на масштабування за часом і крок за часом моделювання. Так як модель формул (4.8) - (4.11) є безрозмірним, змінна часу t також безрозмірна і відображає фізичний час $\sim t$ в одиницях $\sqrt{LC} \sim 100 \text{ пс}$ (за умови, що параметри фізичної схеми L і C представлені в таблиці 4.1). Крім того, ми використовуємо безрозмірну стохас-

тичну силу χ , з I_0 в якості параметра шкали фізичного виміру струму (тут $I_0 = 1$ А). Тому безрозмірний шум визначається як:

$$\chi = (\sigma_T + \sigma_I) / I_0 = \left(\sqrt{4k_b T G / \tau_a} + \sqrt{2q\gamma' I / \tau_a} \right) / I_0, \quad (4.14)$$

де σ_T і σ_I - теплові та дробові шуми в одиницях струму, відповідно, а $1/\tau_a$ - ширина досліджуваної смуги (дорівнює частоті дискретизації). Для типового тимчасового кроку, використовуваного при моделюванні $h = 0,01$ (відповідає шкалі часу 1 пс, яка має порядок величини типовою кореляції шуму Джонсона при кімнатній температурі), і з урахуванням значень, використовуваних для розрахунку спектральної щільності потужності представлений раніше в рівняннях (4.12) і (4.13), ми отримуємо типовий рівень χ близько $1,5 \times 10^{-4}$.

На рисунку 4.7 показаний типовий експериментальний ВЧ-спектр потужності автономного електричного виходу RTD-PD-LD на частоті близько 1,12207 ГГц та імітований спектр потужності напруги $x(t)$ приблизно на тій же частоті коливань з шумовим внеском для показаних параметрів в таблиці 4.2. Введення шуму з амплітудою $\chi = 5 \times 10^{-4}$ в систему призводить до більш широкого піку в області Фур'є. Також спостерігається зменшення відносини сигнал/шум на частоті автономних коливань. Це значення амплітуди шуму відносно добре узгоджується з експериментальними даними. Далі ми розглянемо значення шуму постійним і для простоти аналізу визначимо новий параметр $\theta = \eta/\chi$, який позначає відношення сили зворотного зв'язку до шуму системи ОЕО Лієнара. Результати модельних досліджень пристрою наведені в Додатку Ж (08-36.МКР.006.00.005 ПЛ).

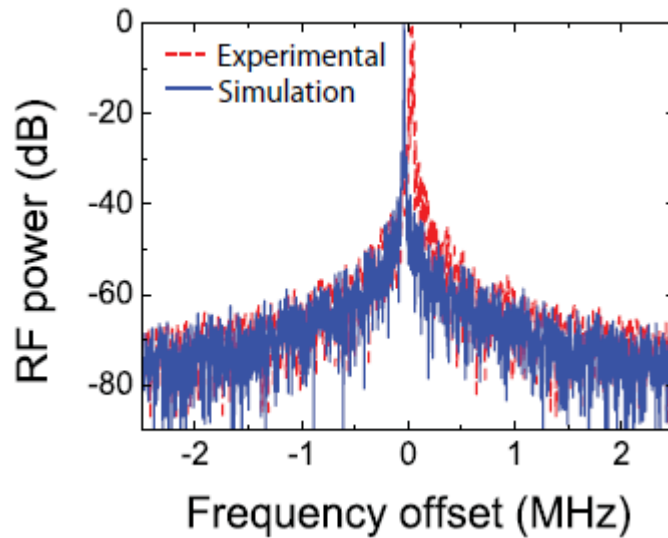


Рисунок 4.7 – Експериментальний ВЧ-спектр потужності автономного електричного виходу RTD-PD-LD (пунктирна лінія) і модельований (неперервна лінія) спектр потужності автономного фундаментального коливання виходу $x(t)$ з шумовим внеском $\chi = 5 \times 10^{-4}$. На обох графіках розмах становив 5 МГц, а центральна частота 1,12207 ГГц

4.4 Результати експериментальних досліджень оптико-електронного генератора з одним колом зворотного зв'язку

Коли зворотний зв'язок із затримкою включена, спостерігаються різні динамічні ефекти, а саме зниження шуму поблизу несучої і поява бічних мод через вкладу затримки.

Ми змоделювали ці поведінки, використовуючи три часу проходження сигналу туди і назад: $\tau_d = 2,35$ мкс, $\tau_d = 4,25$ мкс і $\tau_d = 6,09$ мкс, які відповідають довжинам волокон 0,4 км, 0,8 км і 1,2 км, відповідно, використовуваним в експерименті. Час проходження сигналу туди і назад було отримано з вільного спектрального діапазону (FSR) експериментальних результатів, який в нашому випадку залежить від електричної тимчасової затримки τ_e , що вноситься електричними компонентами, і від оптичної тимчасової затримки τ_o , обумовленої довжиною оптичного волокна. :

$$FSR = \frac{1}{\tau_e + \tau_o}. \quad (4.15)$$

Для довгих маршрутів зворотного зв'язку (довжина оптичного волокна вище 1 км) оптична часова затримка набагато більше електричної часової затримки, і $\tau_d = \tau_o = n_F L_f / c$, де n_F - ефективний показник заломлення оптичного волокна, L_f - довжина волокна, а c - швидкість світла.

Рівняння (4.8) - (4.11) були інтегровані з кроком по часу $h = 0,01$, що відповідає $d_t = 1$ пс, протягом 1 циклів по зовнішньої петлі. У кожному циклі передачі сигнал поширювався в ОЕО і обчислювався відповідно до алгоритму Рунге-Кутта, описаним раніше. Щоб уникнути дуже тривалого моделювання часу і великих вимог до пам'яті, ми вибрали час кругового обходу до $\tau_{ad} = 6,09$ мкс і часову вибірку 10, тобто 1 точка на кожні 10 вибірок.

На рисунку 4.8 представлені експериментальні (а) і змодельовані (б) спектри потужності навколо основного коливання, що працює вхолосту, із затримкою зворотного зв'язку і без неї. На малюнку 8 (а) представлені результати експериментів по само-синхронізованій електричній потужності з використанням повторно введеної оптичної потужності всередині волокна, що дорівнює 6 дБм і довжині волокна 0,4 км. Результати показують зменшення фазового шуму і ширини лінії при зсувах нижче 250 кГц несучої частоти, а бічні моди розділені приблизно на 425 кГц з коефіцієнтом придушення одиночних мод (SMSR) -43 дбн. Зверніть увагу, що ширина лінії само-синхронізованого виходу не може бути вирішена за допомогою межі дозволу 3 кГц, встановленого приладом.

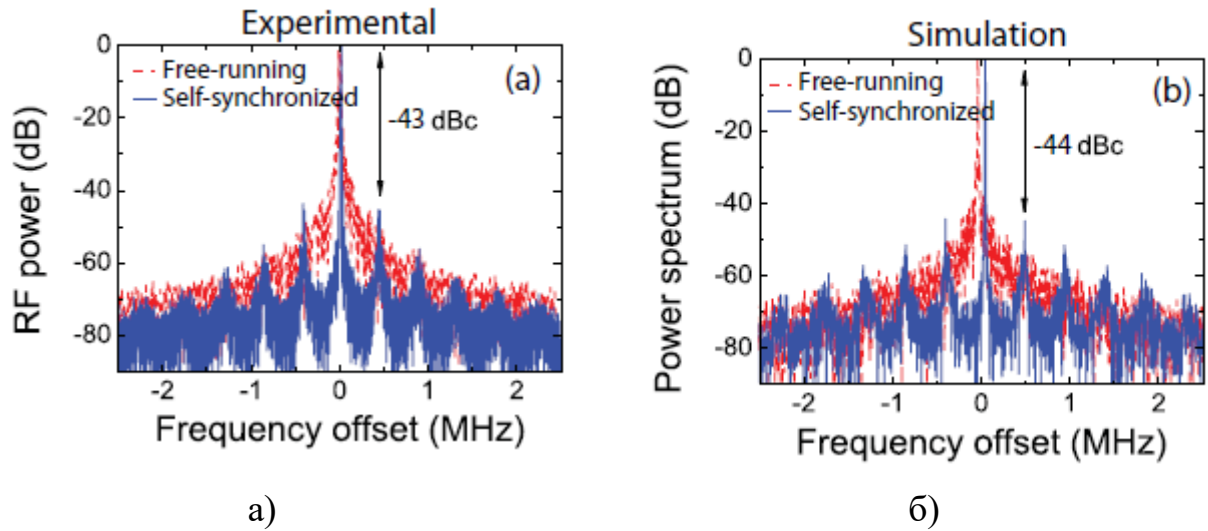


Рисунок 4.8 - (а) Експериментальні РЧ-спектри потужності вільних коливань і само-синхронізованого електричного виходу при $P \sim 6$ дБм і довжині волокна 0,4 км. (б) Спектри імітованої потужності автономних фундаментальних коливань і само-синхронізованих виходів $x(t)$ з тимчасовою затримкою $\tau_d = 2,35$ мкс і ставленням сили зворотного зв'язку до шуму $\theta = 2,0$. На обох графіках розмах становив 5 МГц, а центральна частота - 1,12207 ГГц.

На рис. 4.8 (б) показано відповідне моделювання для тимчасової затримки $\tau_d = 2,35$ мкс і відносини сили зворотного зв'язку до шуму $\theta = 2,0$ (що відповідає силі зворотного зв'язку $\eta = 1 \times 10^{-3}$ для введеної оптичної потужності, що дорівнює 6 дБм). Як експериментально спостерігалось, введення змінної зворотного зв'язку з затримкою за часом в моделі ОЕО Лієнара звужує ширину лінії основної частоти коливань і генерує піки на стороні частоти через тимчасової затримки τ_d , яка відповідає FSR системи RTD-ОЕО. SMSR -44 дБн порівнюється з експериментальним результатом, показаним на рис. 4.8 (а).

На рис. 4.9 показано динаміка RTD-ОЕО як функція рівня оптичної потужності для фіксованої затримки, $\tau_d = 2,35$ мкс. Мінімальна експериментальне порогове значення оптичної потужності, необхідне для самосинхронізації RTD-ОЕО і спостереження наявності бічних мод поблизу мінімального рівня шуму, склало близько -2,36 дБм, рис. 4.9 (а), і порівнюється з модельованими результатами при ставлення сили зворотного зв'язку до шуму $\theta = 0,4$, рис. 4.9 (б). У міру збільшення оптичної потужності зменшення шуму поблизу несучої частоти

ти також поліпшується. Однак наявність бічних мод з SMSR близько -45 дБн погіршує спектри при зсувах навколо FSR, як продемонстровано експериментально і чисельно на рис. 4.9 (в) і (д) відповідно.

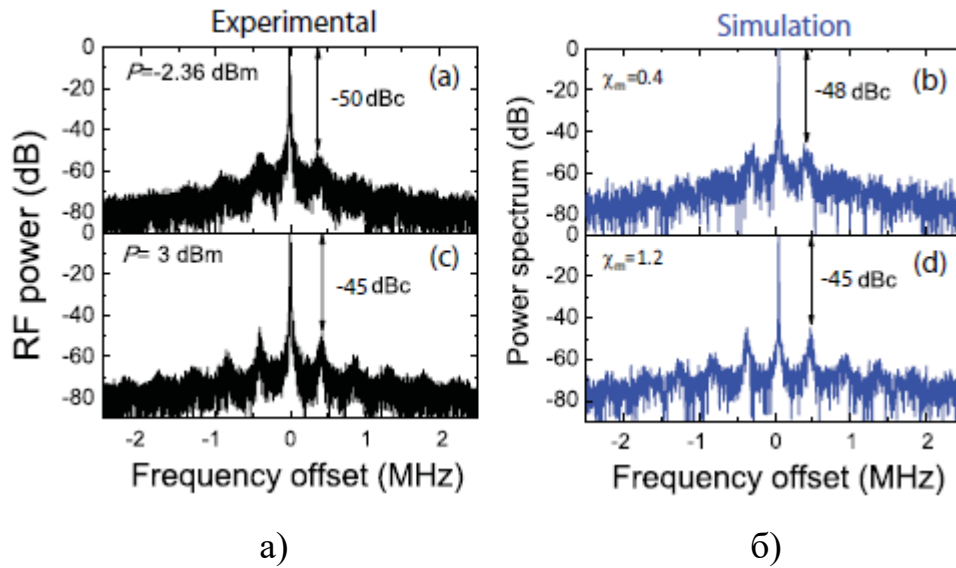


Рисунок 4.9 - Експериментальні ВЧ-спектри потужності самосинхронізованого електричного виходу. (а) $P \approx -2,36$ дБм і (с) $P \approx 3$ дБм для довжини волокна $0,4$ км. Спектри змодельованої потужності самосинхронізованих виходів $x(t)$ з часовою затримкою $\tau_d = 2,35$ мкс і ставленням сили зворотного зв'язку до шуму. (б) $\theta = 0,4$. (д) $\theta = 1,2$. На всіх графіках розмах становив 5 МГц, а центральна частота становила $1,12207$ ГГц

На рис. 4.10 ми досліджуємо вплив збільшення тривалості затримки в динаміці RTD-ОЕО при фіксованому відношенні сили зворотного зв'язку до шуму, $\theta = 1,2$. Коли $\tau_d = 4,25$ мкс, бічні моди присутні на рівнях близько -39 дБм і -41 дБм в експериментальних і змодельованих результатах, рис. 4.10 (а) і (б) відповідно. Вплив затримки більш виражено на рис. 4.10 (в) і (г) для $\tau_d = 6,09$ мкс, показуючи кілька бічних режимів з SMSR вище -35 дБм. І в експерименті, і в моделюванні рознесення мод зменшилася з приблизно 236 кГц до 162 кГц, коли лінія затримки була збільшена з $0,8$ км до $1,2$ км. Результати підтверджують наявність компромісу між затримкою і стабільністю генератора, оскільки збільшення тривалості затримки призводить до збільшення піків на стороні потужності поблизу несучої. Щоб подолати це обмеження, конфігурації, що

використовують множинні шляхи з затримкою зворотного зв'язку, були реалізовані для придушення побічних режимів [33] - [35], як показано в наступному пункті.

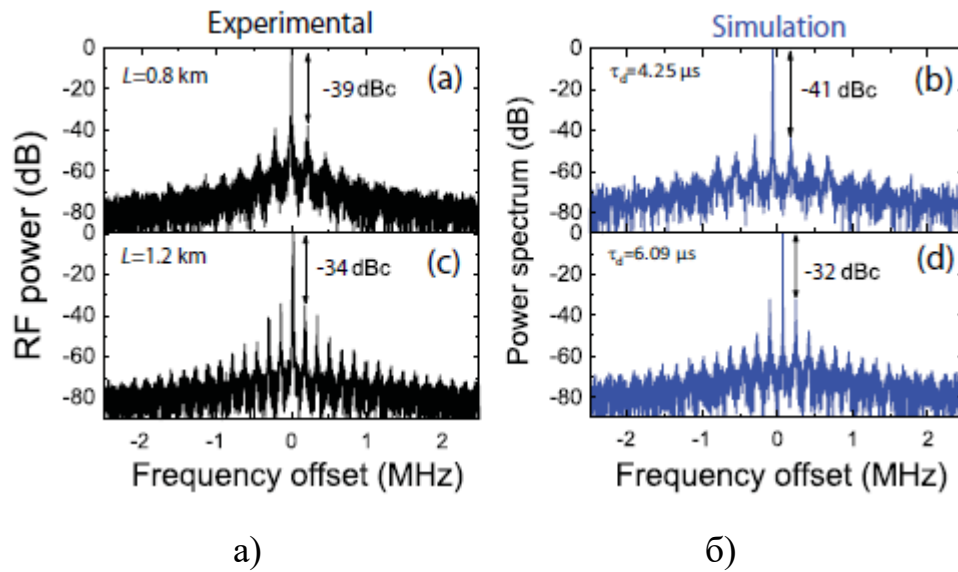


Рисунок 4.10 – Експериментальні радіочастотні спектри потужності самосинхронізованого електричного виходу при $P \sim 3$ дБм для (а) 0,8 км і (с) 1,2 км довжини волокна. Спектри імітованої потужності самосінхронізованих х (т) виходів з тимчасовою затримкою. (В) $\tau_d = 4,25$ мкс і (d) $\tau_d = 6,09$ мкс, а фіксоване відношення сили зворотного зв'язку до шуму = 1,2. На всіх графіках розмах становив 5 МГц, а центральна частота становила 1,12207 ГГц.

4.5 Результати експериментальних досліджень оптико-електронного генератора з двома колами зворотного зв'язку

Як перевірено в попередньому розділі, недоліком використання однієї волоконної петлі є виникнення коливань бічній моди. Ці моди - вкрай небажані для певних застосувань - викликані поширенням хвиль багаторазово навколо петлі ОЕО. Є два ефективних рішення для видалення або придушення бічних мод. Одна схема передбачає використання декількох петель зворотного зв'язку оптоволоконна, які по суті функціонують як набір вузькосмугових фільтрів. В інших методах використовуються оптичні резонатори з високою добротністю для фільтрації небажаних мод [56].

Яо і Малекі продемонстрували конфігурацію ОЕО з двома петлями, в якій оптична потужність була розділена оптичним роз'єднувачем, і обидві частини оптичного сигналу були згодом виявлені двома фотодетекторами [33]. Два перетворених РЧ-сигналу були з'єднані РЧ-відгалужувачі і потім подані на модулятор Е-О після посилення. У кожному циклі процес був еквівалентний ОЕО з одним циклом. У цій конфігурації спосіб використовує природну структуру порожнини ОЕО для отримання фільтрації через додаткову волоконну петлю або петлі, що мають більш короткі довжини, паралельно з довгою волоконної петлею. Хоча цей дизайн дав очікуваний результат, потрібні були два високошвидкісних фотоприймача.

