



## Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв  
(повна назва)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 171 Електроніка  
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Електронні прилади та пристрої»  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри МЕЕПІ

\_\_\_\_\_ Ігор БОНДАРЕНКО  
(підпис)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20 25 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Григорову Єгору Юрійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Квантово-каскадний лазер середнього інфрачервоного діапазону»

затверджена наказом університету від 24 листопада 2025 р. № 1056 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 13 \_\_\_\_\_ 12 \_\_\_\_\_ 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи

3.1 Квантово-каскадний лазер на основі надрешітки;

3.2 Матеріал наноструктури – арсенід галію/алюміній – галій арсенід;

3.3 Ширина квантово-обсежених шарів – 20 ангстрем;

3.4 Ширина розділювальних бар'єрів – 8 ангстрем.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Розглянути та порівняти основні джерела випромінювання фотоніки.

4.2 Квантоворозмірні структури для середнього інфрачервоного діапазону.

4.3 Напівпровідниковий лазер з використанням періодичної послідовності гетероструктур квантовою розмірною структурою.

4.4 Розглянути характерні властивості квантово-каскадних джерел випромінювання на прикладі конкретної структури.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних

ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)  
Слайд-презентація 15...20 аркушів,

---



---



---



---



---



---



---



---



---



---

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	12.10.2025	
2	Проведення теоретичних досліджень	15.10.2025	
3	Інжекційні напівпровідникові лазери на основі квантових розмірних структур	18.10.2025	
4	Дослідження ККЛ для ІЧ діапазону	27.10.2025	
5	Генерація оптичного випромінювання у ККЛ з різними варіантами наноструктур	07.11.2025	
6	Аналіз результатів моделювання	13.11.2025	
7	Оформлення та редагування пояснювальної	15.11.2025	
8	Підготовка презентації та графічного матеріалу	04.12.2025	
9	Подача роботи в екзаменаційну комісію	13.12.2025	

Дата видачі завдання 29 вересня 2025 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

доцент каф. МЕЕПШ. Галат О. Б.  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 54 сторінки, 21 рисунок, 3 таблиці, 19 джерел.

ГЕТЕРОЛАЗЕР, ПОТЕНЦІЙНА ЯМА, ПОТЕНЦІЙНИЙ БАР'ЄР,  
ЕНЕРГЕТИЧНИЙ СТАН, НАНОСТРУКТУРА, ГЕНЕРАЦІЯ  
ВИПРОМІНЮВАННЯ, КВАНТОВИЙ КАСКАД

Об'єкт дослідження – напівпровідниковий квантово-каскадний лазер інфрачервоного діапазону.

Мета роботи – вибрати тип наноструктури для реалізації квантового каскаду в випромінювальній зоні напівпровідникового лазера.

Метод дослідження – математичне моделювання розподілу квантових станів у багатошарових квантових розмірних структурах різних конструкцій, вибір оптимальної конфігурації послідовності, розмірів та матеріалів шарів для побудови квантово-каскадної випромінювальної структури .

Актуальність теми роботи пов'язана з тим, що напівпровідниковий квантово-каскадний лазер є одним з найбільш перспективних напрямків еволюції напівпровідникових лазерів. Впровадження квантово-каскадних лазерів замість звичайних дозволяє суттєво поліпшити параметри оптичних випромінювачів інфрачервоного діапазону.

## ABSTRACT

Explanatory note: 54 pages, 21 figures, 3 tables, 19 references.

HETEROLASER, POTENTIAL WELL, POTENTIAL BARRIER, ENERGY STATE, NANOSTRUCTURE, RADIATION GENERATION, QUANTUM CASCADE

The object of research is a semiconductor quantum cascade laser in the infrared range.

The aim of the work is to select the type of nanostructure for the implementation of a quantum cascade in the emission zone of a semiconductor laser.

The research method is mathematical modeling of the distribution of quantum states in multilayer quantum dimensional structures of various designs, selection of the optimal configuration of the sequence, dimensions, and materials of the layers for constructing a quantum cascade emitting structure.

The relevance of the topic is related to the fact that the semiconductor quantum cascade laser is one of the most promising areas of evolution of semiconductor lasers. The introduction of quantum cascade lasers instead of conventional ones allows for a significant improvement in the parameters of infrared optical emitters.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	8
ВСТУП.....	9
<b>1 КВАНТОВО- КАСКАДНИЙ ЛАЗЕР</b>	<b>ПОМИЛКА! ЗАКЛАДКУ НЕ</b>
<b>ВИЗНАЧЕНО.</b>	
1.1 Квантові ями та процеси у квантово-каскадних лазерах.....	11
1.2 Побудова квантових каскадних лазерів.....	13
1.3 Структура ядра лазера.....	<b>Помилка! Закладку не визначено.</b>
1.4 Особливості роботи квантово-каскадного лазера .....	17
1.5 Хвилеводні шари у структурі квантово-каскадного лазера.....	18
1.6 Області застосування квантових каскадних лазерів .....	19
1.7 Каскадні лазери в системах бездротового зв'язку. ....	19
1.8 Каскадні лазери в системах виявлення газів .....	21
1.9 Каскадні лазери в медичному застосуванні.....	24
1.10 Застосування ККЛ в середньому інфрачервоному діапазоні.....	27
1.11 Зв'язок у вільному повітряному просторі.....	30
1.12 Системи інфрачервоних контрзаходів.....	31
<b>2 АНАЛІЗ СИСТЕМИ LIDAR У СЕРЕДНЬОМУ ІЧ-ДІАПАЗОНІ З</b>	<b>ВИКОРИСТАННЯМ КВАНТОВО-КАСКАДНОГО</b>
<b>ЛАЗЕРА.....</b>	<b>33</b>
2.1 Квантово-каскадні лазери середнього інфрачервоного діапазону ..	33
2.2 Принципи роботи систем LIDAR.....	34
2.3 Механізми взаємодії світла та матерії, що використовуються в системах LIDAR.....	<b>Помилка! Закладку не визначено.</b>