Тут ми досліджуємо істотні поліпшення рівня бічних мод коливань з використанням схеми придушення несучої в двухконтурній конфігурації RTD-ОЕО з одним пристроєм RTD-PD. Як показано на рис. 4.11, частина лазерного оптичного виходу розділена на дві частини, кожна з яких поширюється по волокнах, які мають різну довжину, і потім об'єднується в одне волокно для підключення до одного RTD-PD. Тобто РЧ-сигнали пов'язані в оптичній області без додавання додаткових активних електричних або оптоелектронних пристроїв. Через інтерференції між двома об'єднаними оптичними сигналами двоконтурний RTD-ОЕО забезпечує сильну селективність по модам з бічними модами малої поту-

жності, хоча він може страждати від проблем, пов'язаних зі зв'язком в оптичній області, а саме з інтерференцією і биттям.

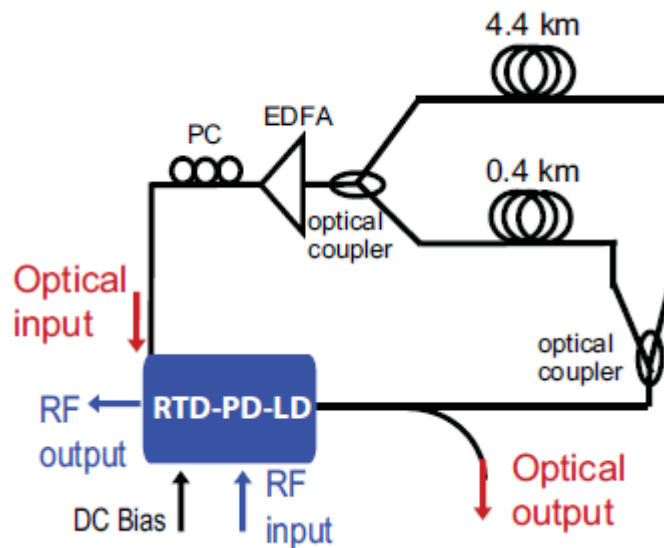


Рисунок 4.11 - Принципова схема двоконтурної самосинхронізованої установки RTD-OEO

Двоконтурний RTD-OEO, який використовує довжину волоконного контуру 4,4 км і 0,4 км, рис. 4.11, був експериментально досліджений для вимірювання фазового шуму і рівня характеристик бічних мод. Довший волокно призводить до високої спектральної чистоти і низькому фазового шуму при низьких зсувах. Коротке волокно здатне пригнічувати бічні моди поблизу носія. Перериваючи будь-який з цих шляхів, ви отримуєте повний однопетльовою OEO, який може вільно працювати, як показано в попередньому розділі. При обриві довгою траси (волоконна петля 4,4 км) рознесення мод становить 425 кГц, а вимірний коефіцієнт придушення бічних мод становить -53 дБм при $P = 6$ дБм [див. рис. 12,а]. При обриві короткого шляху (волоконна петля 0,4 км) рознесення мод становить 45 кГц, а вимірний коефіцієнт придушення бічних мод становить близько -20 дБн (див. рис. 4.12,б). У разі двоконтурної конфігурації коефіцієнт придушення бічної моди був поліпшений до -60 дБн (див. рис. 12,в). У порівнянні з однопетльовою результатами, бічні моди можуть бути ефектив-

но придушені на 20-40 дБ в залежності від підводиться оптичної потужності до RTD-PD.

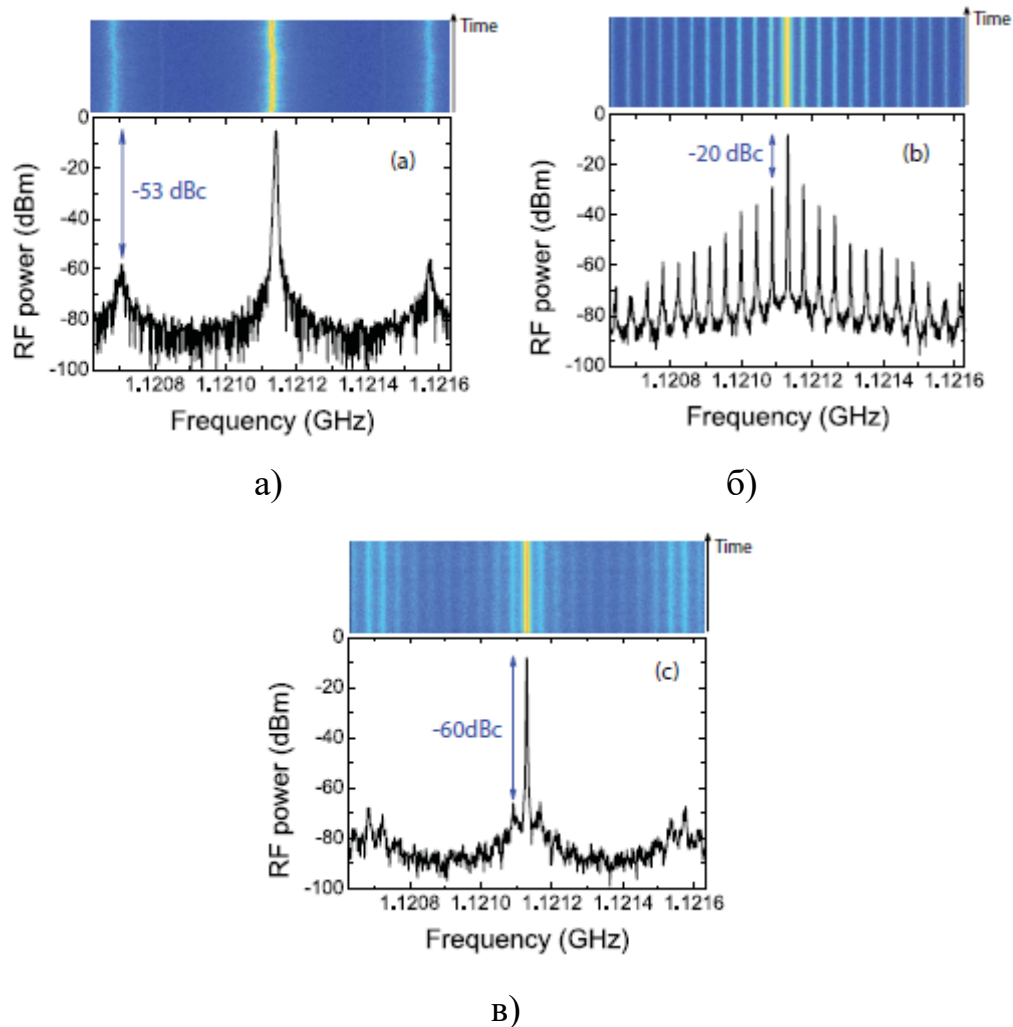


Рисунок 4.12 – Вигляд спектрів ВЧ-потужності з показом СМСР: (а) 0,4-кілометрова одиночна петля; (б) 4,4 км одиночної петлі; (в) Двоконтурна конфігурація. Діапазон частот і дозвіл смуги пропускання було 1 МГц і 3 кГц, відповідно. Верхня частина кожного малюнка показує спектрограму, яка представляє еволюцію спектральної щільності, записаної за 1 хв (час по вертикальній осі)

Фазові шуми з одного бічний смугою (SSB) одиночних (рис. 4.13, а) і подвійний контур [рис. 4.13,б] конфігурації були виміряні. Фазовий шум на відстані 10 кГц від несучої двоконтурного RTD-ОЕО становив -99,28 дБм/Гц для оптичної потужності з повторною інжекцією волокна 6 дБм і -102,88 дБм/Гц для оптичної потужності 9 дБм [Рис. 4.13,б], який порівнюється з одиночної петлею на 4,4 км, показуючи -101,67 дБм/Гц на відстані 10 кГц від несучої [рис. 4.13,а]. Отже, крім підтримки якості фазового шуму нижче -100 дБм/Гц при ни-

зькому зміщенні, було успішно досягнуто заглушення бокових мод в спектральній області зі зміщенням несучої частоти вище 45 кГц, що підтверджує ефективну функцію придушення бічних мод двоконтурна конфігурація.

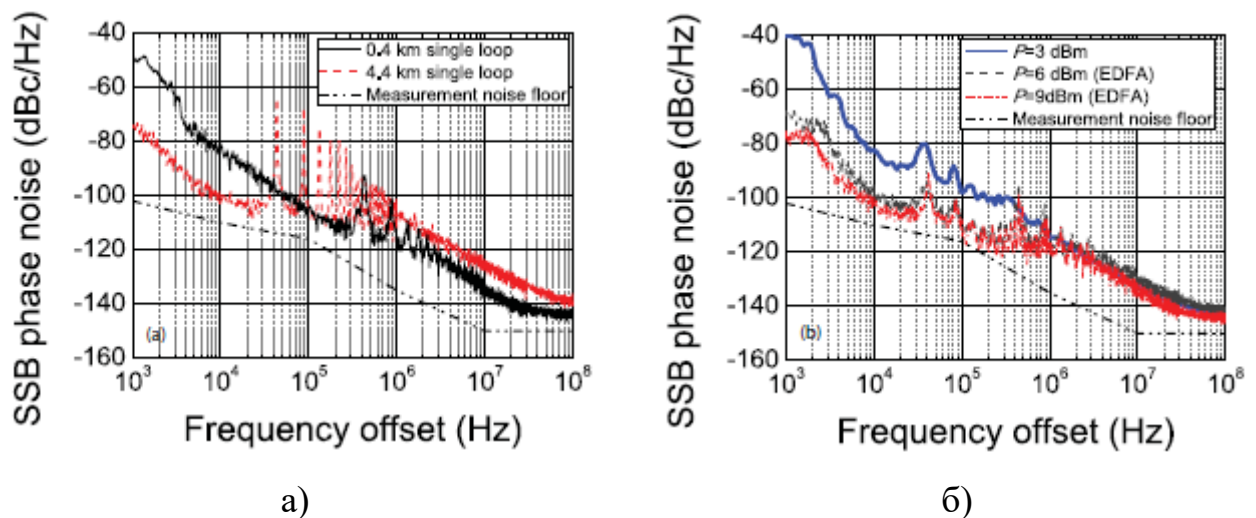


Рисунок 4.13 – Графіки фазового шуму SSB: (а) 0,4-км і 4,4-кілометрові однопетльової траси при оптичній потужності $P \sim 6$ дБм; (б) двоконтурна конфігурація з і без EDFA

Вимірювання також показали, що в двухконтурній конфігурації мало шуму, близького до несучої, що іноді призводить до низьких рівнів шуму при менших зсувах несучої в порівнянні з одиночною трасою завдовжки 4,4 км; ці ефекти можуть бути зменшені або усунені за допомогою волокон, що зберігають поляризацію.

На рисунку 4.13,б також показані результати аналогічної двухконтурної установки без використання оптичного посилення при $P = 3$ дБм, які демонструють двоконтурний RTD-OEO, що не вимагає електричного або оптичного посилення. Волоконний підсилювач на основі ербію (EDFA) використовувався в двоконтурних експериментах для компенсації втрат при з'єднанні світла більш ніж в одному волокні, а також з-за експериментальних труднощів по з'єднанню і розв'язки світла в умовах вільного простору, оскільки хвилевід RTD-PD ні оптимізований для цього додатка.

Нарешті, ми демонструємо, що двопетльовий чисельна модель Лієнара ОЕО також описує спостережувані експериментальні результати. Ми викорис-

товуємо рівняння (4.8) - (4.11) з модифікацією в рівнянні (4.8) для включення двох вкладів з тимчасовою затримкою з конфігурації з двома петлями. Тому ми міняємо одиночну зворотний зв'язок з $\eta_s(t - \tau_d)$ на подвійну зворотний зв'язок $\eta_{1s}(t - \tau_1) + \eta_{2s}(t - \tau_2)$, де $\tau_1 < \tau_2$. Таке просте складання двох джерел фотоструму може бути виконано, оскільки після такого тривалого часу поширення два сигнали більше не є когерентними по відношенню один до одного. Як такі їх перешкоди усереднюються. Крім того, волокно, що не зберігає поляризацію, означає, що два повторно введені сигнали також можуть мати частково ортогональну поляризацію.

У чисельному моделюванні ми вибрали час проходження сигналу туди і назад $\tau_1 = 2,35$ мкс і $\tau_2 = 22,2$ мкс, що відповідає довжині волокон 0,4 км і 4,4 км, відповідно, використовуваним в експериментах з двома петлями. На рис. 4.14 представлено порівняння експериментальних даних і модельованих спектрів потужності. На рис. 4.14,а і рис. 4.14,б показані експериментальні і змодельовані багатомодові коливання, відповідно, однопетльовою RTD-ОЕО (в якому коротша петля відключена).

На рис. 4.14,в і рис. 4.14,г представлені одномодові коливання двоконтурного RTD-ОЕО, в якому обидва контури замкнуті. Очевидно, що наявність коротшою петлі ефективно пригнічує бічні моди довшою петлі і залишає тільки основний сигнал коливань. Як в експериментальних, так і в змодельованих результатах ми також можемо спостерігати наявність додаткових бічних мод через більш короткого волокна з рознесенням близько 425 кГц з інтерференційної картиною, яка є результатом комбінації двох сигналів з затримкою зворотного зв'язку. На рисунку 4.14,в значення SMSR становить -48 дБм, що знаходиться в хорошому відповідно до експериментальним значенням -51 дБм, представленим на рисунку 14,г. Результати ясно демонструють, що представлена тут модель може бути надзвичайно корисна для цілей проектування, щоб вибрати відповідні характеристики резонатора для досягнення ефективного придушення бічних мод. Результати модельних досліджень пристрою наведені в Додатку Ж (08-36.МКР.006.00.006 ПЛ).

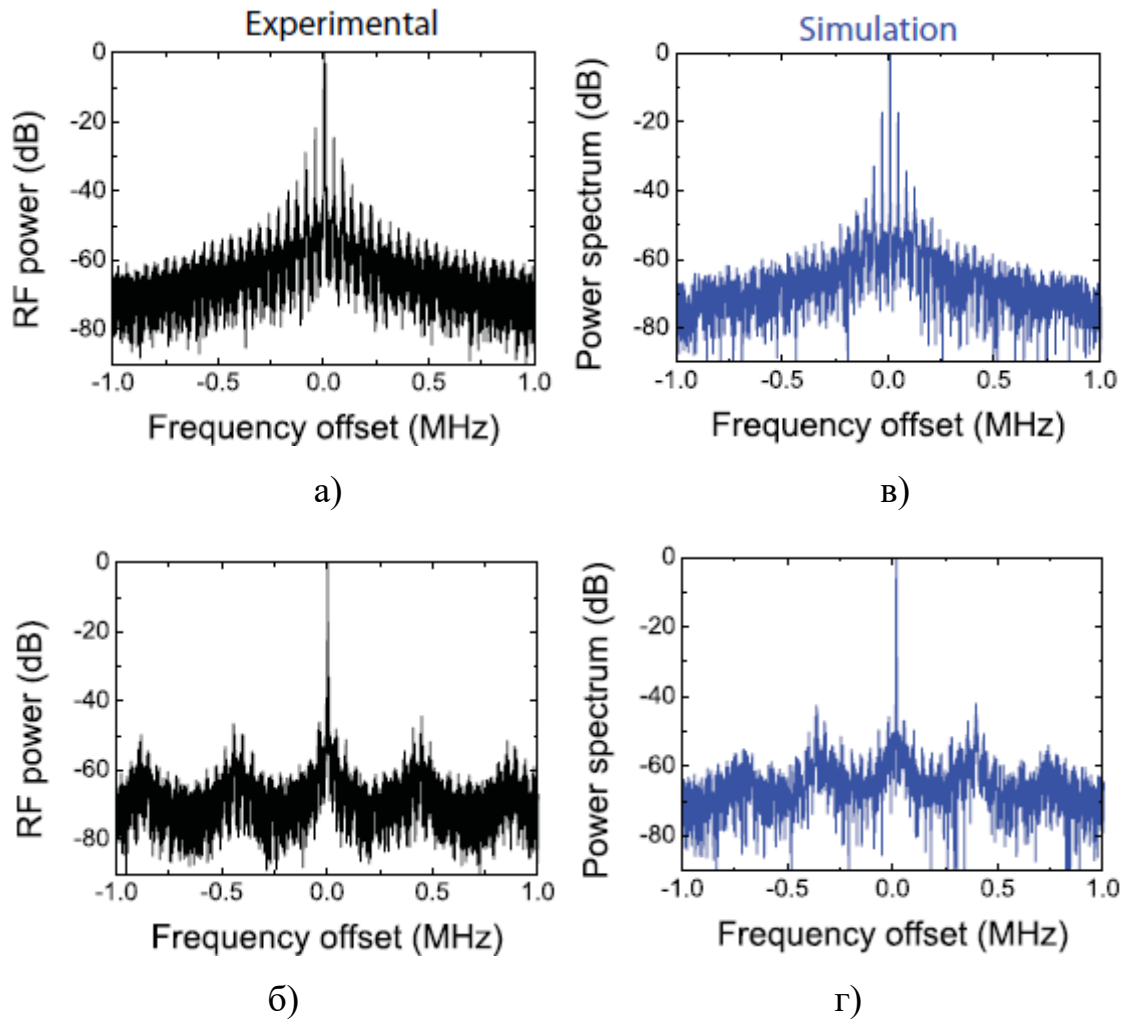


Рисунок 4.14 – (а) Експериментальні РЧ-спектри потужності самосинхронізованого електричного виходу при довжині хвилі $P \sim 0$ дБм і 4,4 км і (б) двоконтурна конфігурація. Моделюються спектри потужності самосинхронізованих $x(t)$ виходів. (в) одиночна затримка при $\theta = 0,3$ і (г) подвійна затримка при співвідношенні сили зворотного зв'язку до шуму $\theta_1 = 1,0$ (коротша затримка) і $\theta_2 = 0,3$ (більш тривала затримка). На всіх графіках розмах становив 2 МГц, а центральна частота - 1,12219 ГГц

4.6 Результати математичного моделювання динаміки оптико-електронного генератора

Спрощена еквівалентна схема

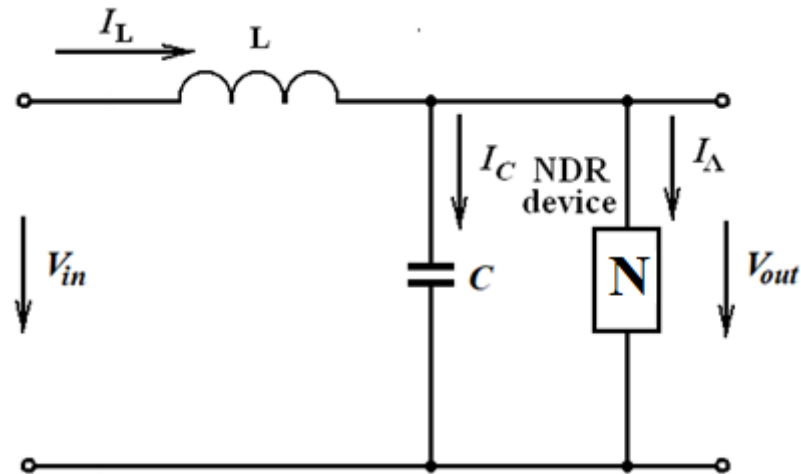


Рисунок 4.8 – Спрощена еквівалентна схема оптико-електронного генератора на основі RTD

Система диференціальних рівнянь має вигляд

$$\begin{cases} \frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C}(i_L - i_{NDR}) = \frac{1}{C}[i_L - G(v_C)], \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_{IN} - v_C). \end{cases}, \quad (4.14)$$

де напруга

$$V_{IN} = E_{DC} + E_A \sin(\omega_{IN} t), \quad (6.55)$$

E_{DC} - напруга зміщення, встановлення на спадній ділянці ВАХ робочої точки;

E_A , ω_{IN} - амплітуда та кругова частота відповідно.

Система рівнянь у нормованих змінних має вигляд

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{\varepsilon}[x_2 - G(x_1)], \\ \frac{di_L}{dt} = \varepsilon[\Gamma + \nu \cdot \sin(\omega t) - x_1]. \end{cases} \quad (6.56)$$

Рівняння коефіцієнтів системи і нормованих змінних мають вигляд

$$x_1 = \frac{v_C}{E_M}, x_2 = \frac{i_L}{I_M}, T = \frac{t}{\sqrt{LC}}, \omega = \omega_{IN} \sqrt{LC},$$

$$\Gamma = \frac{E_{DC}}{E_M}, \nu = \frac{E_A}{E_M}, \varepsilon = \frac{E_M/I_M}{\sqrt{L/C}},$$
(6.57)

де E_M, I_M - координати точки максимуму напруги та струму на графіку ВАХ RTD.

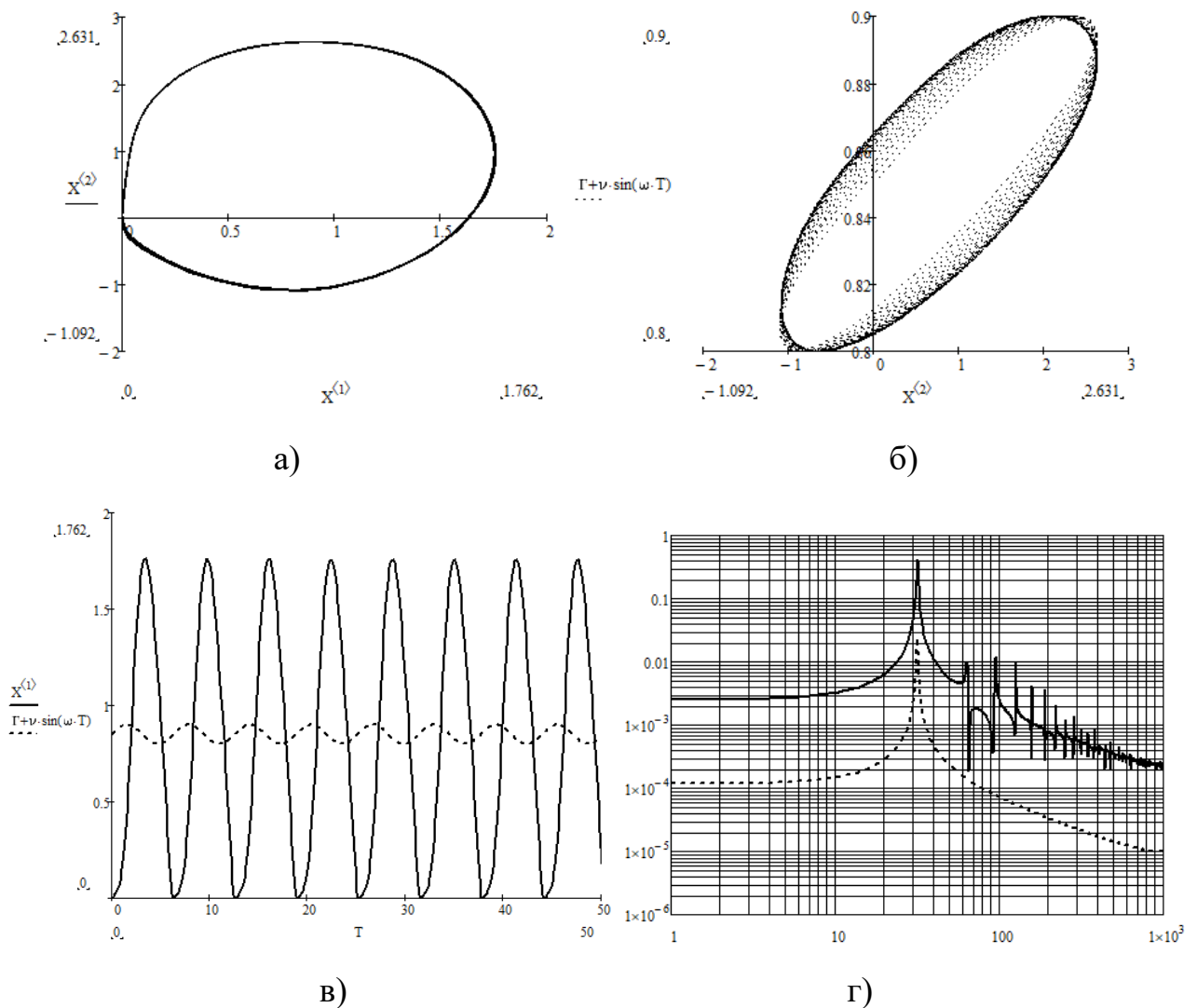


Рисунок 4.15 – Результати математичного моделювання режиму підсилення: а) фазовий портрет; б) фігура Ліссажу; в) часова діаграма нормованих вхідної та вихідної напруги; г) амплітудо-частотний спектр нормованих вхідної та вихідної напруги

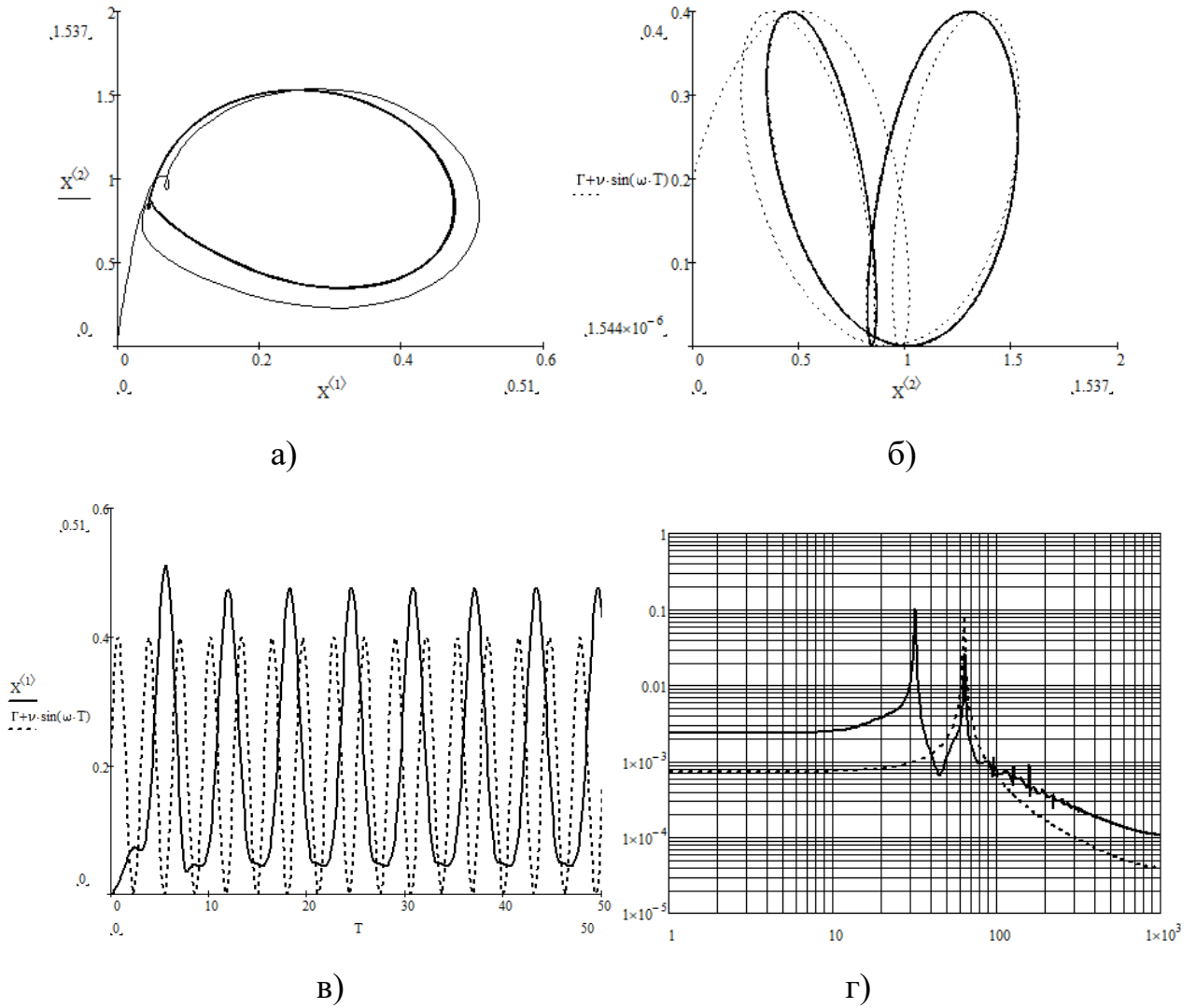


Рисунок 4.16 – Результати математичного моделювання режиму ділення частоти на 2: а) фазовий портрет; б) фігура Ліссажу; в) часова діаграма нормованих вхідної та вихідної напруги; г) амплітудо-частотний спектр нормованих вхідної та вихідної напруги

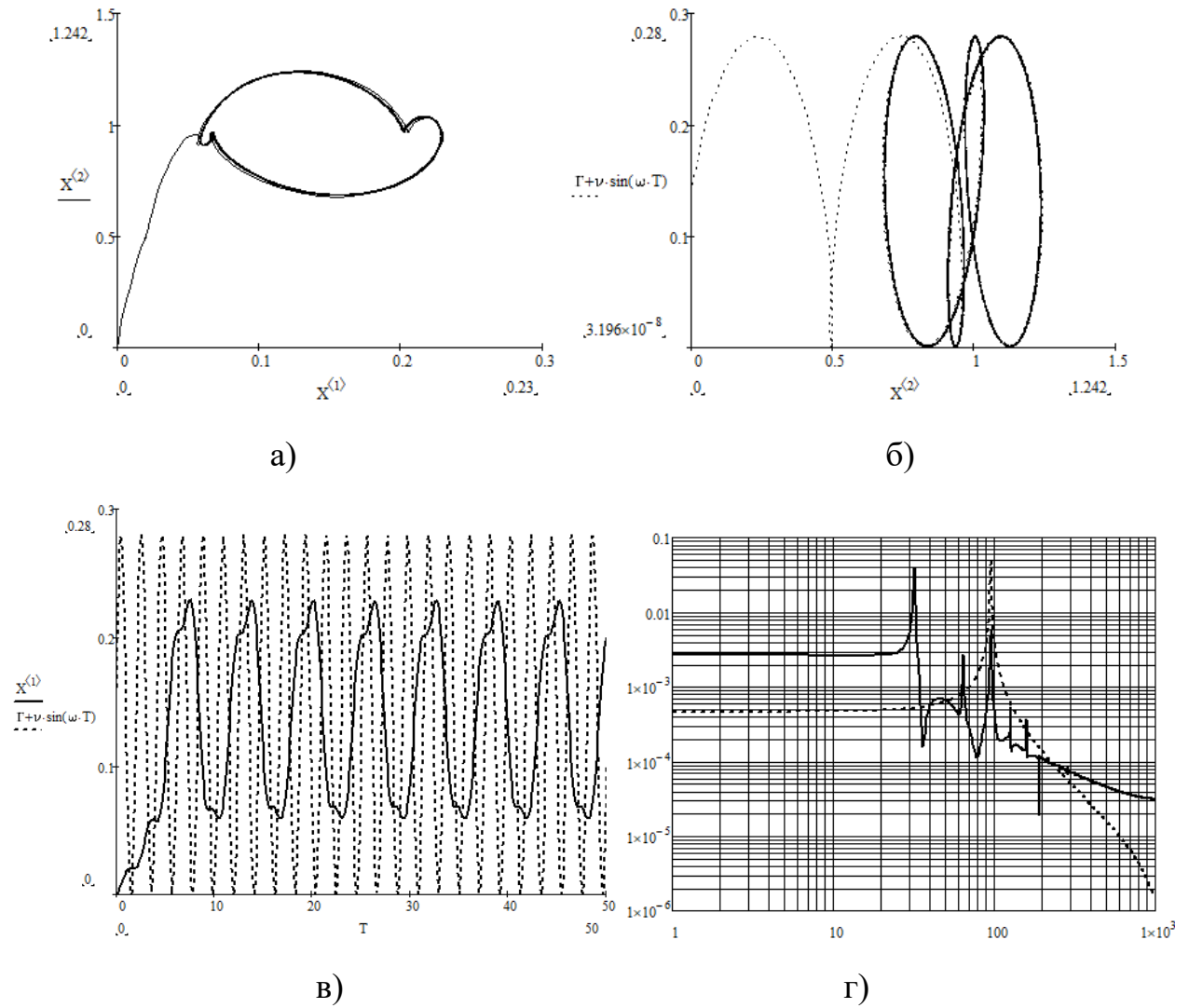


Рисунок 4.17 – Результати математичного моделювання режиму ділення частоти на 3: а) фазовий портрет; б) фігура Лиссажу; в) часова діаграма нормованих вхідної та вихідної напруги; г) амплітудо-частотний спектр нормованих вхідної та вихідної напруги