2.4 Зворотнє розсіювання LIDAR у середньому інфрачервоному діапазоні на основі квантово-каскадного лазера ..... 36

2.5 Вертикально орієнтована система зворотного розсіювання LIDAR у середньому ІЧ-діапазоні для моніторингу аерозолів.....37

3 АНАЛІЗ КВАНТОВО-КАСКАДНИХ ЛАЗЕРІВ З УРАХУВАННЯМ ЕЛЕКТРОННИХ І ОПТИЧНИХ МЕХАНІЗМІВ ОБМЕЖЕННЯ ..... **ПОМИЛКА! ЗАКЛАДКУ НЕ ВИЗНАЧЕНО.**

3.1 Сумісна дія електронного й оптичного обмеження.....41

3.2 Роздільне оптичне та електронне обмеження .....**Помилка! Закладку не визначено.**

ВИСНОВКИ..... 51

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ..... 53

ДОДАТОК А ..... 55

ДОДАТОК Б.....**ПОМИЛКА! ЗАКЛАДКУ НЕ ВИЗНАЧЕНО.**

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І  
ТЕРМІНІВ

МВЕ – молекулярно-променева епітаксія;

MOVPE – металоорганічна парофазна епітаксія;

FSO – технологія передачі сигналів у вільному просторі у оптичному діапазоні без використання оптоволокна;

ВБР – волоконно-брегівський резонатор;

ДНН – двовимірні напівпровідникові наноструктури;

ІНЛ – інжекційний напівпровідниковий лазер;

ККЛ – квантово-каскадний лазер;

КРС – квантово-розмірна структура;

КЯ – квантова яма;

ЛД – лазерний діод;

НГ – напівпровідникові гетероструктури;

ППЯ – прямокутна потенційна яма;

РЗЗ – розподілений зворотній зв'язок;

СЛД - суперлюмінесцентний діод.

## ВСТУП

Електрони та фотони – дві найдавніші виявлені елементарні частинки в сучасній фізиці. Це, мабуть, зовсім не дивно, оскільки вони настільки поширені в природі, і ми постійно безпосередньо взаємодіємо з ними або їхніми макроскопічними проявами, електрикою та світлом. Навіть у давнину було відомо, що бурштинові стрижні можуть притягувати певні легкі матеріали після тертя об шматок хутра, що є явищем статичної електрики. Немає потреби багато говорити про світло, з якого рослини отримують енергію і за допомогою якого ми бачимо речі. Розуміння та використання електрики та світла, електронів та фотонів, завжди було одним із основних елементів вивчення фізичних наук та розвитку технологій. З іншого боку, електрони та фотони рідко є двома різними предметами дослідження, вони часто переплітаються в різних ситуаціях, від спостереження блискавки до відкриття фотоелектричного ефекту, від винаходу лампочок до демонстрації сонячних батарей. На зорі сучасної фізики ми дізналися, що сильні взаємодії між електронами та фотонами справді регулюються елегантним законом, описаним рівняннями Максвелла.

Розвиток сучасної фізики дозволив нам вивчати електрони, фотони та їх взаємодію на більш фундаментальному рівні, що призвело до низки важливих відкриттів та великих винаходів. Розвиток галузі оптоелектроніки продовжив традицію адаптації взаємодій між електронами та фотонами для створення революційних застосувань. Найбільш (буквально) блискучим прикладом за останні півстоліття є винахід та подальший швидкий розвиток лазерів. Ця галузь вже плідна, але все ще молода та сповнена енергії. Нові лазери постійно додаються до родини лазерів, викликаючи ажіотаж. Одним із наймолодших з виразним виглядом вишуканості є квантовий каскадний (QC) лазер, який є предметом цієї роботи [1 – 5].

Для реалізації поставленої задачі вибрано метод дослідження – математичне моделювання розподілу квантових станів у багатошарових

квантових розмірних структурах різних конструкцій, вибір оптимальної конфігурації послідовності, розмірів та матеріалів шарів для побудови квантово-каскадної випромінювальної структури [6 – 8] .

Актуальність теми роботи пов'язана з тим, що напівпровідниковий квантово-каскадний лазер є одним з найбільш перспективних напрямків еволюції напівпровідникових лазерів [9 – 13]. Впровадження квантово-каскадних лазерів замість звичайних дозволяє суттєво поліпшити параметри оптичних випромінювачів інфрачервоного діапазону[14 – 17].

Мета роботи – вибрати тип наноструктури для реалізації квантового каскаду в випромінювальній зоні напівпровідникового лазера.

# 1 КВАНТОВО-КАСКАДНИЙ ЛАЗЕР

## 1.2 Квантові ями та процеси у квантово-каскадних лазерах

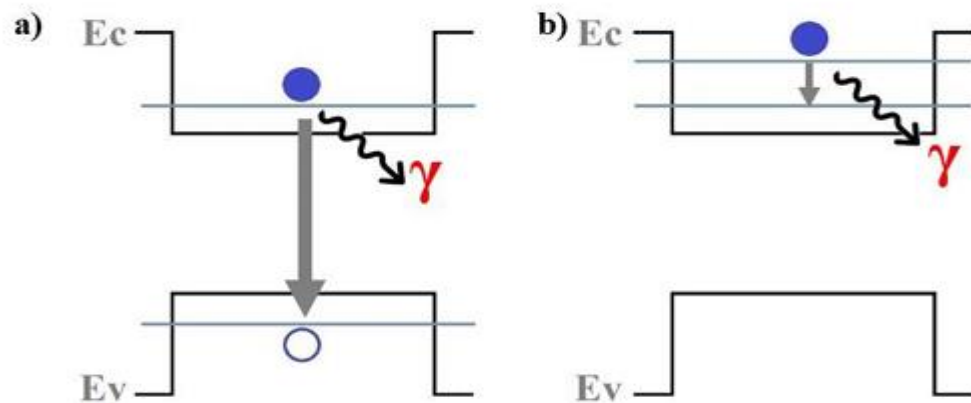
Квантові каскадні лазери (ККЛ) є найскладнішими та технологічно та структурно найдосконалішими джерелами випромінювання, що випромінюють у середньому та далекому інфрачервоному діапазоні. Основною частиною лазера, відповідальною за випромінювання, є ядро, що складається з сотень або навіть тисяч тонких шарів товщиною 0,1-10 нм.