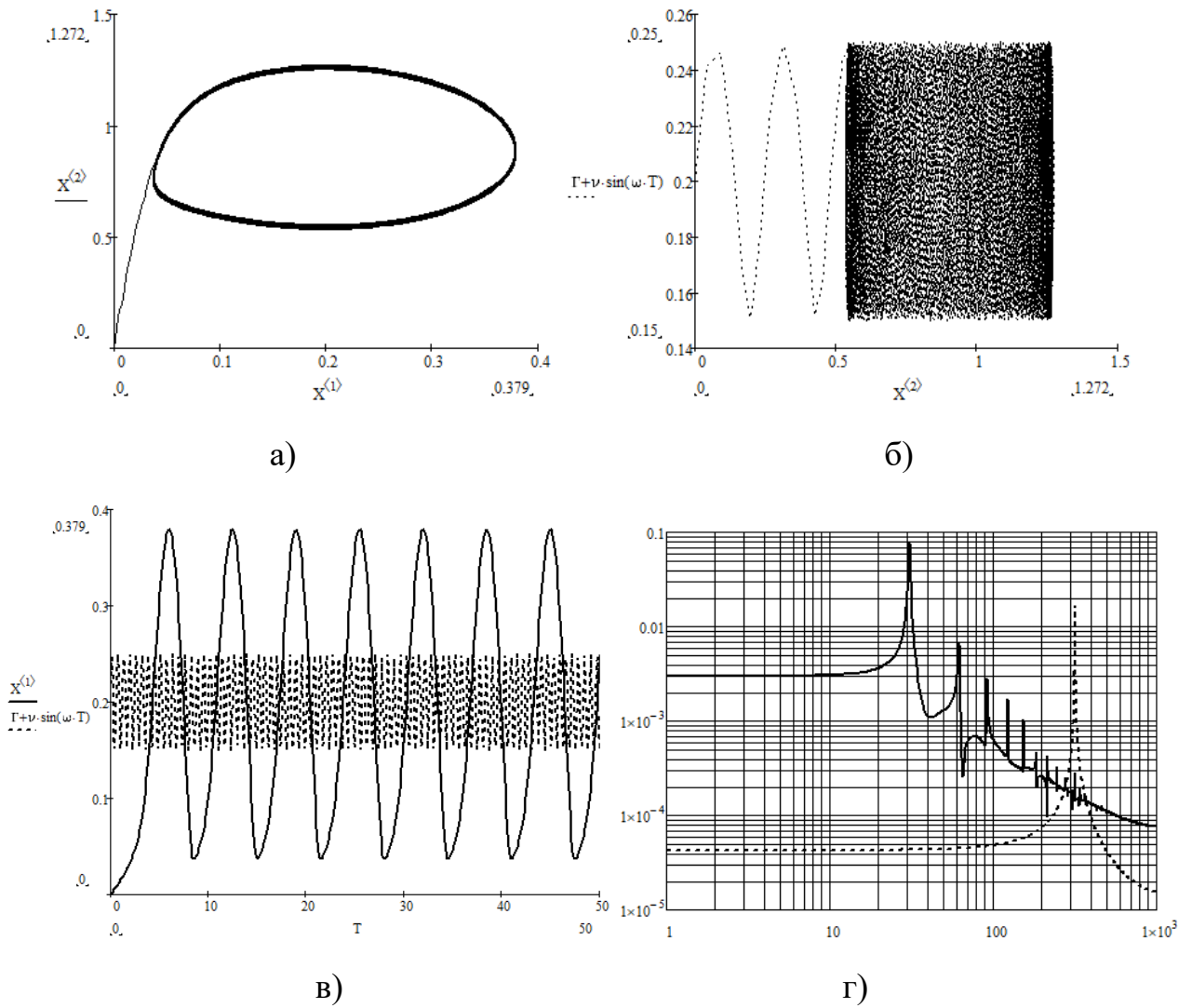


Рисунок 4.18 – Результати математичного моделювання режиму ділення частоти на 10: а) фазовий портрет; б) фігура Ліссажу; в) часова діаграма нормованих вхідної та вихідної напруги; г) амплітудо-частотний спектр нормованих вхідної та вихідної напруги

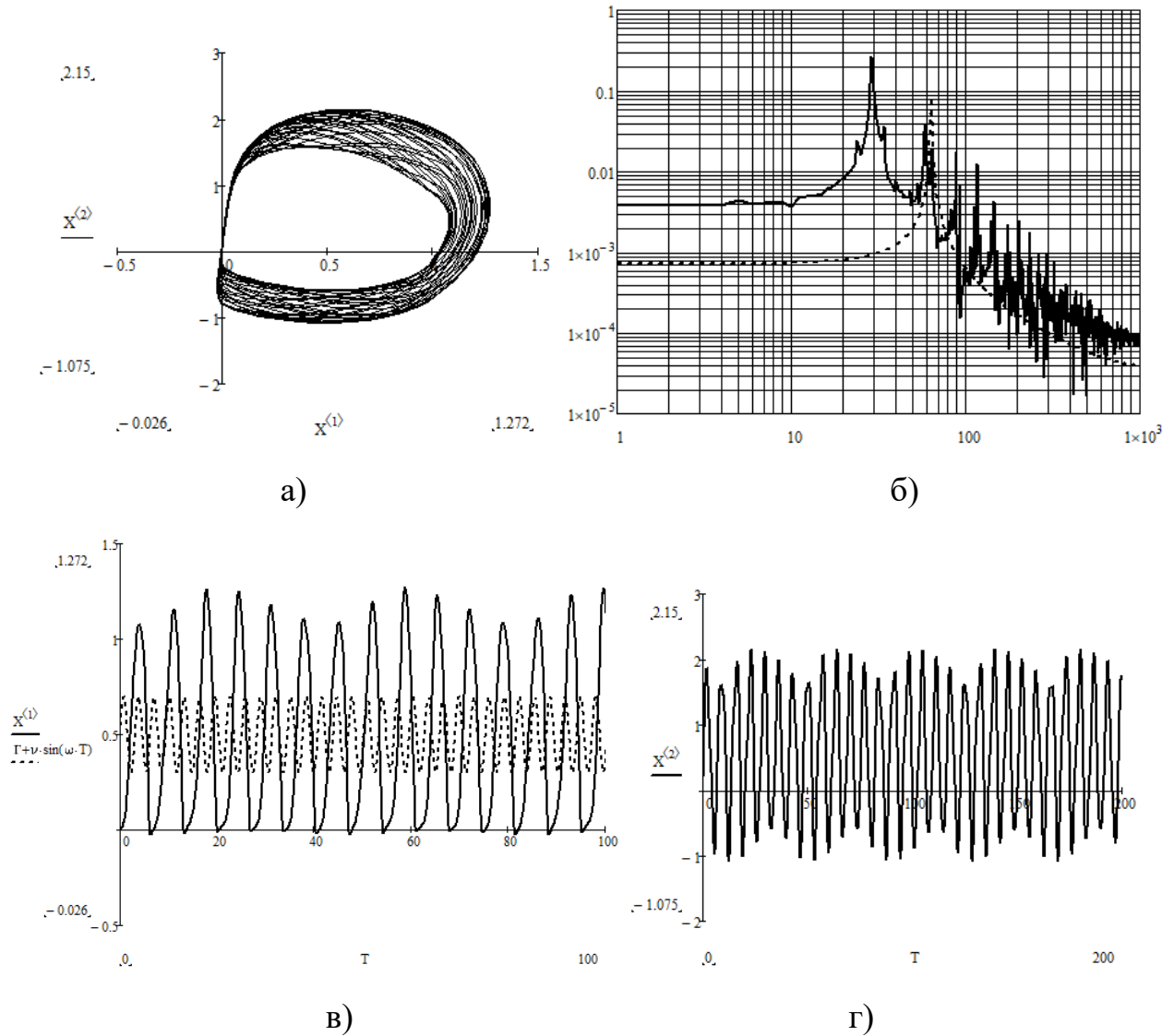


Рисунок 4.19 – Результати математичного моделювання режиму амплітудної модуляції сигналу: а) фазовий портрет; б) амплітудо-частотний спектр нормованих вхідної та вихідної напруги; в) часова діаграма нормованих вхідної та вихідної напруги; г) часова діаграма нормованого струму індуктивності

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Аналіз комерційного потенціалу розробки (технологічний аудит розробки) оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором

5.1.1 Визначення рівня комерційного потенціалу розробки оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором.

Метою проведення технологічного аудиту є оцінювання комерційного потенціалу розробки оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором, створеної в результаті науково-технічної діяльності. В результаті оцінювання можна буде зробити висновок щодо напрямів (особливостей) організації подальшого її впровадження з врахуванням встановленого рейтингу.

Для проведення технологічного аудиту залучимо 3-х незалежних експертів. У нашому випадку такими експертами будуть керівник магістерської роботи та провідні викладачі випускової та споріднених кафедр.

Оцінювання комерційного потенціалу розробки оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором будемо здійснювати за 12-ю критеріями згідно рекомендацій.

Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором заносимо до табл.5.1.

За даними табл.5.1 робимо висновок щодо рівня комерційного потенціалу розробки оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором. При цьому користуємося рекомендаціями, наведеними в табл. 5.2.

Таблиця 5.1 - Результати оцінювання комерційного успіху розробки оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором.

Критерії	Експерти		
	д.т.н., професор Семенов А.О.	д.т.н., професор Осадчук О.В.	к.т.н., доцент Гаврілов Д.В.
	Бали, виставлені експертами		
1	3	2	2
2	2	2	2
3	3	2	3
4	2	3	3
5	2	2	1
6	2	3	3
7	2	4	3
8	2	2	2
9	1	2	3
10	2	2	3
11	3	3	3
12	2	2	1
Сума балів	26	29	29
Середньоарифметична сума балів, СБ	28		

Таблиця 5.2 – Рівні комерційного потенціалу розробки

Середньоарифметична сума балів, розрахована на основі висновків експертів	Рівень комерційного потенціалу розробки
0 – 10	Низький
11 – 20	Нижче середнього
21 – 30	Середній
31 – 40	Вище середнього
41 – 50	Високий

Таким чином, робимо висновок, щодо рівня комерційного потенціалу нашої розробки оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором – середній.

5.1.2 Визначення рівня якості розробки оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором.

Оцінювання рівня якості розробки оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором проводиться з метою порівняльного аналізу і визначення найбільш ефективного, з технічної точки зору, варіанта інженерного рішення.

Рівень якості – це кількісна характеристика міри придатності певного виду продукції для задоволення конкретного попиту на неї при порівнянні з відповідними базовими показниками за фіксованих умов споживання.

Абсолютний рівень якості розробки оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором знаходимо обчисленням вибраних для її вимірювання показників, не порівнюючи їх із відповідними показниками аналогічних виробів. Для цього необхідно визначити зміст основних функцій, які повинні реалізувати розробка, вимоги замовника до неї, а також умови, які характеризують експлуатацію, визначають основні параметри, які будуть використані для розрахунку коефіцієнта технічного рівня виробу. Система параметрів, прийнята до розрахунків, повинна достатньо повно характеризувати споживчі властивості інноваційного товару (його призначення, надійність, економічне використання ресурсів, стандартизація тощо).

Далі визначаємо величину параметрів якості в балах та встановлюємо граничні його значення (кращі, гірші, середні). Всі ці дані для кожного параметра заносимо в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Основні параметри оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором.

Параметри	Абсолютне значення параметра			Коефіцієнт вагомості параметра
	Краще +5...+4	Середнє +3	Гірше +1...+2	
Діапазон частот	4			0,1
Вихідна потужність			2	0,1
Температурна стабільність частоти		3		0,6
Діапазон робочих температур	4			0,05
Напруга живлення		3		0,05
Струм живлення		3		0,05
Тип каналу		3		0,05

Із врахуванням коефіцієнтів вагомості відповідних параметрів можна визначити абсолютний рівень якості інноваційного рішення за формулою:

$$K_{я.а.} = \sum_{i=1}^n P_{ні} \cdot a_i, \quad (5.1)$$

де $P_{ні}$ – числове значення i -го параметра інноваційного рішення,

n – кількість параметрів інноваційного рішення, що прийняті для оцінювання,

a_i – коефіцієнт вагомості відповідного параметра (сума коефіцієнтів вагомості всіх параметрів повинна дорівнювати 1).

Отже, абсолютний рівень якості оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором становитиме – 3,05 бали.

Одночасно визначаємо відносний рівень якості оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором, що виробляється (проектується),

порівнюючи її показники з абсолютними показниками якості найліпших вітчизняних та зарубіжних аналогів (товарів-конкурентів) (табл. 5.4).

Таблиця 5.4 – Основні параметри оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференціальним опором та товару-конкурента

Параметри	Варіанти		Відносний показник якості	Коефіцієнт вагомості параметра
	Базовий (конкурент)	Новий		
Діапазон частот, ГГц	25...38	38..52	1,37	0,1
Вихідна потужність, мВт	10...50	10..20	2,5	0,1
Температурна стабільність частоти, $1/^\circ\text{C} \times 10^{-6}$	30...50	100	2,0	0,6
Діапазон робочих температур, $^\circ\text{C}$	-50...+50	-50...+50	1	0,05
Напруга живлення, В	9...12	3,5...4,5	2,0	0,05
Струм живлення, А	1,5	1,3	1,15	0,05
Тип каналу	Хвилевід	Хвилевід	1,0	0,05

Відносний рівень якості оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференціальним опором визначаємо за формулою:

$$K_{\text{я.в.}} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot a_i, \quad (5.2)$$

За розрахунками відносний рівень якості оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференціальним опором становитиме – 1,84. Це означає, що наша розробка краща за якістю на 70% від товару-аналога.

5.1.3 Визначення конкурентоспроможності розробки оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференціальним опором.

У найширшому розумінні конкурентоспроможність товару – це можливість його успішного продажу на певному ринку і в певний проміжок часу. Одночас конкурентоспроможною можна вважати лише однорідну продукцію з технічними параметрами і техніко-економічними показниками, що ідентичні аналогічним показникам уже проданого товару. Для того, щоб високоякісний товар був одночасно і конкурентоспроможним, він має відповідати критеріям оцінювання споживачів конкретного ринку в конкретний час.

Дані для розрахунку загального показника конкурентоспроможності розробки необхідно занести до таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Нормативні, технічні та економічні параметри оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференціальним опором і товару-конкурента

Параметри	Варіанти		Відносний показник якості	Коефіцієнт вагомості параметра
	Базовий (конкурент)	Новий		
Точність вимірювання	2	1	0,5	0,1
Діапазон частот, ГГц	25...38	38..52	1,37	0,1
Вихідна потужність, мВт	10...50	10..20	2,5	0,1
Температурна стабільність частоти, $1/^\circ\text{C} \times 10^{-6}$	30...50	100	2,0	0,6
Діапазон робочих температур, $^\circ\text{C}$	-50...+50	- 50...+50	1	0,05
Напруга живлення, В	9...12	3,5...4,5	2,0	0,05
Струм живлення, А	1,5	1,3	1,15	0,05
Ціна за продукт, тис. грн.	10000	9500	0,95	-

Загальний показник конкурентоспроможності розробки (К) з урахуванням вищезазначених груп показників визначаємо за формулою:

$$K = \frac{I_{т.п.}}{I_{е.п.}} = \frac{1,84}{0,95} = 1,93, \quad (5.3)$$

де $I_{т.п.}$ – індекс технічних параметрів (відносний рівень якості інноваційного рішення);

$I_{е.п.}$ – індекс економічних параметрів.

$$I_{е.п.} = \frac{P_{Hei}}{P_{Bei}} = \frac{9500}{10000} = 0,95, \quad (5.4)$$

де P_{Hei} , P_{Bei} – економічні параметри (ціна придбання та споживання товару) відповідно нового та базового товарів.

Згідно розрахунків загальний показник конкурентоспроможності – 1,94. Це означає, що наша розробка оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором більш конкурентна на 94% від товару-аналога.

5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної, дослідно-конструкторської та конструкторсько-технологічної роботи

5.2.1 Розрахунок витрат, що стосуються виконавців розробки оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором.

Основна заробітна плата кожного із розробників (дослідників) Z_0 , якщо вони працюють в наукових установах бюджетної сфери:

$$Z_0 = \frac{M}{T_p} \cdot t, \quad (5.5)$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника (інженера, дослідника, науковця тощо), грн. У 2019 році величини окладів (разом з встановленими доплатами і надбавками) рекомендується брати в межах (5000...10000) грн. за місяць;

T_p – число робочих днів в місяці; приблизно $T_p = (21...23)$ дні;

t – число робочих днів роботи розробника (дослідника).

Зроблені розрахунки зводимо до табл. 5.1.

Таблиця 5.6 – Заробітна плата розробників

Посада	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число робочих днів	Витрати на заробітну плату, грн.
Керівник	10000	455	5	2275
Інженер-програміст	5000	227	5	1135
Консультанти	5000	227	5	1135
Всього:				4545

Основна заробітна плата робітників Z_p , якщо вони беруть участь у виконанні даного етапу роботи і виконують роботи за робочими професіями у випадку, коли вони працюють в наукових установах бюджетної сфери, розраховується за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n t_i \cdot C_i, \quad (5.6)$$

де t_i – норма часу (трудомісткість) на виконання конкретної роботи, годин;

n – число робіт по видах та розрядах;

C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, який виконує дану роботу. C_i визначається за формулою:

$$C_i = \frac{M_m \cdot K_i}{T_p \cdot T_{zm}}, \quad (5.7)$$

де Мм – розмір мінімальної заробітної плати за місяць, грн.; в 2019 році мінімальна заробітна плата становить – 4173 грн.,

Кі – тарифний коефіцієнт робітника відповідного розряду,

Тр – число робочих днів в місяці; приблизно Тр = 21...23 дні;

Тзм – тривалість зміни, зазвичай Тзм = 8 годин.

Величина чинних тарифних коефіцієнтів робітників відповідних розрядів для бюджетної сфери наведена в таблиці:

Розряд	1	2	3	4	5	6	7	8
Кі	1,00	1,09	1,18	1,27	1,36	1,45	1,54	1,64

Таблиця 5.7 – Заробітна плата робітників

Найменування робіт	Трудоємність, н-год.	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка	Тариф. коеф.	Величина, грн.
Заготівельні	0,5	1	23,7	1	11,85
Штампувальні	0,2	3	27,9	1,18	5,58
Слюсарно-механічні	0,3	3	27,9	1,18	8,37
Токарні	0,3	4	30,1	1,27	9,03
Фрезерні	0,4	4	30,1	1,27	12,04
Складальні	0,4	5	32,2	1,36	12,88
Регулювальні	0,5	6	34,4	1,45	17,2
Досліджувані	0,4	6	34,4	1,45	13,76
Всього					90,71

Додаткова заробітна плата Зд всіх розробників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховується як (10...12)% від суми основної заробітної плати всіх розробників та робітників, тобто:

$$Зд = 0,12 \cdot (Зр + Зо) = 0,12 \cdot (4545 + 90,71) = 556,3 \text{ грн.} \quad (5.8)$$

Нарахування на заробітну плату Нзп розробників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$\begin{aligned} \text{Нзп} &= 0,22 \cdot (\text{Зр} + \text{Зо} + \text{Зд}) = 0,22 \cdot (4545 + 90,71 + 556,3) = \\ &= 5192 \text{грн.} \end{aligned} \quad (5.9)$$

де Зо – основна заробітна плата розробників, грн.;

Зр – основна заробітна плата робітників, грн.;

Зд – додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.;

β – ставка єдиного внеску на загальнообов’язкове державне соціальне страхування, % (приймаємо для 1-го класу професійності ризику 22%).

Амортизація обладнання, комп’ютерів та приміщень A , які використовувались під час (чи для) виконання даного етапу роботи.

Дані відрахування розраховують по кожному виду обладнання, приміщенням тощо.

У спрощеному вигляді амортизаційні відрахування A в цілому бути розраховані за формулою:

$$A = \frac{\text{Ц} \cdot \text{На}}{100} \cdot \frac{\text{Т}}{12},$$

де Ц – загальна балансова вартість всього обладнання, комп’ютерів, приміщень тощо, що використовувались для виконання даного етапу роботи, грн.;

На – річна норма амортизаційних відрахувань. Для нашого випадку можна прийняти, що $\text{На} = (10...25)\%$;

Т – термін, використання обладнання, приміщень тощо, місяці.

Таблиця 5.8 - Амортизаційні відрахування

Найменування	Ціна, грн.	Норма амортизації, %	Термін використання, м.	Сума амортизації
Генератор НВЧ	7000	20	2	233
Осцилограф	4500	20	2	150
Аналізатор спектру	19000	20	1	317
Всього	700			

Витрати на матеріали M , що були використані під час виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$M = \sum_{i=1}^n N_i \cdot C_i \cdot K_i, \text{ грн}$$

де N_i – кількість матеріалу i -го виду, шт.;

C_i – ціна матеріалу i -го виду, грн.;

K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1,1 \dots 1,15)$; n – кількість видів матеріалів.

Таблиця 5.9 - Матеріали, що використані на розробку

Найменування матеріалу	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість, грн.
Флюс каніфоль	200	0,002	0,4
Мідь МБ	300	0,1	30
Фторопласт Ф-4	225	0,01	2,25
Латунь ЛС 59-1	120	0,2	24
Припой ПОС-60	625	0,01	6,25
Припой ПСр-55	785	0,01	7,85
Резонансно-тунельний діод	90	1	90
Варактор	75	1	75
Гвинт М3х10	0,5	2	1,0
Гвинт М3х20	0,5	4	2,0
Роз'єм СРГ50-751ФВ	12,5	2	25
Хвилевід	1250	0,25	312,5
Всього, з урахуванням коефіцієнта транспортних витрат	660		

Витрати на комплектуючі К, що були використані під час виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$K = \sum_{1}^{n} N_i \cdot C_i \cdot K_i, \text{ грн}$$

де N_i – кількість комплектуючих i -го виду, шт.;

C_i – ціна комплектуючих i -го виду, грн.;

K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1,1 \dots 1,15)$;

n – кількість видів комплектуючих.

Таблиця 5.10 - Комплектуючі, що використані на розробку

Найменування матеріалу	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість, грн.
Корпус	48	1	48
Кнопкова панель	3	1	3
Гвинти	1,5	8	12
Роз'єми	4,8	4	19,2
Трансформатор	53	1	53
Радіатор	24	4	96
Діоди	8	4	32
Операційний підсилювач	34	6	204
Конденсатори	1,15	18	20,7
Резистори постійні	0,4	28	11,2
Резистори змінні	2,3	8	18,4
Вставка плавка	2,0	1	2
Вилка	3,5	1	3,5
Всього, з урахуванням коефіцієнта транспортних витрат	574		

Витрати на силову електроенергію $В_e$, якщо ця стаття має суттєве значення для виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$В_e = В \cdot П \cdot \Phi \cdot Кп, \text{ грн}$$

де $В$ – вартість 1 кВт-год. електроенергії, в 2019 р. $В \approx 8,45$ грн./кВт;

$П$ – установлена потужність обладнання, кВт;

Φ – фактична кількість годин роботи обладнання, годин,

$Кп$ – коефіцієнт використання потужності; $Кп < 1$.

Потужність обладнання складає – 1,5 кВт.

Кількість годин роботи складає – 7000 годин.

Коефіцієнт викор. потужності – 0,9.

$В_e = 7980$ грн.

Інші витрати $В_{ін}$ охоплюють: витрати на управління організацією, оплата службових відряджень, витрати на утримання, ремонт та експлуатацію основних засобів, витрати на опалення, освітлення, водопостачання, охорону праці тощо.

Інші витрати $І_v$ можна прийняти як (100...300)% від суми основної заробітної плати розробників та робітників, які були виконували дану роботу, тобто:

$$І_v = 3 \cdot (З_о + З_p) = 3 \cdot (4545 + 90,71) = 13907 \text{ грн.} \quad (5.10)$$

Сума всіх попередніх статей витрат дає витрати на виконання даної частини (розділу, етапу) роботи – $В$.

$$В = 26523 \text{ грн.}$$

5.5.2 Розрахунок загальних витрат на розробку оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором.

Загальна вартість всієї наукової роботи визначається за Взаг формулою:

$$\text{Взаг} = \frac{I_{\text{в}}}{\alpha} = \frac{13907}{0,6} = 23178 \text{ грн}, \quad (5.11)$$

де α – частка витрат, які безпосередньо здійснює виконавець даного етапу роботи, у відн. одиницях.

5.2.3 Прогнозування витрат на виконання та впровадження оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором.

Прогнозування загальних витрат ЗВ на виконання та впровадження оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором здійснюється за формулою:

$$\text{ЗВ} = \frac{\text{Взаг}}{\beta} = \frac{23178}{0,7} = 33112 \text{ грн}, \quad (5.12)$$

де β – коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання даної роботи.

Так, якщо розробка знаходиться: на стадії науково-дослідних робіт, то $\beta \approx 0,1$; на стадії технічного проектування, то $\beta \approx 0,2$; на стадії розробки конструкторської документації, то $\beta \approx 0,3$; на стадії розробки технологій, то $\beta \approx 0,4$; на стадії розробки дослідного зразка, то $\beta \approx 0,5$; на стадії розробки промислового зразка, $\beta \approx 0,7$; на стадії впровадження, то $\beta \approx 0,9$.

5.3 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором

З метою прогнозування комерційних ефектів від реалізації оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором складемо таблицю вихідних показників, за рахунок яких і відбуватиметься отримання комерційного ефекту.

Таблиця 5.11 – Вихідні дані для прогнозування комерційного ефекту від реалізації оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором.

Рік реалізації розробки	1	2	3
Кількість од. реалізації, шт.	100	200	400

Величина зростання ціни реалізації оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором, грн. – 500 грн.

Кількість продукції, що випускалась до впровадження оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором – 50 шт.

Збільшення чистого прибутку підприємства Π_i для кожного із років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки, розраховується за формулою:

$$\Delta \Pi_i = \sum_1^n (\Delta \text{Ц}_0 \cdot N + \text{Ц}_0 \cdot \Delta N)_i \cdot \rho \cdot \gamma \cdot \left(1 - \frac{v}{100}\right) \quad (5.13)$$

де $\Delta\Pi_0$ – покращення основного оціночного показника від впровадження результатів розробки у даному році. Зазвичай таким показником може бути ціна одиниці нової розробки;

N – основний кількісний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році до впровадження результатів наукової розробки;

ΔN – покращення основного кількісного показника діяльності підприємства від впровадження результатів розробки;

Π_0 – основний оціночний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році після впровадження результатів наукової розробки;

n – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки;

λ – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість. У 2018 р. ставка податку на додану вартість дорівнює 20%, а коефіцієнт – 0,8333. З 2014 року ставка податку на додану вартість встановлена на рівні 17%, а коефіцієнт – 0,8547;

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. Рекомендується приймати – 0,2...0,3;

v – ставка податку на прибуток. У 2018 році – 21%, у 2013 році – 19%, а з 2014 року – 16%.

Збільшення чистого прибутку підприємства Π_1 протягом першого року складе:

$$\Delta\Pi_1=8437 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку підприємства Π_1 протягом другого року (відносно базового року, тобто року до впровадження результатів наукової розробки) складе:

$$\Delta\Pi_2=37656 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку підприємства протягом третього року (відносно базового року, тобто року до впровадження результатів наукової розробки) складе:

$$\Delta\Pi_3=54530 \text{ грн.}$$

5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та період їх окупності

5.4.1 Визначення абсолютної ефективності вкладених інвестицій у розробку оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором

Для цього користуються формулою:

$$E_{абс} = (ПП - PV), \quad (5.14)$$

де ПП – приведена вартість всіх чистих прибутків, що їх отримає підприємство (організація) від реалізації результатів наукової розробки, грн.;

PV – теперішня вартість інвестицій $PV = ZB$, грн.

У свою чергу, приведена вартість всіх чистих прибутків ПП розраховується за формулою:

$$ПП = \sum_1^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1+\tau)^t} \quad (5.15)$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої НДДКР, грн.;

t – період часу, протягом якого виявляються результати впровадженої НДДКР, роки;

τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні; для України цей показник знаходиться на рівні 0,1;

t – період часу (в роках) від моменту отримання чистого прибутку до точки „0”.

$$ПП = 91475 \text{ грн.},$$

$$E_{абс} = 91475 - 33112 = 58363 \text{ грн.}$$

Оскільки $E_{абс} > 0$, то результат від проведення наукових досліджень та їх впровадження принесе прибуток, але це також ще не свідчить про те, що інвестор буде зацікавлений у фінансуванні розробки оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором.

5.4.2 Розрахунок відносної ефективності вкладених коштів в НДДКР оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором.

Для цього користуються формулою:

$$E_B = \sqrt[T]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1 \quad (5.16)$$

де $E_{абс}$ – абсолютна ефективність вкладених інвестицій, грн.; PV – теперішня вартість інвестицій $PV = ZB$, грн.; T – життєвий цикл наукової розробки, роки.

$$E_B = 0,22$$

Далі, розрахована величина E_B порівнюється з мінімальною (бар'єрною) ставкою дисконтування, що дорівнює:

$$\tau = d + f, \quad (5.17)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2018 році в Україні $d = (0,14...0,2)$;

f – показник, що характеризує ризикованість вкладень; зазвичай, величина $f = (0,05...0,1)$, але може бути і значно більше.

$$E_B = 0,22 \geq \tau = 0,14 + 0,05 = 0,19.$$

Оскільки величина $E_B > \tau_{\text{мін}}$, то інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні даної наукової розробки.

5.4.3 Розрахунок терміну окупності коштів, вкладених в наукову розробку оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференціальним опором.

Термін окупності вкладених у реалізацію наукового проекту інвестицій Ток можна розрахувати за формулою:

$$\text{Ток} = \frac{1}{E_B} = \frac{1}{0,22} = 4,5 \text{ року.} \quad (5.18)$$

Оскільки $\text{Ток} < 3...5$ -ти років, то фінансування даної наукової розробки оптико-електронного радіотехнічного пристрою на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференціальним опором є доцільним.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Захист працюючих під час трудового процесу від небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що справляють негативний вплив на здоров'я, життя, а також працездатність людини, забезпечення належних умов праці є основними аспектами охорони праці, як складової безпеки життєдіяльності.

В даному розділі наводиться розгляд небезпечних, шкідливих [73] і уражаючих для людини і навколишнього довкілля чинників, які виникають при проведенні дослідження оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором. В ньому висвітлюються, в тому числі, технічні рішення з виробничої санітарії та гігієни праці, визначення опроміненості роговиці ока при прямому лазерному випромінюванні, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження, безпека у надзвичайних ситуаціях.

6.1 Виробнича санітарія та гігієна праці

6.1.1 Склад повітря робочої зони та мікроклімат

Визначаємо для приміщення для проведення дослідження оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором, категорію важкості робіт за фізичним навантаженням – легка Іа.

У відповідності із [74] допустимі параметри температури, відносної вологості та швидкості руху повітря у робочій зоні для теплого та холодного періодів року приведені у табл.6.1.

При опроміненні менше 25% поверхні тіла людини, допустима інтенсивність теплового опромінення складає 100 Вт/м^2 .

Повітря робочої зони не повинно містити шкідливих речовин з концентраціями вище гранично допустимих концентрацій (ГДК) в повітрі ро-

бочої зони і підлягає систематичному контролю для запобігання можливості перевищення ГДК, значення яких для роботи з ЕОМ наведено в табл. 6.2.

При використанні ЕОМ джерелом зараження повітря є також іонізація молекул речовин, що містяться в повітрі. Рівні додатних та від'ємних іонів повинні відповідати [73] і приведені в табл. 6.3.

Таблиця 6.1 – Допустимі показники мікроклімату в приміщенні

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °С для робочих місць		Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
		постійних	непостійних		
Холодний	Іа	21-25	18-26	75	≤0,1
Теплий		22-28	20-30	55 при 28°С	0,1-0,2

Таблиця 6.2 – ГДК шкідливих речовин [76]

Назва речовини	ГДК, мг/м ³	Агрегатний стан	Клас небезпеки
Озон	0,1	Пара	4
Оксиди азоту	5	Пара	2
Пил	4	Аерозоль	2

Таблиця 6.3 – Кількість іонів в 1 см³ повітря приміщення при роботі на ЕОМ

Рівні	Мінімально необхідні	Оптимальні	Максимально допустимі
позитивний	400	1500-3000	50000
негативний	600	3000-5000	50000

Для встановлення необхідних за нормативами показників мікроклімату та складу повітря робочої зони запропоновано такі заходи:

1) у приміщенні має бути встановлена система кондиціонування для теплого і опалення для холодного періодів року;

2) застосування вентиляції, яка видаляє забруднення або нагріте повітря з приміщення, а також за допомогою неї контролюється швидкість руху повітря і вологість.

6.1.2 Виробниче освітлення

З метою забезпечення раціональних гігієнічних умов на робочих місцях значні вимоги висуваються щодо якісних та кількісних параметрів освітлення.

З точки зору задач зорової роботи в приміщенні, де проводиться робота з дослідження оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором, згідно [75] визначаємо, що вони відповідають IV розряду зорових робіт. Вибираємо контраст об'єкта з фоном – великий та характеристику фону – середню, яким відповідає підрозряд зорових робіт *г*.

Нормовані значення коефіцієнта природного освітлення (КПО) і мінімальні значення освітленості при штучному освітленні наведені в табл. 6.4.

Таблиця 6.4 – Нормовані значення КПО та мінімальні освітленості при штучному освітленні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фону	Освітленість для штучного освітлення, лк			КПО для бокового освітлення, %	
						комбіноване		загальне	Природного	Суміщеного
						всього	у т. ч. від загального			
Середньої точності	0,5-1	IV	г	великий	середній	300	150	150	1,5	0,9

Так як приміщення розташоване у місті Вінниця (друга група забезпеченості природним світлом), а вікна розташовані за азимутом 225°, то за таких обставин КЕО розраховується за виразом [75, 76]

$$e_N = e_H m_N [\%], \quad (6.1)$$

де e_H – табличне значення КЕО для бокового освітлення, %;

m_N – коефіцієнт світлового клімату;

N – номер групи забезпеченості природним світлом.

Підставляючи відомі значення отримаємо нормовані значення КПО для бокового та суміщеного освітлення:

$$e_{N,б} = 1,5 \cdot 0,85 = 1,28 (\%);$$

$$e_{N,с} = 0,9 \cdot 0,85 = 0,77 (\%).$$

З метою забезпечення нормованих значень показників освітлення передбачено такі заходи:

1) за недостатнього природного освітлення у світлий час доби доповнення штучним завдяки використанню люмінесцентних ламп з утворенням системи суміщеного освітлення;

2) застосування штучного освітлення у темний час доби.

6.1.3 Виробничі віброакустичні коливання

Зважаючи на те, що при використанні пристроїв крім усього іншого устаткування застосовується обладнання, робота якого генерує шум та вібрацію, потрібно передбачити шумовий та вібраційний захист.

Визначено, що приміщення, де відбувається робота з дослідження оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором може містити робочі місця із шумом та вібрацією, що спричиняється рухомими елементами ЕОМ.

Для попередження травмування працівників від дії шуму він підпадає під нормування. Головним документом стосовно промислового шуму, що діє на

території України, є [77], згідно з яким допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку та еквівалентні рівні шуму на робочих місцях в промислових приміщеннях не мають бути більшими ніж значення, які наведено у табл. 6.5. Норми виробничих вібрацій наведено в табл. 6.6 для локальної вібрації.

Таблиця 6.5 – Нормовані рівні звукового тиску та еквівалентні рівні звуку

Рівні звукового тиску в дБ в октавних полосах з середньо-геометричними частотами, Гц									Рівні звуку і еквівалентні рівні звуку, дБА
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Таблиця 6.6 – Допустимі рівні віброприскорення [76]

Гранично допустимі рівні віброприскорення, дБ, в октавних полосах з середньо-геометричними частотами, Гц								Коректовані рівні віброприскорення, дБА
8	16	31,5	63	125	250	500	1000	
73	73	79	85	91	97	103	109	76

З метою покращення віброакустичного клімату у приміщенні запропоновано такі заходи:

- 1) оздоблення стін спеціальними перфорованими плитами, панелями з метою шумопоглинання;
- 2) передбачено використовувати в приміщенні штори із щільної тканини.

6.1.4 Виробничі випромінювання

Аналіз умов праці показав, що приміщення, в якому проводиться робота з дослідження підлягає впливу лазерного випромінювання.