Крім того, ядро з обох боків оточене шарами товщиною в кілька мікрометрів, які призначені для обмеження якомога більшої частини основної лазерної моди в області ядра (визначеної коефіцієнтом обмеження моди), одночасно мінімізуючи можливі втрати вільних носіїв заряду (електронів).

ККЛ є уніполярними пристроями, що означає, що лише один тип носіїв – електрони – бере участь у процесах енергообміну [4 – 6]. Хоча теоретично було доведено, що випромінювання може бути досягнуто виключно з дірок, досі не було створено жодних пристроїв, які працюють з цим типом носіїв. Порівняно з бімолекулярними лазерами (рис. 1а), випромінювання в ККЛ базується на внутрішньопідзонних переходах у межах зони провідності (рис. 1б).

У цьому типі структури довжина хвилі випромінювання практично не залежить від використаних матеріалів і тісно пов'язана з геометрією системи квантових ям [8]. Цей зв'язок дозволяє отримати широкий спектр випромінювання без необхідності зміни матеріальної бази, що дає ККЛ значну перевагу над іншими інфрачервоними випромінювачами.

Конструкції ККЛ зазвичай використовують гетероструктури InGaAs/AlInAs/InP та гетероструктури GaAs/AlGaAs, хоча також використовуються матеріальні системи на основі антимоніду галію та індію (рис. 1.2).



а) міжпідзонна радіаційна рекомбінація електрона із зони провідності ( $E_c$ ) з діркою з валентної зони ( $E_v$ ) – довжина хвилі випромінювання визначається шириною забороненої зони; б) внутрішньопідзонний радіаційний перехід електрона між квантованими електронними станами зони провідності – випромінювання довжин хвиль у широкому діапазоні від 3 до 150 мкм, залежно від геометрії квантових ям активної області.

Рисунок 1.1 – Випромінювальні процеси у квантових ямах

Надзвичайно складна та заплутана структура ККЛ вимагає високоточних методів виготовлення цих структур з субнанометровою точністю. Методи, що забезпечують атомарно-точний контроль складу та товщини гетероструктур багатокomпонентних сполук, є епітаксіальними методами. Найпоширенішими є молекулярно-променева епітаксія (МВЕ) та металоорганічна парофазна епітаксія (MOVPE). Ці методи дозволяють виготовляти всі елементи структури ККЛ, тобто ядро, обмежувальні шари та субконтактні шари. Кристалізація епітаксіальної структури – це лише один крок у виготовленні кінцевого пристрою, але він є найважливішим, що визначає правильну роботу лазера.

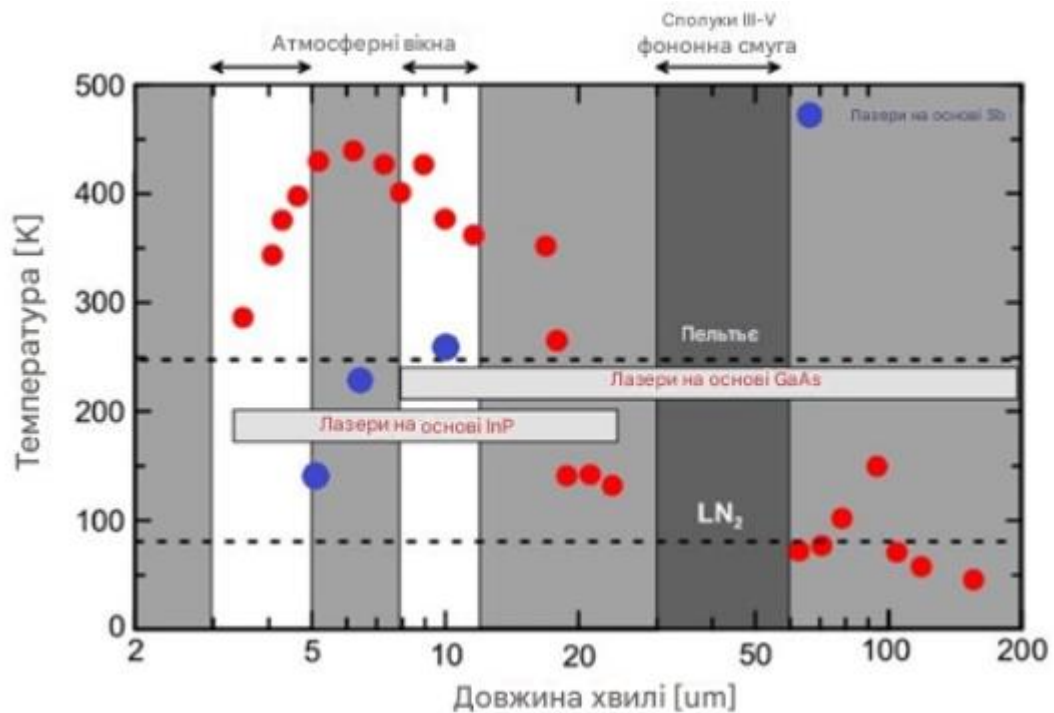


Рисунок 1.2 – Залежність робочої температури лазерів на основі ККЛ на основі InP, GaAs та Sb від довжини хвилі випромінювання.