Згідно [76] регламентуються гранично допустимі рівні (ГДР) для кожного його спектрального діапазону. Граничні дози при однократному впливі на очі колімованого (прямого) лазерного випромінювання наведено в табл. 6.7.

Таблиця 6.7 – Гранично допустимі дози при однократному впливі на очі колімованого (прямого) лазерного випромінювання

Довжина хвилі λ , нм	Тривалість впливу t , с	$W_{ГДР}$, Дж
$380 < \lambda \leq 600$	$t \leq 2,3 \cdot 10^{-11}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$2,3 \cdot 10^{-11} < t \leq 5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-8}$
	$5 \cdot 10^{-5} < t \leq 1$	$5,9 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt[3]{t^2}$
$600 < \lambda \leq 750$	$t \leq 6,5 \cdot 10^{-11}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$6,5 \cdot 10^{-11} < t \leq 5 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$
	$5 \cdot 10^{-5} < t \leq 1$	$1,2 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt[3]{t^2}$
$750 < \lambda \leq 1000$	$t \leq 2,5 \cdot 10^{-10}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$2,5 \cdot 10^{-10} < t \leq 5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-7}$
	$5 \cdot 10^{-5} < t \leq 1$	$3 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt[3]{t^2}$
$1000 < \lambda \leq 1400$	$t \leq 10^{-9}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$10^{-9} < t \leq 5 \cdot 10^{-5}$	10^{-6}
	$5 \cdot 10^{-5} < t \leq 1$	$7,4 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt[3]{t^2}$

З метою забезпечення нормованих параметрів лазерного випромінювання в приміщенні передбачено такі заходи:

- 1) відокремлення небезпечної зони дисциплінарним бар'єром;
- 2) використання спеціальних окулярів із світлофільтрами для запобігання ураження органів зору.

Потужність лазерного випромінювання $P = 0,3$ Вт, діаметр вихідного вікна лазера $d_0 = 0,05$ см, відстань від джерела до розрахункової точки $R = 35$ см, кут розходження променя $\gamma = 0,05$ рад.

Опроміненість роговиці ока для прямого випромінювання визначається за формулою

$$H_p = \frac{4Pk_1}{\pi(d_0 + 2R\gamma)^2} \text{ [Дж/см}^2\text{]}, \quad (6.2)$$

де P – потужність лазерного випромінювання, Вт;

k_1 – коефіцієнт, що враховує послаблення випромінювання на шляху поширення;

d_0 – діаметр вихідного вікна лазера, см;

R – відстань від джерела до розрахункової точки, см;

γ – кут розходження променя, рад.

Приймаємо $k_1 = 0,75$.

Використовуючи формулу (5.2) знайдемо опроміненість роговиці ока для прямого випромінювання

$$H_p = \frac{4 \cdot 0,3 \cdot 0,75}{3,14 \cdot (0,05 + 2 \cdot 35 \cdot 0,05)^2} = 0,0227 \text{ (Дж/см}^2\text{)}.$$

6.2 Технічні рішення щодо промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження

Сучасний етап розвитку техніки, автоматизації розробок та досліджень характеризується широким використанням на робочому місці ЕОМ. Велика кількість прикладних програм перетворює ЕОМ на основне знаряддя праці радіоінженера.

6.2.1 Безпека щодо організації робочих місць

Робочі місця з відеодисплейним терміналом повинні розташовуватись на відстані не менше ніж 1,5 м від стіни з віконними прорізами, від інших стін – на віддалі 1 м, одне від одного на віддалі не менше ніж 1,5 м. При розміщенні робочих місць потрібно виключити ймовірність прямого засвічування екрану

джерелом природного освітлення. Робоче місце раціонально розміщати таким чином, щоб природне освітлення знаходилось збоку, бажано зліва [79].

Поверхня екрана має знаходитись на відстані 0,4-0,7 м від органів зору працівника. Висота робочої поверхні столу під час виконання роботи сидячи має налаштовуватись в межах 0,68-0,8 м. Робочий стіл повинен мати простір для ніг висотою не менше 0,6 м, шириною не менше ніж 0,5 м, глибиною на рівні колін не менше 0,45 м та на рівні витягнутої ноги не менше як 0,65 м [80].

6.2.2 Електробезпека

Причинами ураження електричним струмом в даному приміщенні можуть бути: робота під напругою при ремонтних роботах, несправність устаткування, випадкове торкання до струмоведучих частин або металевих частин, що опинилися під напругою. Згідно [81] дане приміщення відноситься до приміщень з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом в наслідок наявності значної (більше 75 %) вологості. Тому безпека експлуатації електрообладнання повинна забезпечуватись комплексом заходів, які включають використання ізоляції струмоведучих частин, захисних блокувань, захисного заземлення тощо [82].

6.2.3 Пожежна безпека

Згідно [83] приміщення, де проводиться робота з дослідження оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором, відноситься до категорії пожежної небезпеки В. Це приміщення відноситься до 2-го ступеня вогнестійкості, в якому приміщення знаходяться в будівлі з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону із застосуванням листових і плитних негорючих матеріалів. Мінімальні межі вогнестійкості конструкцій

розглядуваного приміщення наведені в табл. 6.8. В табл.6.9 наведено протипожежні норми проектування будівель і споруд.

Таблиця 6.8 – Мінімальні межі вогнестійкості приміщення [83]

Ступінь вогнестійкості будівлі	Стіни					Колони	Східчасті майданчики	Плити та інші несучі конструкції	Елементи покриття	
	Несучі та східчасті клітки	Самонесучі	Зовнішні несучі	Перегородки	Плити, прогони				Балки, ферми	
2	REI 120	REI 60	E 15	EI 15	R 120	R 60	REI 45	REI 15	R 30	
	M0	M0	M0	M0	M0	M0	M0	M0	M0	

Примітка. R – втрати несучої здатності; E – втрати цілісності; I – втрати теплоізолювальної спроможності; M – показник здатності будівельної конструкції поширювати вогонь (межа поширення вогню); M0 – межа поширення вогню дорівнює 0 см; M1 – $M \leq 25$ см – для горизонтальних конструкцій; $M \leq 40$ см – для вертикальних і похилих конструкцій; M2 – $M > 25$ см – для горизонтальних конструкцій; $M > 40$ см – для вертикальних і похилих конструкцій, нн – не нормується.

Таблиця 6.9 – Протипожежні норми проектування будівель і споруд [85]

Об'єм приміщення, тис. м ³	Категорія пожежної небезпеки	Ступінь вогнестійкості	Відстань, м, для щільності людського потоку в загальному проході, осіб/м ²			Кількість людей на 1 м ширини евакуиходу	Відстань між будівлями та спорудами, м, для ступеня їх вогнестійкості			Найбільша кількість поверхів	Площа поверху в межах пожежного відсіку, м ² , для числа поверхів		
			до 1	2-3	4-5		I,II	III	IV,V		1	2	3 і більше
до 15	B	2	100	60	40	110	9	9	12	8	н.о.	н.о.	н.о.

Примітки: н.о. – не обмежується, н.н. – не нормується.

Вибираємо, що приміщення, в якому проводиться робота з дослідження, має бути обладнане двома вогнегасниками, пожежним щитом, ємністю з піском [84].

6.3 Визначення області працездатності оптико-електронного радіотехнічного пристрою в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

В процесі проектування радіоелектронної апаратури важливим елементом є оцінка безпеки її роботи в умовах надзвичайних ситуацій та визначення гранично допустимих умов експлуатації даного обладнання. На оптико-електронні радіотехнічні пристрої суттєвий вплив мають іонізуючі випромінювання та електромагнітний імпульс.

Розрізняють декілька видів іонізуючої радіації, яка відрізняється за складом елементарних часток, які її утворюють. Потужність дози вимірюється в рентгенах за секунду (Р/с), доза опромінення – в рентгенах. В пристрій, що проектується входять різні компоненти і матеріали. Нижче приводиться аналіз впливу ІВ на дані матеріали і компоненти.

Органічні матеріали є дуже чутливими до радіації. Дія останньої призводить до перетворення молекул в цих матеріалах, яка супроводжується хімічними реакціями, в яких виникають незворотні зміни структури речовин та їх механічних властивостей. До даних речовин належать полімерні матеріали, зокрема лавсанова плівка, якою здійснено ізоляцію.

Внаслідок впливу радіації на резистори може виникнути пробій в зв'язуючих і насичуючих ізоляцію матеріалах; зміна властивостей основного матеріалу резистора, поява провідності з причини іонізації матеріалу каркаса та покриття. Чим більше величина опору, тим більші зворотні зміни викликаються опроміненням; звідки резистори з опором порядку 10^9 є ненадійними.

Іонізуючі випромінювання призводить до незворотних та зворотних змін характеристик конденсаторів. Загальною причиною цього є зміна електронних характеристик діелектрика (діелектричної сталої та опору). При дії радіації на

електролітичні конденсатори та конденсатори з масляним заповненням виникає виділення газів.

При дії іонізуючих випромінювань провідність точкового діода зменшується в прямому і зворотному напрямках; в плоских діодах провідність в прямому напрямку також зменшується. Зміна характеристик тим більше, чим більше потужність потоку.

ЕМІ здатний викликати напруги наводок в пристрої, що веде до небезпечних факторів в експлуатації, а також виникненню паразитних зв'язків. Це в свою чергу може вивести пристрій з робочого стану. Для більшої безпеки та стійкості роботи пристрою передбачається окреме екранування трансформаторів і блоку живлення.

6.3.1 Визначення області працездатності оптико-електронного радіотехнічного пристрою в умовах дії іонізуючих випромінювань

Пристрій складається з таких елементів: резистори, конденсатори, транзистори, мікросхеми, діелектричні матеріали.

Визначимо максимально допустимі потужності γ -випромінювань для кожного елемента, при якій вони не зможуть працювати, а також визначмо елемент, який найбільш чутливий до дії ІВ [91]. Потужність дози для кожного типу елементів, які входять до складу оптико-електронного радіотехнічного пристрою при яких в елементах можуть виникнути зворотні зміни, наведені в таблиці 6.10.

Найбільш чутливим матеріалом до дії ІВ є мікросхема та діелектричні матеріали, згідно таблиці 6.1 $P_{ЗВ} = 10^4 \text{ Рад/с}$.

В якості критерію стійкості роботи РЕА використовується граничне значення рівня радіації γ -випромінювання, яке розраховується за формулою:

$$P_{\text{гран}} = K_{\text{Н}} \cdot P_{\text{ЗВ}} \cdot K_{\text{пос}} \quad (6.3)$$

де K_H – коефіцієнт надійності елементної бази, $K_H = 0,9 \dots 0,95$, приймаємо $K_H = 0,93$.

Тоді

$$P_{\text{гран}} = 0,93 \cdot 10^4 \cdot 7 = 6,51 \cdot 10^5 \text{ (Рад/с)}.$$

Таблиця 6.10 – Радіаційна стійкість радіоелементів оптико-електронного радіотехнічного пристрою

№	Елементи	$P_{\text{зв}i}$, Рад/с
1	Транзистори	10^5
2	Резистори	10^6
3	Діоди	10^5
4	Конденсатори	10^5
5	Мікросхеми	10^4
6	Діелектричні матеріали	10^4

Отже, область працездатності оптико-електронного радіотехнічного пристрою в умовах дій іонізуючих випромінювань, в яких пристрій буде ще працювати при потужності дози випромінювання, лежить в межах від 0 до $6,51 \cdot 10^5$ Рад/с.

6.3.2 Визначення області працездатності оптико-електронного радіотехнічного пристрою в умовах дії електромагнітного імпульсу

Вихідні дані: $U_{\text{ж}} = 5 \text{ В}$ – напруга живлення пристрою;

$N = \pm 5\%$ – допустимі коливання напруги живлення;

$l_{\Gamma} = 0,2 \text{ м}$ – максимальна довжина горизонтального контуру електричної схеми.

Допустиме коливання напруги живлення визначається:

$$U_{\text{доп}} = U_{\text{ж}} + \frac{U_{\text{ж}} \cdot N}{100}, \quad (6.4)$$

$$U_{\text{доп}} = 5 + \frac{5 \cdot 5}{100} = 5,25 \text{ (В)}.$$

В якості показника стійкості елементів системи до дії ЕМІ використовують коефіцієнт безпеки, який визначається відношенням гранично допустимої напруги $U_{\text{доп}}$ до наведеної напруги, тобто до напруги, яка створена ЕМІ в даних умовах.

Коефіцієнт безпеки

$$K_{\text{б}} = 20 \cdot \lg \frac{U_{\text{доп}}}{U_{\Gamma}} \geq 40 \text{ [дБ]}. \quad (6.5)$$

Для нормальної роботи пристрою має виконуватись умова, виходячи з (6.4), тобто $K_{\text{б}} \geq 40$ дБ.

Плата пристрою розташована в горизонтальній площині [91]. Визначимо максимальну очікувану напругу в горизонтальних лініях виходячи з рівності:

$$20 \lg \frac{U_{\text{доп}}}{U_{\Gamma}} = 40 \Rightarrow U_{\Gamma} = \frac{U_{\text{доп}}}{10^{40/20}}, \quad (6.6)$$

$$U_{\Gamma} = \frac{5,25}{10^2} = 0,05 \text{ (В)}.$$

Вертикальна складова напруженості електричного поля визначається як

$$U_{\Gamma} = E_{\text{В}} \cdot l_{\Gamma}, \quad (6.7)$$

звідки

$$E_{\text{В}} = \frac{U_{\Gamma}}{l_{\Gamma}},$$

$$E_B = \frac{0,05}{0,2} = 0,25 \text{ (В/м)}.$$

Отже, область працездатності оптико-електронного радіотехнічного пристрою в умовах дії електромагнітного імпульсу, в якій пристрій буде ще працювати, лежить в межах від 0 до 0,25 В/м.

6.3.2 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи оптико-електронного радіотехнічного пристрою в умовах надзвичайних ситуацій.

Головними заходами щодо підвищення радіаційної стійкості є: застосування в апаратурі радіаційностійких елементів і матеріалів, спеціальних радіаційних екранів або активного захисту від впливу потоків заряджених частинок. При імпульсному впливі іонізуючих випромінювань, крім перерахованих способів використовують: застосування схем, мало критичних до змін електричних параметрів; зниження напруги живлення на аноді і збільшення від'ємної напруги зсуву сіток газорозрядних приладів; застосування пристроїв, які містять додаткові радіотехнічні схеми на період впливу радіації; збільшення відстані між елементами, які знаходяться під навантаженням і інші.

В захисті від іонізуючого опромінення використовують алюмінієві сплави, леговані елементами з високим атомним номером (лантаноїдами і рідкоземельними елементами), сплави на основі тугоплавких і рідкоземельних елементів і багатошарові матеріали. Для боротьби з впливом іонізуючого випромінювання можна використати новітній, що полягає в захисному покритті на поверхнях даних елементів, які опромінюються покриттям з включенням атомів рідкоземельних елементів, введених в структуру армованої атомно-молекулярної захисної металічної матриці. Аналізуючи вищенаведені розрахунки, можна зробити висновок, що електричні кола оптико-електронного радіотехнічного пристрою будуть зберігати працездатність при значеннях іонізуючих випромінювань від 0 до $6,51 \cdot 10^5$ Рад/с. Найкращим серед заходів по підвищенню стійкості роботи приймального пристрою від дії ЕМІ є повне укриття апаратури

у екранованому металевим екраном приміщені. Але він може експлуатуватись на транспортних засобах, то бажані інші заходи по захисту, такі як струмопровідні сітки та плівкові покриття вікон, стільникові металічні конструкції для повітрозбірників та вентиляційних отворів і контактні пружинні прокладки, що розміщуються по периметру дверей і люків. Для захисту від проникнення електромагнітного імпульсу в апаратуру через різні кабельні вводи використовується перехід до волоконно-оптичних систем зв'язку, на які практично не має вплив ЕМІ. Також для захисту кабельних вводів є встановлення в конструкції вбудованих зенерівських діодів. Досить важливе значення має захист вводів до споруд таких як: електричних лінії зв'язку включаючи електромережу, водопровідні й опалювальні труби, по яким можливе проникнення наведеного ЕМІ. При оцінці стійкості роботи оптико-електронного радіотехнічного пристрою було визначено, що безпечна робота його можлива при умові $E_v \leq 0,25$ В/м.

Отже при дії іонізуючих випромінювань граничне значення, при якому пристрій зберігає робочий стан, становить $P_{\text{гран}} = 6,51 \cdot 10^5$ Рад/с, а в умовах дії ЕМІ вертикальна складова напруженості електричного поля, при якій пристрій ще здатен працювати, складає $E_v = 0,25$ В/м.

6.4 Висновки до розділу

В результаті виконання даного розділу було опрацьовано такі питання охорони праці і безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення опроміненості роговиці ока при прямому лазерному випромінюванні, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором, безпека в надзвичайних ситуаціях.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи були отримані комплексні знання, достатні для розробки НВЧ пристроїв на основі новітніх радіотехнічних наноелектронних приладів, на базі яких можна побудувати комплекс будь-якої складності і сфери використання. Загалом магістерська кваліфікаційна робота складається з трьох частин, які в цілому повністю охоплюють необхідну інформацію про функціонування і принцип побудови радіотехнічних наноелектронних приладів на основі квантових ям.

У першій частині наведена інформація про фізичні основи напівпровідникових квантових наноструктур. Це дає можливість отримати відомості про будову, принцип роботи, переваги та недоліки структур із квантовим обмеженням за рахунок внутрішнього та/або зовнішнього електричного поля.

У другій частині наведена інформація про напівпровідникові лазери та основні параметри сучасних розробок. Це дає можливість отримати відомості про структуру, принцип роботи, переваги та недоліки даних лазерів.

Напівпровідникові лазери забезпечують найкращу сумісність із мікроелектронними пристроями. Найпоширеніші інжекційні лазери, лазерне активне середовище в яких виникає в результаті інжекції вільних носіїв заряду р-п переходу. Перспективні також напівпровідникові лазери з електронним накачуванням, у яких генерація когерентного випромінювання відбувається в процесі впливу на напівпровідника потоку електронів високої енергії. В інжекційних лазерах використовуються люмінесцентні напівпровідники із прямими переходами, обмін носіями в яких між мінімумом зони провідності і валентною зоною характеризується високою ймовірністю.

У третій частині наведена інформація про фотодетектори на основі квантових ям. Це дає можливість отримати відомості про структуру, принцип роботи, переваги та недоліки таких пристроїв.

Розроблення та дослідження оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором здійснено у четвертому розділі. Отримано

результати модельного дослідження амплітудно-частотних спектрів радіотехнічного оптико-електронного пристрою на основі RTD-PD-LD технології з одним і двома колами зворотного зв'язку.

В економічній частині проведено розрахунок ефективності інвестицій та терміну окупності коштів, вкладених в наукову розробку логічних радіоімпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором. Термін окупності інвестицій, що вкладені у реалізацію цього наукового проекту, складає 4,5 роки.

У розділі охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях були опрацьовані такі питання, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення опроміненості роговиці ока при прямому лазерному випромінюванні, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором, безпека в надзвичайних ситуаціях.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Осадчук В.С. Основи функціональної мікроелектроніки. Навчальний посібник. / В.: ВДТУ, 1998 – 245 с. Укр. Мовою
2. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Фізична наноелектроніка. –Вінниця: ВНТУ, 2015. – 146 с.
3. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Основи наноелектроніки. –Вінниця: ВНТУ, 2016. – 199 с.
4. Полупроводниковые гетероструктуры: гетеропереход. Учебно-методическое пособие. /Сост. П.А. Шиляев, Д.А. Павлов. – Н.Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2009. – 18 с.
5. Щука А.А. Наноэлектроника. М.: Физматкнига, 2007. - 464 с.
6. Мартинес-Дуарт Дж. М., Мартин-Пальма Р. Дж., Агулло-Руеда Ф. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники. – М.: Техносфера, 2007. – 368 с.
7. Ч. Пул-мл., Ф. Оуенс. Нанотехнологии.-М.: Техносфера, 2007. – 376 с.
8. Алферов Ж.И., и др. Наноматериалы и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2003. №8, с 3 – 13.
9. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы наноэлектроники. Новосибирск: Изд. НГТУ, 2004. – 496 с.
10. Суздальев И.П., Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – М.: КомКнига, 2006. – 592 с.
11. Базовые лекции по электронике, Том 1. Электровакуумная, плазменная и квантовая электроника. – М.: Техносфера, 2009. – 480 с.
12. Семенов А. О., Дячук Є. О., Мельник Я. В., Шейко Є. О. Радіотехнічні надвисокочастотні генераторні пристрої на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором. Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)», м. Вінниця, 14-16 листопада 2019 року. – Вінниця: ВНТУ, 2019. – С. 126-127.
13. Семенов А. О., Мельник Я. В., Дячук Є. О., Шейко Є. О. Оптико-електронні радіотехнічні пристрої на основі резонансно-тунельних напівпровідникових

- структур із від'ємним диференційним опором. Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми інфокому-нікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)», м. Вінниця, 14-16 листопада 2019 року. – Вінниця: ВНТУ, 2019. – С. 128-129.
14. Семенов А. О., Шейко Є. О., Мельник Я. В., Дячук Є. О. Логічні радіоімпульсні пристрої на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором. Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми інфокому-нікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)», м. Вінниця, 14-16 листопада 2019 року. – Вінниця: ВНТУ, 2019. – С. 130-131.
15. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 2000. – 423 с.
16. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. М.: Высшая школа, 2001. – 383 с.
17. Алферов Ж.И. Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии. УФН, 172(9), 2002 – стр. 1068-1086.
18. Sentaurus TCAD User Guide, Synopsys, <http://www.synopsys.com> (2010).
19. Матюхин С.И., Козил З.Ж. Зависимость характеристик полупроводникового ДГС РО лазера на основе AlGaAs от ширины квантоворазмерной активной области. Наноинженерия. №5, 2012 – стр.14-17.
20. Z. Koziol, Quantum-well states and discontinuities in opto-electrical characteristics of SCH lasers, Preprint arXiv:1112.0139v1 [cond-mat.mtrl-sci] 2011.
21. A.V. Andreev, A.Y. Leshko, A.V. Lyutetskiy, A.A. Marmalyuk, T.A. Nalyot, A.A. Padalitsa, N.A. Pikhtin, D.R. Sabitov, V.A. Simakov, S.O. Slipchenko, M.A. Khomylev, I.S. Tarasov, Semiconductors, 40(5), 2006. – с. 628.
22. A.Yu. Andreev, S.A. Zorina, A.Yu. Leshko, A.V. Lyutetskiy, A.A. Marmalyuk, A.V. Murashova, T.A. Nalet, A.A. Padalitsa, N.A. Pikhtin, D.R. Sabitov, V.A. Simakov, S.O. Slipchenko, K.Yu. Telegin, V.V. Shamakhov, I.S. Tarasov, Semiconductors, 43(4), 2009. – с. 543-547.
23. Electronic states and optical transitions in semiconductor heterostructures. Fedor T. Vasko, Alex V. Kuznetsov. N-Y, Springer, 1998.

24. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике. Отв. редактор А. Л. Асеев. Новосибирск. Издательство СО РАН, 2004.
25. Рогальский А. Инфракрасные детекторы /А. Рогальский; Пер. с англ. А.В. Войцеховский, С.Н. Несмелов, А.Г. Коротаев. Новосибирск. Наука. 2003.
26. Верещагин И.К., Косяченко Л.А., Кокин С.М. Введение в оптоэлектронику. – М.: Высшая школа. – 1991. – 140 с.
27. <http://www.rmcoax.com/>
28. <http://radioseminar.omsu.ru/> Омский научный семинар «Современные проблемы радиофизики и радиотехники»/ Микроволновая фотоника: экспериментальное определение электрических параметров волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) в диапазоне СВЧ. – 2011.
29. <http://porto.polito.it/1400870/1/1400870.pdf>
30. http://ndo.sibsutis.ru/magistr/courses_work/vosp_work/lec4.htm
31. T. Erneux, Applied Delayed Differential Equations. New York: Springer-Verlag, 2009.
32. X. Y. Yao and L. Maleki. Optoelectronic oscillator for photonic systems. IEEE J. Quantum Electron., vol. 32, no. 7, pp. 1141–1149, Jul. 1996.
33. K. Ikeda and K. Matsumoto. High-dimensional chaotic behavior in systems with time-delayed feedback. Phys. D, vol. 29, nos. 1–2, pp. 223–235, 1987.
34. T. E. Murphy, A. B. Cohen, B. Ravoori, K. R. B. Schmitt, A. V. Setty, F. Sorrentino, C. R. S. Williams, E. Ott, and R. Roy. Complex dynamics and synchronization of delayed-feedback nonlinear oscillators. Phil. Trans. Royal Soc. A, vol. 368, pp. 368–343, Feb. 2010.
35. K. E. Callan, L. Illing, Z. Gao, D. J. Gauthier, and E. Scholl. Broadband chaos generated by an optoelectronic oscillator. Phys. Rev. Lett., vol. 104, no. 11, pp. 113901-1–113901-4, 2010.
36. L. Illing, D. J. Gauthier, and R. Roy. Controlling optical chaos, spatiotemporal dynamics, and patterns. Adv. Atomic, Molecular, Opt. Phys., vol. 54, pp. 615–697, Mar. 2006.

- 37.M. Peil, M. Jacquot, Y. K. Chembo, L. Larger, and T. Erneux. Routes to chaos and multiple time scale dynamics in broadband bandpass nonlinear delay electro-optic oscillators. *Phys. Rev. E*, vol. 79, no. 2, pp. 045201-1–045201-15, 2009.
- 38.S. Tang and J. M. Liu. Chaotic pulsing and quasi-periodic route to chaos in a semiconductor laser with delayed opto-electronic feedback. *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 37, no. 3, pp. 329–336, Mar. 2001.
- 39.R. Lang and K. Kobayashi. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties. *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 16, no. 3, pp. 347–355, Mar. 1980.
- 40.B. Dahmani, L. Hollberg, and R. Drullinger. Frequency stabilization of semiconductor-lasers by resonant optical feedback. *Opt. Lett.*, vol. 12, no. 11, pp. 876–878, 1987.
- 41.J. Mork, B. Tromborg, and J. Mark. Chaos in semiconductor lasers with optical feedback: Theory and experiment. *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 28, no. 1, pp. 93–108, Jan. 1992.
- 42.L. Maleki, D. Eliyahu, and A. B. Matsko. Optoelectronic oscillator. *Broadband Optical Modulators: Science, Technology, and Applications*, A. Chen and E. Murphy, Eds. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011, pp. 467–488.
- 43.X. S. Yao and L. Maleki. Multiloop optoelectronic oscillator. *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 36, no. 1, pp. 79–84, Jan. 2000.
- 44.J.-Y. Kim, J.-H. Jo, W.-Y. Choi, and H.-K. Sung. Dual-loop dualmodulation optoelectronic oscillators with highly suppressed spurious tones. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 24, no. 8, pp. 7706–7708, Apr. 2012.
- 45.W. Zhou, O. Okusaga, C. Nelson, D. Howe, and G. Carter. 10 GHz dual loop opto-electronic oscillator without RF-amplifiers. *Proc. SPIE, Optoelectron. Integr. Circuits X*, vol. 6897, p. 68970Z, Feb. 2008.
- 46.E. Shumakher, T. Magrisso, S. Kraus, D. C. Elias, A. Gavrilov, S. Cohen, G. Eisenstein, and D. Ritter. An InP HBT-based oscillator monolithically integrated with a photodiode. *J. Lightw. Technol.*, vol. 26, no. 15, pp. 2679–2683, Aug. 2008.

47. B. Romeira, K. Seunarine, C. N. Ironside, A. E. Kelly, and J. M. L. Figueiredo. A self-synchronized optoelectronic oscillator based on an RTD photo-detector and a laser diode. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 23, no. 16, pp. 1148–1150, Aug. 2011.
48. B. Romeira, J. M. L. Figueiredo, T. J. Slight, L. Wang, E. Wasige, C. N. Ironside, A. E. Kelly, and R. Green. Nonlinear dynamics of resonant tunneling optoelectronic circuits for wireless/optical interfaces. *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 45, no. 11, pp. 1436–1445, Nov. 2009.
49. B. Romeira, J. M. L. Figueiredo, C. N. Ironside, A. E. Kelly, and T. J. Slight. Optical control of a resonant tunneling diode microwavphotonic oscillator. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, no. 21, pp. 1610–1612, Nov. 2010.
50. T. Ramond, L. Hollberg, P. W. Juodawlkis, and S. D. Calawa. Lownoise optical injection locking of a resonant tunneling diode to a stable optical frequency comb. *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 17, pp. 171124-1–171124-3, Apr. 2007.
51. A. J. Seeds and K. J. Williams. Microwave photonics. *J. Lightw. Technol.*, vol. 24, no. 12, pp. 4628–4641, Dec. 2006.
52. J. M. L. Figueiredo, C. N. Ironside, and C. R. Stanley. Electric field switching in a resonant tunneling diode electroabsorption modulator. *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 37, no. 12, pp. 1547–1552, Dec. 2001.
53. M. Feiginov, C. Sydlo, O. Cojocari, and P. Meissner. Resonant tunneling-diode oscillators operating at frequencies above 1.1 THz. *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99, no. 23, pp. 233506-1–233506-3, 2011.
54. J. M. L. Figueiredo, B. Romeira, T. J. Slight, and C. N. Ironside. Resonant tunneling optoelectronic circuits. in *Advances in Optical and Photonic Devices*, K. Y. Kim, Ed. Rijeka, Croatia: InTech, 2010.
55. T. J. Slight, B. Romeira, L. Wang, J. M. L. Figueiredo, E. Wasige, and C. N. Ironside. A Liénard oscillator resonant tunnelling-laser diode hybrid integrated circuit: Model and experiment. *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 44, no. 12, pp. 1158–1163, Dec. 2008.

56. J. N. Schulman, H. J. De Los Santos, and D. H. Chow. Physics-based RTD current-voltage equation. *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 17, no. 5, pp. 220–222, May 1996.
57. I. J. S. Coelho, J. F. Martins-Filho, J. M. L. Figueiredo, and C. N. Ironside. Modeling of light-sensitive resonant-tunneling-diode devices. *J. Appl. Phys.*, vol. 95, no. 12, pp. 8258–8263, 2004.
58. Y. H. Kao and H. T. Lin. Persistent properties of period doubling in directly modulated semiconductor lasers. *Phys. Rev. A*, vol. 48, no. 3, pp. 2292–2298, 1993.
59. C. W. Gardiner, *Handbook of Stochastic Methods*, H. Haken, Ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1985.
60. W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *The Art of Scientific Computing*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2007.
61. J. W. Eaton, *GNU Octave Manual*. Surrey, U.K.: Network Theory Publishing, 2002.
62. A.2 Mex-Files (2010) [Online]. Available: http://www.gnu.org/software/octave/doc/interpreter/Mex_002dFiles.html
63. N. V. Alkeev, V. E. Lyubchenko, C. N. Ironside, J. M. L. Figueiredo, and C. R. Stanley. Current noise in resonance tunnel diodes based on InGaAlAs heterostructures. *J. Commun. Technol. Electron.*, vol. 47, no. 2, pp. 228–231, 2002.
64. A. Prasadka, K. J. Webb, D. B. Janes, H. C. Liu, and Z. R. Wasilewski. Microwave measurement of shot noise in resonant tunneling diodes. *Appl. Phys. Lett.*, vol. 71, no. 4, pp. 530–532, 1997.
65. G. Iannaccone, G. Lombardi, M. Macucci, and B. Pellegrini. Enhanced shot noise in resonant tunneling: Theory and experiment. *Phys. Rev. Lett.*, vol. 80, no. 5, pp. 1054–1057, 1998.
66. W. Liang, V. S. Ilchenko, A. A. Savchenkov, A. B. Matsko, D. Seidel, and L. Maleki. Whispering-gallery-mode-resonator-based ultranarrow linewidth external-cavity semiconductor laser. *Opt. Lett.*, vol. 35, no. 16, pp. 2822–2824, 2010.
67. T. McClelland, C. Stone, and M. Bloch. 100 MHz crystal oscillator with extremely low phase noise. *Proc. IEEE Int. Freq. Control Symp. Freq. Time Forum*, vol. 1. Dec. 1999, pp. 331–334.

68. M. Regis, O. Llopis, B. Van Haaren, R. Plana, A. Gruhle, J. Rayssac, and J. Graffeuil. Ultralow phase noise C and X band bipolar transistors dielectric resonator oscillators. Proc. IEEE Int. Freq. Control Symp., vol. 1. May 1998, pp. 507–511.
69. Козловський В. О., Лесько О. Й. Бізнес-планування: Навчальний посібник / В. О. Козловський, О. Й. Лесько [2-е вид., доп. та переробл.] – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, ВНТУ, 2008. – 241 с.
70. Козловський В. О. Інноваційний менеджмент : Навчальний посібник / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 210 с.
71. ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
72. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
73. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.
74. Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.
75. ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
76. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої та загальної вібрацій.
77. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
78. Методичні вказівки до опрацювання розділу "Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях" в дипломних проектах і роботах студентів спеціальностей, що пов'язані з функціональною електронікою, автоматизацією та управлінням / Уклад. О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 64 с.
79. ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К. : Держнаглядохоронпраці, 1998. – 382 с.
80. ДБН В.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.
81. ДБН В.1.1.7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва.
82. НАПБ Б.03.001-2004. Типові норми належності вогнегасників.

83.СНиП 2.09.02-85. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений.

84.СанПиН 5804-91. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров.

Додаток А
(обов'язковий)
ВНТУ

ПОГОДЖЕНО

“ ___ ” _____ 2019 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри РТ ВНТУ,
докт. техн. наук, професор
О.В. Осадчук

“ ___ ” _____ 2019 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи
«Оптико-електронні радіотехнічні пристрої на основі резонансно-тунельних
напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором»
08-36.МКР.006.00.000 ТЗ

Керівник роботи

д.т.н., проф., проф. кафедри РТ ВНТУ
_____ Осадчук В. С.

Виконавець: ст. гр. РТ-18м

_____ Мельник Я. В.

Вінниця-2019

1 ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету № 254 « 02 » 10 2019 р. та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: “ 02 ” вересня 2019 р.

Дата закінчення: “17” грудня 2019 р.

2 МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Метою роботи є розроблення та дослідження оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференціальним опором.

Задачами дослідження є:

- розробка оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференціальним опором;
- комп’ютерне схемотехнічне моделювання оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференціальним опором;
- розрахунок електричних параметрів оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференціальним опором;
- дослідження часових характеристик оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференціальним опором;
- проведення розрахунків економічної частини та розділу охорони праці.

Об’єктом дослідження даної роботи є фізичні явища та ефекти, що відбуваються в тунельно-резонансних транзисторах та елементах функціональної електроніки, дія яких базується на тунельно-резонансному ефекті.