Наступні кроки в технології пристрою включають: травлення гребневих хвилеводів (мокрі або сухі процеси травлення), нанесення діелектричних шарів та металізація контактів, склеювання, а потім монтаж пристрою в корпусі. Істотною проблемою під час роботи лазера є стабілізація температури ядра. Для покращення відведення тепла з активної області, серед інших методів, використовуються закопані гетероструктури.

## 1.2 Побудова квантових каскадних лазерів

Конструкція квантового каскадного лазера є надзвичайно складною, як з точки зору дизайну, так і технології. Як згадувалося раніше, епітаксіальна структура ККЛ складається з сотень, а іноді навіть тисяч, шарів різної товщини від  $k1 \text{ \AA}$  (ядро) до  $k1 \text{ мкм}$  (обмежувальні шари). Каскадний характер генерації випромінювання дозволяє випромінювати кілька фотонів одним електроном, що

дозволяє каскадним лазерам досягати значно вищої потужності порівняно з біполярними випромінювачами. Крім того, наявність лише одного типу носіїв (електронів) усуває більшість несприятливих процесів невиконувальної рекомбінації.

У конструкції квантового каскадного лазера можна виділити кілька областей [7,8], кожна з яких виконує певну функцію. Перша - це обмежувальний шар, який наноситься безпосередньо на підкладку (іноді сама підкладка бере на себе цю функцію) і відповідає за підтримку хвилеводного ефекту. Поверх цього шару розташований розділовий шар, метою якого є забезпечення відповідного контрасту показника заломлення з показником заломлення осердя. Наступна і найважливіша область - це осердя квантового каскадного лазера, що відповідає за випромінювання випромінювання. Послідовність розділових і обмежувальних шарів симетрично повторюється на осерді. Заключним етапом осадження структури ККЛ є кристалізація високолегованого n-типу субконтактного шару на основі InP або InGaAs. Його функція полягає в забезпеченні хорошого омичного контакту для металізації смугового контакту.

Вже на етапі проектування необхідно враховувати матеріальну базу, товщину та склад окремих шарів, а також можливості доступних технологій. Наступним кроком є проведення серії теоретичних симуляцій, що вносять певні зміни до початкових проектних припущень, що дозволяють оптимізувати робочі параметри лазера: оптичні (наприклад, збільшення коефіцієнта обмеження), електричні (наприклад, зменшення опору пристрою) та теплові (наприклад, ефективніше відведення тепла від області серцевини).

### 1.3 Структура ядра лазера

Серцевина квантового каскадного лазера є найскладнішим елементом структури ККЛ, найтонші шари якого мають порядок кількох  $\text{\AA}$ , а найтовстіші – кілька нм. Серцевина складається з кількох десятків повторень ідентичних каскадів. Кожен каскад складається з активної області (релаксація інжектованого електрона — генерація випромінювання), що складається з кількох квантових ям, та області інжекції (надгратки), основною функцією якої є транспортування (інжекція електрона) до наступного каскаду, використовуючи явище резонансного тунелювання. Зонна діаграма кількох каскадів у типовому квантовому каскадному лазері показана на рисунку 1.2.

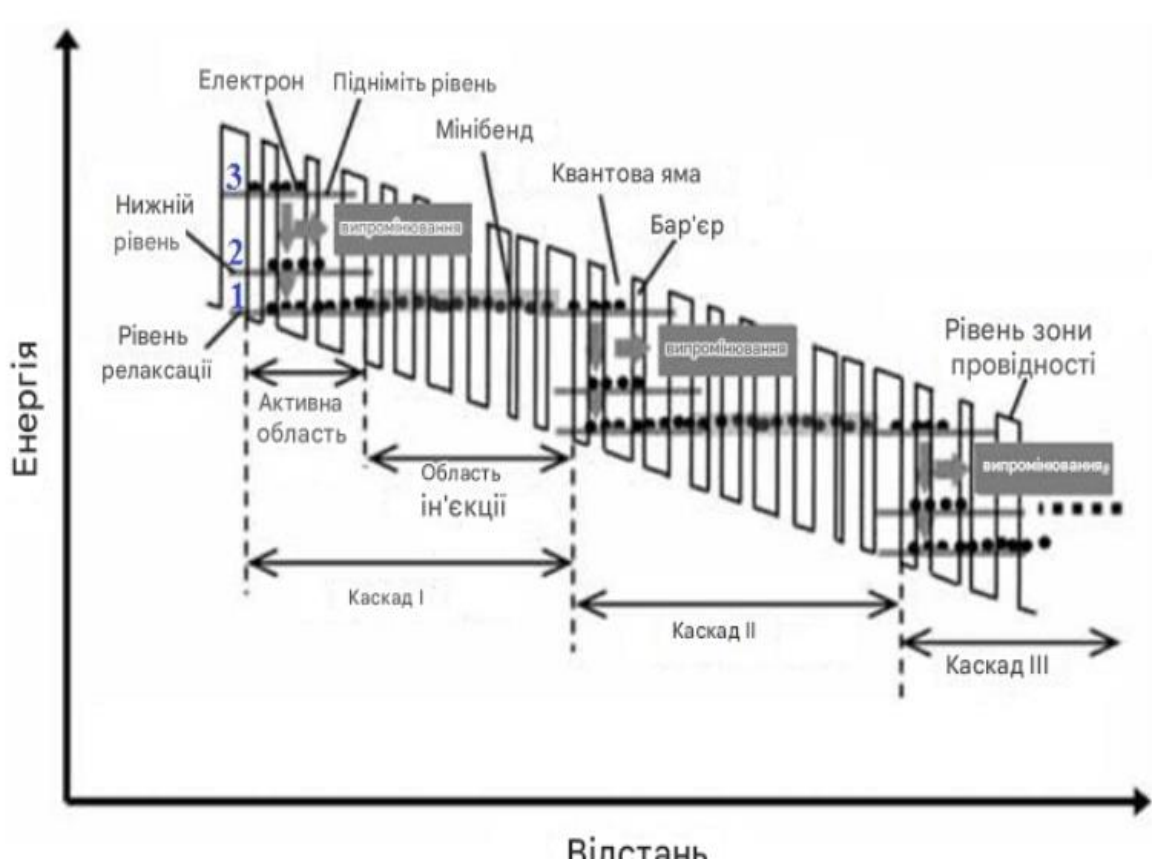


Рисунок 1.2 – Зонна діаграма кількох каскадів у типовому квантовому каскадному лазері.

Активна область, як правило, трирівнева, а інверсія населеності досягається, коли час життя лазерного переходу  $3 \rightarrow 2$  довший за час життя електрона на рівні 2. Електрони інжектуються (відповідно до поляризації структури) зліва направо і випромінюють фотон у кожному каскаді. Область інжекції електронів складається з квантових ям, розділених дуже тонкими бар'єрами, створюючи надграткову структуру. В результаті надграткової структури електронні стани поширюються на кілька шарів і утворюють вузькі енергетичні мінізони, розділені мініщілинами (щілиною між двома мінізонами) шириною порядку  $100 \text{ meV}$  та незначною щільністю станів. Мініщілина запобігає тунелюванню електронів за межі підзони 2. Електрони можуть вільно рухатися перпендикулярно до гетероструктури. Кількість станів у мінізоні дорівнює кількості квантових ям. Стани надгратки розширюються процесами розсіювання та шорсткістю поверхонь розділу. Найтонша яма в активній області посилює тунелювання електронів з області інжекції до вищого стану. У надгратці, що використовується в квантовому каскадному лазері, товщина шарів ями та бар'єру змінюється вздовж осі надгратки. Отже, енергія нульової точки, ширина мінізон та ширина мініщілини також змінюються. Верхня межа мінізони обмежує максимальну енергію, якої може досягти електрон у статичному полі, а мініщілина запобігає виходу збуджених електронів з області посилення.

ККЛ-лазер можна розробити для випромінювання довжин хвиль різної довжини шляхом відповідного вибору товщини шарів активної області. При проектуванні лазерного ядра необхідно враховувати кілька важливих факторів:

- частота (довжина хвилі) лазерного випромінювання та робоча температура пристрою;
- орієнтовне посилення випромінювання, що поширюється в активній області ККЛ-лазера;
- значення прикладеного електричного поля, зазвичай порядку  $k \times 10 \text{ кВ/см}$ , яке суттєво впливає на оптичні переходи в активній області. Енергія переходів повинна відповідати розрахованій довжині хвилі, а їх ймовірність (інтеграл перекриття) повинна бути якомога вищою;

– кількість запланованих каскадів в області ядра.

#### 1.4 Особливості роботи квантово-каскадного лазера

Квантовий каскадний лазер характеризується не лише своєю надзвичайно складною структурою, але й складними фізичними явищами, які визначають довжину хвилі випромінювання. Енергія випромінювання тісно залежить від геометрії системи шарів та їх індивідуальної товщини, і менше від матеріальної основи.

Основою для отримання інверсії населеності в ККЛ-лазерах, що працює на основі міжпідзонних (або внутрішньопідзонних) переходів, є використання енергетичної структури з трьома рівнями. [102]. Різниця енергій між рівнями 1 та 2 пов'язана з енергією поздовжніх оптичних фононів (LO), яка становить 34 меВ та 36 меВ для матеріалів на основі InP та GaAs відповідно. Це призводить до часу життя носіїв заряду на рівні 2 приблизно  $\tau_{21} = 0,5$  пс (швидке розсіювання на LO-фононах), тоді як час життя електрона на рівні 3 довший і може досягати  $\tau_{32} = 2,0$  пс, що гарантує інверсію населеності між станами 3 та 2.

Опис та розуміння переходу електрона між цими двома енергетичними станами було основою для проектування та побудови структури першого робочого ККЛ-лазера, яка з часом систематично вдосконалювалася. Наразі сучасні ККЛ-лазери навіть використовують системи з чотирирівневою енергетичною структурою, зі швидким розсіюванням енергії електронів з нижнього рівня 2, що супроводжується випромінюванням двох LO-фононів.

#### 1.5 Хвилеводні шари у структурі квантово-каскадного лазера

Оптимізація конструкції мікрохвильових та волоконно-оптичних пристроїв вимагає знання характеристик поширення сигналу та розподілу електричного та магнітного полів, а також їхньої залежності від технологічних параметрів, що визначають продуктивність пристрою. Існуюча база даних методів чисельного моделювання дозволяє проводити теоретичний аналіз хвилеводів, оптимізувати їх конструкцію та прогнозувати характеристики продуктивності розглянутого пристрою. Іноді така оптимізація вимагає розробки нового інструменту моделювання. У літературі лазерний хвилевід на ККЛ визначається як серцевина, так і розділові та обмежувальні шари, які повністю відповідають за напрямок випромінювання всередині структури та максимізацію обмеження лазерної моди в області серцевини. Хвилеводні шари, з іншого боку, в першу чергу відносяться до розділових та обмежувальних шарів.