Предметом дослідження є часові та частотні параметри і характеристики сигналів тунельно-резонансних транзисторів, як елементів функціональної електроніки, дія яких базується на тунельно-резонансному ефекті.

3 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ МКР

Джерела розробки:

1. Осадчук В.С. Основи функціональної мікроелектроніки. Навчальний посібник. / В.: ВДТУ, 1998 – 245 с. Укр. Мовою
2. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Фізична наноелектроніка. –Вінниця: ВНТУ, 2015. – 146 с.
3. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Основи наноелектроніки. –Вінниця: ВНТУ, 2016. – 199 с.
4. Полупроводниковые гетероструктуры: гетеропереход. Учебно-методическое пособие. /Сост. П.А. Шилиев, Д.А. Павлов. – Н.Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2009. – 18 с.
5. Щука А.А. Нанoeлектроника. М.: Физматкнига, 2007. - 464 с.
6. Мартинес-Дуарт Дж. М., Мартин-Пальма Р. Дж., Агулло-Руеда Ф. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники. – М.: Техносфера, 2007. – 368 с.
7. Ч. Пул-мл., Ф. Оуенс. Нанотехнологии.-М.: Техносфера, 2007. – 376 с.
8. Алферов Ж.И., и др. Наноматериалы и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2003. №8, с 3 – 13.
9. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы нанoeлектроники. Новосибирск: Изд. НГТУ, 2004. – 496 с.
10. Суздальев И.П., Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – М.: КомКнига, 2006. – 592 с.
11. Базовые лекции по электронике, Том 1. Электровакуумная, плазменная и квантовая электроника. – М.: Техносфера, 2009. – 480 с.
12. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 2000. – 423 с.
13. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. М.: Высшая школа, 2001. – 383 с.

14. Козловський В. О., Лесько О. Й. Бізнес-планування: Навчальний посібник / В. О. Козловський, О. Й. Лесько [2-е вид., доп. та переробл.] – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, ВНТУ, 2008. – 241 с.
15. Козловський В. О. Інноваційний менеджмент : Навчальний посібник / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 210 с.
16. ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
17. Березюк О. В. Охорона праці. Підсумкова державна атестація спеціалістів, магістрів в галузях електроніки, радіотехніки, радіоелектронних апаратів та зв'язку : навчальний посібник / О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 104 с.

4 ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра радіотехніки, студент групи РТ-18м Мельник Я. В.

5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Здійснити аналіз тунельно-резонансного ефекту. Основну увагу приділити фізичному механізму тунельно-резонансного ефекту, параметрам характеристикам тунельно-резонансних діодів. Розробити та дослідити нові функціональні пристрої на основі тунельно-резонансного ефекту.

Основними вимогами є:

– теоретично та модельно дослідити оптико-електронні радіотехнічні пристрої на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором;

Вихідні дані для розрахунку:

- центральна частота генерації радіосигналів – 1,12 ГГц із вихідною потужністю 0,3 мВт (1,45 дБм);
- коефіцієнт корисної дії 7,5%;
- струм живлення 15 мА при напрузі живлення 0,8 В.

6. ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
1.	Огляд літературних джерел. Вибір та узгодження теми МКР	02.09.2019	15.09.2019	Проведено огляд літературних джерел. Вибрана тема	Узгодження теми МКР по кафедрі РТ
2.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	16.09.2019	22.09.2019	Проведений аналіз літературних джерел по даній тематиці. Підготовлений матеріал основних розділів	Вступ
3.	Затвердження теми. Розробка технічного завдання	23.09.2019	02.10.2019	Розроблене ТЗ	Наказ ВНТУ про затвердження тем Додаток А
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми	03.10.2019	20.10.2019	Проведений аналіз. Розроблені схеми пристрою	Вступ Розділ 1- 2 Звіт по переддипломній практиці
5.	Електричні розрахунки. Експериментальне дослідження	21.10.2019	29.10.2019	Проведені розрахунки та дослідження	Розділ 3
6.	Розділ моделювання	30.10.2019	03.11.2019	Проведено моделювання	Результати моделювання
7.	Розробка графічної частини МКР	04.11.2019	10.11.2019	Плакати. Структурні та електричні схеми	Графічна частина
8.	Аналіз економічної ефективності розробки	11.11.2019	15.11.2019	Економічна частина	Розділ 4
9.	Охорона праці (ОП)	16.11.2019	22.11.2019	Частина БЖД	Розділ 5
10.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	23.11.2019	27.11.2019	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина
11.	Нормоконтроль	28.11.2019	29.11.2019	Підпис нормоконтроля	Оформлена ПЗ та графічна частина
12.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР	02.12.2019	06.12.2019	Позитивні відзиви	Відзив. Рецензія
13.	Захист МКР ЕК	09.12.2019	17.12.2019	Позитивний захист	Протокол ЕК

7 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

У результаті виконання роботи будуть розроблені:

- електричні схеми оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором;
- результати теоретичних досліджень параметрів і характеристик оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором;
- результати розрахунків елементів схем і проектування оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором;
- результати комп'ютерного моделювання параметрів і характеристик оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором;
- економічна частина МКР, розділ охорони праці та цивільного захисту.

Результати, отримані в процесі виконання даної роботи, будуть впроваджені в галузі радіовимірювань:

- Вінницька філія державного концерну РРТ;
- ПАТ “Укртелеком”.

Очікуваний техніко-економічний ефект. При впровадженні результатів досліджень очікується підвищення точності та розширення функціональних можливостей обладнання радіотехнічних і телекомунікаційних систем із використанням надвисокочастотних оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором.

8 МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ПОДАЮТЬ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ ТА ПІД ЧАС ЕТАПІВ

За результатами виконання МКР до ЕК подаються пояснювальна записка, графічна частина МКР, відзив і рецензія.

9 ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ МКР ТА ЇЇ ЕТАПІВ

Поетапно результати виконання МКР розглядаються керівником роботи та обговорюються на засіданні кафедри.

Захист магістерської кваліфікаційної роботи відбувається на відкритому засіданні ЕК.

10 ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Документація, що розробляється в процесі виконання досліджень повинна містити:

- техніко-економічне обґрунтування розробки;
- електричні схеми оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- результати чисельних обрахунків і теоретичних досліджень оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- результати комп'ютерного моделювання параметрів і характеристик оптико-електронних радіотехнічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- економічну частину та розділ БЖД і ЦЗ.

11 ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

У зв'язку з тим, що інформація не є конфіденційною, заходи з її технічного захисту не передбачаються.

Додаток Б
(обов'язковий)

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ РАДІОТЕХНІЧНІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ
РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ІЗ
ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Структурна та функціональна схеми радіотехнічного оптико-електронного пристрою на основі RTD-PD-LD технології

Структурна та функціональна схеми радіотехнічного оптико-електронного пристрою на основі RTD-PD-LD технології

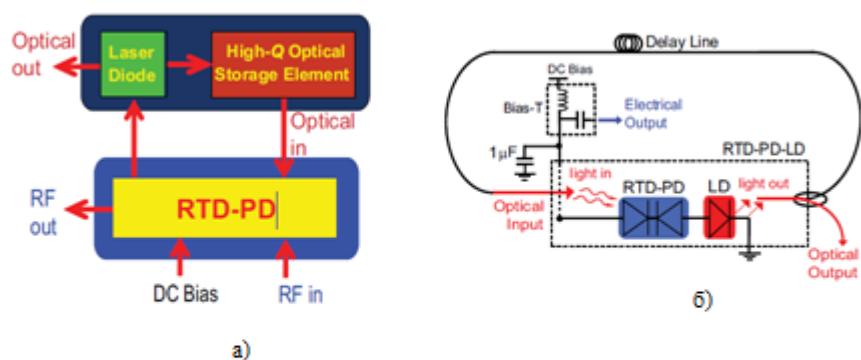


Рисунок Б.1 – Структурна (а) та функціональна (б) схеми одноконтурного оптико-електронного генератора на основі резонансно-тунельного діода RTD-OEO

Додаток В
(обов'язковий)

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ РАДІОТЕХНІЧНІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ
РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ІЗ
ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Будова та характеристики радіотехнічного оптико-електронного пристрою на
основі RTD-PD-LD технології

Будова та характеристики радіотехнічного оптико-електронного пристрою на основі RTD-PD-LD технології

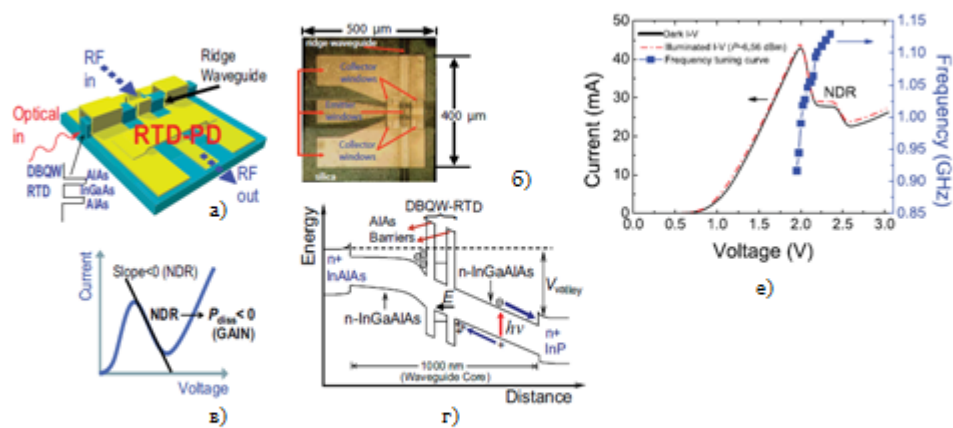


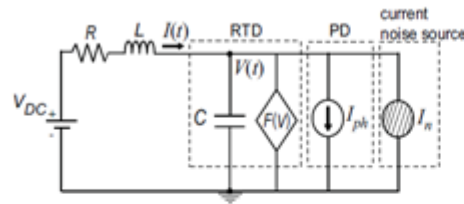
Рисунок В.1 – Будова та характеристика радіотехнічного оптико-електронного пристрою на основі RTD-PD-LD: а) 3D вигляд конструкції; б) вигляд смужкової топології; в) вольтамперна характеристика резонансно-тунельного діода; д) зонна діаграма енергетичних рівнів резонансно-тунельного діода; е) темно-світлові ВАХ пристрою RTD-PD послідовно з LD (у області NDR показана відповідна крива перебудови частоти в умовах освітлення, яка також залежить від напруги зсуву та струму живлення)

Додаток Д
(обов'язковий)

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ РАДІОТЕХНІЧНІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ
РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ІЗ
ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Фізико-математична модель RTD-PD-LD

Фізико-математична модель RTD-PD



$$V(t) = \frac{1}{C} [I(t) - F(V) - I_n - I_{ph}] \quad (\text{Д.1})$$

$$I(t) = \frac{1}{L} [V_{DC} - RI(t) - V(t)] \quad (\text{Д.2})$$

$$I_{ph} = \eta_{ph} \frac{e\lambda}{hc} P(\lambda) \quad (\text{Д.3})$$

$$\eta_{ph} = k(1 - R_{ref})(1 - e^{-\alpha_w L}) \quad (\text{Д.4})$$

Рисунок Д.1 – Еквівалентна електрична схема RTD-PD-LD

Таблиця Д.1 – Фізичні параметри електричного кола і фотодетектора RTD-PD

Символ	Значення	Типова чисельна величина
R	Опір	7,8 Ом
L	Індуктивність	$3,1 \times 10^{-9}$ Гн
C	Ємність	$3,25 \times 10^{-12}$ Ф
λ	Розрахункова довжина хвилі	$1,55 \times 10^{-6}$ м
k	Коефіцієнт легкого зв'язку	0,35
R_{ref}	Відбивна властивість хвилеводу	0,3
α_w	Коефіцієнт поглинання хвилеводу	400 см^{-1}
γ_{eh}	Інтеграл перекриття електричного і оптичного поля	0,25
L	Довжина контакту хвилеводу	150×10^{-6} м

Додаток Е
(обов'язковий)

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ РАДІОТЕХНІЧНІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ
РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ІЗ
ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Математична модель RTD-PD-LD у нормованих змінних

Математична модель RTD-PD-LD у нормованих змінних

Рівняння нормованих змінних і коефіцієнтів $\dot{x}(t) = \frac{1}{\mu} [y(t) - f(t) - \gamma \dot{\xi}(t) - \eta s(t - \tau_d)]$ (E.1)

$V(t) = x(t) V_0$
 $I(t) = y(t) I_0$
 $t = \tau (\omega_0)^{-1}$
 $V_{DC} = v_0 V_0$
 $\omega_0 = (\sqrt{LC})^{-1}$
 $R = \gamma (V_0/I_0)$

 $y(t) = \mu [v_0 - \gamma y(t) - x(t)]$ (E.2)

$\dot{n}(t) = \frac{1}{\tau_n'} \left[\frac{i_m(t)}{i_0} - n(t) - \frac{n(t) - \delta}{1 - \delta} \{1 - \varepsilon s(t)\} s(t) \right]$ (E.3)

$\dot{s}(t) = \frac{1}{\tau_s'} \left[\frac{n(t) - \delta}{1 - \delta} \{1 - \varepsilon s(t)\} s(t) - s(t) + \beta n(t) \right]$ (E.4)

Таблиця Е.1 - Параметри використані для моделювання RTD-PD-LD

Символ	Значення	Типова чисельна величина
μ	$V_0/I_0\sqrt{C/L}$	$3,238 \times 10^{-2}$
γ	$R (V_0/I_0)$	7,8
τ_n'	Термін служби безрозмірного носія	0,30578
τ_s'	Термін служби безрозмірного носія	0,01395
δ	N_0/N_m	0,813
ε	$\varepsilon_s S_0$ (безрозмірна насиченість лазера)	$1,72 \times 10^{-3}$
β	Спонтанна емісія	4×10^{-4}

Додаток Ж
(обов'язковий)

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ РАДІОТЕХНІЧНІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ
РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ІЗ
ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Результати модельних досліджень радіотехнічного оптико-електронного пристрою на основі RTD-PD-LD технології з одним колом зворотного зв'язку

Результати модельних досліджень радіотехнічного оптико-електронного пристрою на основі RTD-PD-LD технології з одним колом зворотного зв'язку

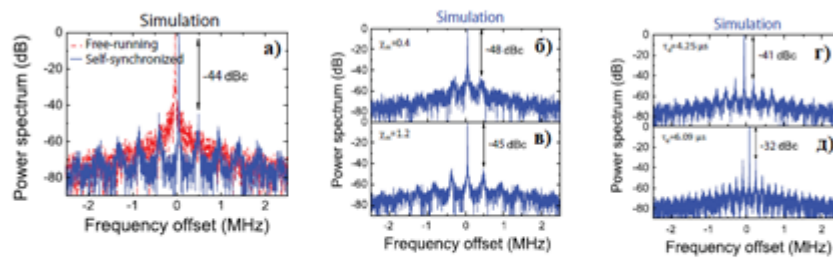


Рисунок Ж.1 – Амплітудно-частотні спектри модельованої потужності генерованих електричних коливань і само-синхронізованих виходів $x(t)$ з часовою затримкою $\tau_{ij} = 2,35$ мкс і відношенням сигналу зворотного зв'язку до шуму $\theta = 2,0$ (а), $\theta = 0,4$ (б), $\theta = 0,8$ (з), $\theta = 1,2$ (р), $\theta = 1,6$ (д). На графіку розмах по осі абсцис становить 5 МГц, а центральна частота становить 1,12207 ГГц

Додаток К
(обов'язковий)

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ РАДІОТЕХНІЧНІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ
РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ІЗ
ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Результати модельних досліджень радіотехнічного оптико-електронного пристрою на основі RTD-PD-LD технології з двома колами зворотного зв'язку

Результати модельних досліджень радіотехнічного оптико-електронного пристрою на основі RTD-PD-LD технології з двома колами зворотного зв'язку

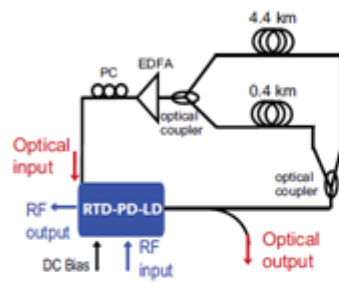


Рисунок К.1 - Функціональна схема двовентурної самосинхронізованої установки RTD-PD-LD

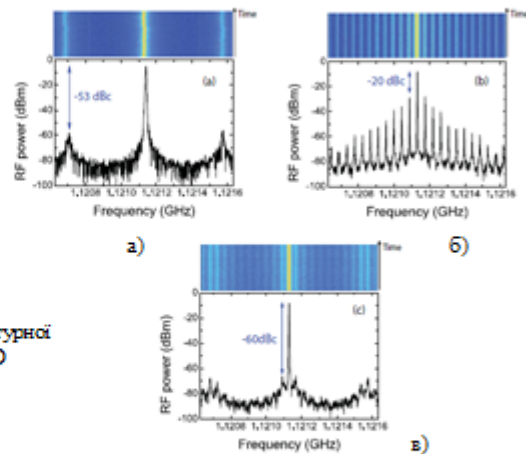


Рисунок К.2 – Вигляд спектрів ВЧ-потужності : (а) 0,4-кілометрова одиночна петля; (б) 4,4 км одиночної петлі; (в) двовентурна конфігурація. Діапазон частот і дозвіл смуги пропускання було 1 МГц і 3 кГц, відповідно. Верхня частина кожного рисунка показує спектрограму, яка представляє еволюцію спектральної щільності, записаної за 1 хв (час по вертикальній осі)