ККЛ-лазери – це захоптиві пристрої, що поєднують аспекти різних галузей, таких як наноелектроніка та квантова інженерія, плазмоніка та нелінійна фотоніка. У цих випромінювачах випромінювання відбувається з країв структури завдяки внутрішньопідзонним переходам. Генероване випромінювання обмежується як у напрямку, перпендикулярному до резонатора, відповідною послідовністю епітаксійних шарів, так і в площині резонатора смугастою структурою. Оскільки епітаксіальне зростання забезпечує точний контроль над товщиною шарів та межами розділу, оптичне обмеження в напрямку, перпендикулярному до активної області, зазвичай сильніше, ніж у паралельному напрямку. Як результат, використання найпростішої одновимірної моделі хвилеводу під час моделювання достатньо для правильного моделювання коефіцієнта поширення та обмеження мод у лазерній структурі, що дозволяє значно спростити розрахунки.

## 1.6 Області застосування квантових каскадних лазерів

Квантові каскадні лазери мають величезний потенціал застосування. Вони використовуються в багатьох секторах економіки, таких як медицина, промисловість, безпека, військові застосування та оптичні телекомунікації

ККЛ-лазери найчастіше є компонентом оптоелектронних систем, відповідальних за випромінювання певної довжини хвилі. У цьому розділі детальніше описується роль ККЛ-лазерів у системах виявлення газів та флуоресценції.

### 1.7 Каскадні лазери в системах бездротового зв'язку

Система FSO відіграє важливу роль в архітектурі бездротового зв'язку, головним чином завдяки своїй здатності усунути необхідність прокладання волоконно-оптичного кабелю.

FSO – це нове технологічне рішення, яке відповідає постійно зростаючим вимогам до пропускної здатності даних у каналах зв'язку з віддаленими об'єктами на морі, у повітрі, або в космосі [12,13]. Практично необмежена пропускна здатність та нерегульований частотний спектр роблять FSO кращим за радіозв'язок [16].

Крім того, низька ймовірність виявлення та прослуховування робить її особливо привабливою для оборонних застосувань. FSO представляє значний інтерес завдяки своєму застосуванню в таких сферах: надання інтернет-послуг до кінцевого пункту призначення – дому чи офісу (доступ до останньої милі), розширення мереж метро, корпоративні комунікації, підтримка екстреного інтернет-з'єднання (резервне копіювання оптоволоконного кабелю) та магістральних каналах [107].

Середній інфрачервоний (MIR) діапазон, де випромінюють лазери QCL, має краще пропускання через атмосферу порівняно з видимим, ближнім інфрачервоним (NIR), короткохвильовим інфрачервоним (SWIR) і навіть довгохвильовим інфрачервоним (LWIR) діапазонами [17]. Крім того, порівняно з NIR та SWIR, випромінювання MIR ефективніше проникає крізь туман,

забезпечуючи таким чином кращу доступність каналу зв'язку для місць з несприятливими погодними умовами [11,12].

Канали MWIR менш чутливі до атмосферної турбулентності та в більшості застосувань не потребуватимуть адаптивної оптики, що робить систему зв'язку більш привабливою з точки зору економічної ефективності [12,13].

Типова система зв'язку FSO складається з оптичного передавача, який є напівпровідниковим пристроєм, таким як світлодіод або лазер, модулятора та геометричної оптики – у більшості випадків телескопа або лінзи. Приймач, по суті, є детектором, декодером (демодулятором) та телескопом або лінзою для збору вхідного оптичного сигналу. Сигнал поширюється у вільному просторі, тому він являє собою канал передачі (сам канал зазвичай позначає частоту сигналу) з'єднання. Схема системи FSO показана на рисунку 1.4 [14].

Ключову роль у системах FSO відіграє передавач, який складається з модулятора і джерела світла, а також додаткових периферійних пристроїв, таких як камера. За допомогою двох плоских дзеркал випромінювання лазера QCL спрямовується через повітря вздовж оптичного шляху а потім фокусується на детектор за допомогою оптичної лінзи (детектор знаходиться в полі зору лазера). Електричний сигнал від детектора підсилюється малошумним підсилювачем (LNA), а потім надсилається на демодулятор. Після демодуляції передані сигнали можна дослідити за допомогою осцилографа. Крім того, відеосигнал можна відобразити на РК-екрані для візуальної перевірки якості зв'язку. У практичних застосуваннях для передачі на великі відстані лазерний промінь повинен бути ідеально колімований за допомогою колімуючої системи з дуже малим діаметром.

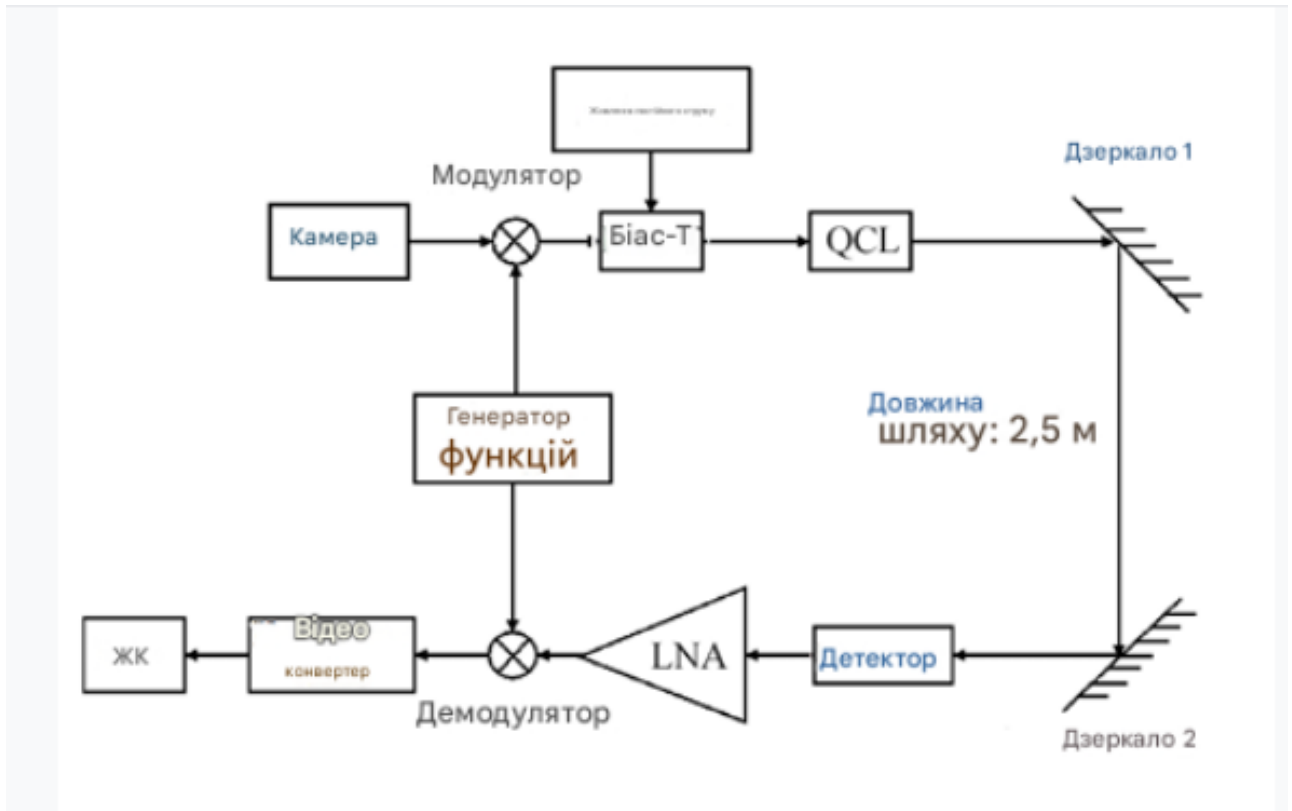


Рисунок 1.4 – Принципова схема системи зв'язку FSO в лабораторній установці

### 1.8 Каскадні лазери в системах виявлення газів

ККЛ-лазери також широко використовуються в системах виявлення газів. Як інфрачервоні випромінювачі, вони забезпечують високу чутливість виявлення, короткий час вимірювання та високу рухливість порівняно з традиційними методами виявлення. Молекули газу поглинають світло в середньому інфрачервоному діапазоні, зазнаючи коливального збудження.

Довжина хвилі, на якій відбувається поглинання, залежить від типу молекули, що досліджується, а інтенсивність поглиненого сигналу залежить від концентрації газу. Тому виявлення включає вимірювання спектру поглинання, який залежить від типу газу, що досліджується. Багато молекул мають власні характерні лінії поглинання (газові відбитки) в середньому інфрачервоному діапазоні, які тут значно сильніші (більше поглинання через коливання

фундаментальних частинок), ніж в інших спектральних діапазонах, як показано на рисунку 1.5.

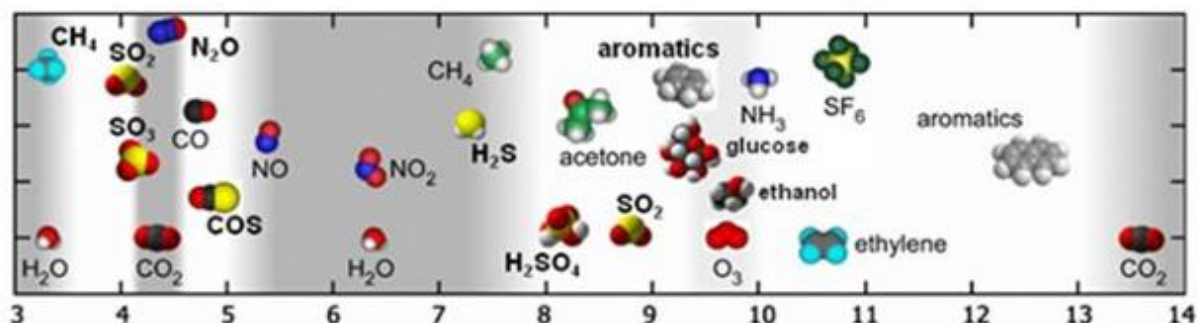


Рисунок 1.5 – Характерні лінії поглинання різних молекул у середньому інфрачервоному діапазоні.

Приклад схеми системи детектування з випромінювачем ККЛ показано на рисунку 1.6 [15]. Ця схема була представлена у статті «Високочутливе зондування газу за допомогою квантових каскадних лазерів з низьким енергоспоживанням», де запропоновано систему детектування газу з використанням лазера ККЛ, що випромінює на довжині хвилі 7 мкм.

Випромінювання від ККЛ-лазера колімується за допомогою лінзи, а потім діаметр променя зменшується приблизно до 2 мм за допомогою двох параболічних дзеркал. Потім промінь вводиться в газову комірку за допомогою трьох плоских дзеркал для вирівнювання оптичної осі. Два дзеркала з високим коефіцієнтом відбиття, розміщені на обох кінцях комірки, викликають 238 відбиттів, що призводить до загальної довжини оптичного шляху 76 м.

Щоб досягти такої великої довжини оптичного шляху, необхідно створити промінь з достатньо малим діаметром  $\sim 2$  мм на вході. Промінь з комірки детектується фотодетектором, охолоджуваним рідким азотом. Вихідна напруга з детектора вимірюється за допомогою мультиметра та записується в комп'ютері.

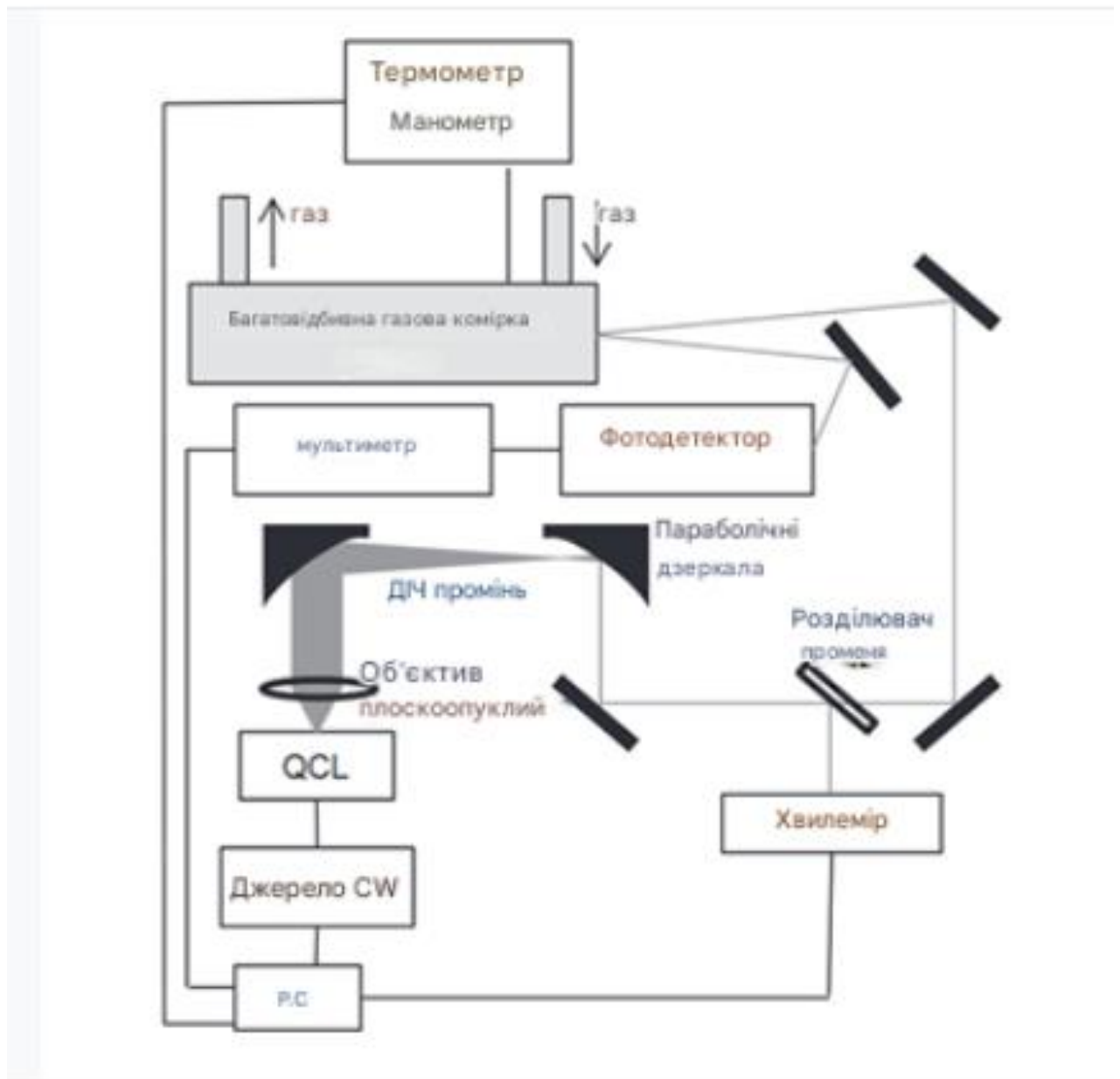


Рисунок 1.6 – Принципова схема системи виявлення газу з використанням лазера QCL

Роздільник променя розміщується перед газовою коміркою, а довжина хвилі, відбита від роздільника променя, контролюється в режимі реального часу за допомогою хвилеміра. Зразок газу вводиться в комірку, а швидкість потоку контролюється контролером масової витрати та спіральним насосом.

Це вимірювання було проведено з газовою коміркою, заповненою випробувальним газом, а потім азотом, який неактивний в інфрачервоному

діапазоні та служить фоном. Поділивши інтенсивність випромінювання, що пройшло через випробувальний газ, на інтенсивність азоту (фонового газу) на кожній довжині хвилі, можна отримати кінцевий спектр інфрачервоного поглинання [115].

### 1.9 Каскадні лазери в медичному застосуванні

Дослідження випромінювачів терагерцової частоти, таких як квантові каскадні лазери, є однією з найбільш динамічно розвиваючих галузей сучасної фізики.

Спектри поглинання багатьох органічних молекул, включаючи біологічно важливі коливання колективних мод ДНК та білків, лежать у терагерцовому діапазоні. Це дозволяє розробляти нові методи спектроскопії біологічних структур [16].

На відміну від рентгенівських променів, терагерцові хвилі не є небезпечними – вони не є іонізуючим випромінюванням і не пошкоджують біомолекули. Крім того, виняткова чутливість терагерцового випромінювання до води викликала значний інтерес до його використання в офтальмології [13].

Через неіонізуючий вплив терагерцового випромінювання на досліджуваний об'єкт та відносно невеликі інтерференційні ефекти, очікується, що генерація зображень у терагерцовому діапазоні частот стане надзвичайно перспективним методом для безпечних досліджень *in vivo*, наприклад, для оцінки ефективності загоєння ран або під час точного обстеження м'яких тканин. Було показано, що терагерцеве випромінювання дозволяє виявляти карієс зубів та рак шкіри [13], а також створювати точні зображення злоякісних та здорових біологічних тканин з метою порівняння та діагностики захворювань [13].

Приклади зображень зрізу тканини, інфікованого раком товстої кишки, отриманих за допомогою ІЧ-мікроскопа на основі ККЛ, показані на рисунку 1.7 [13].

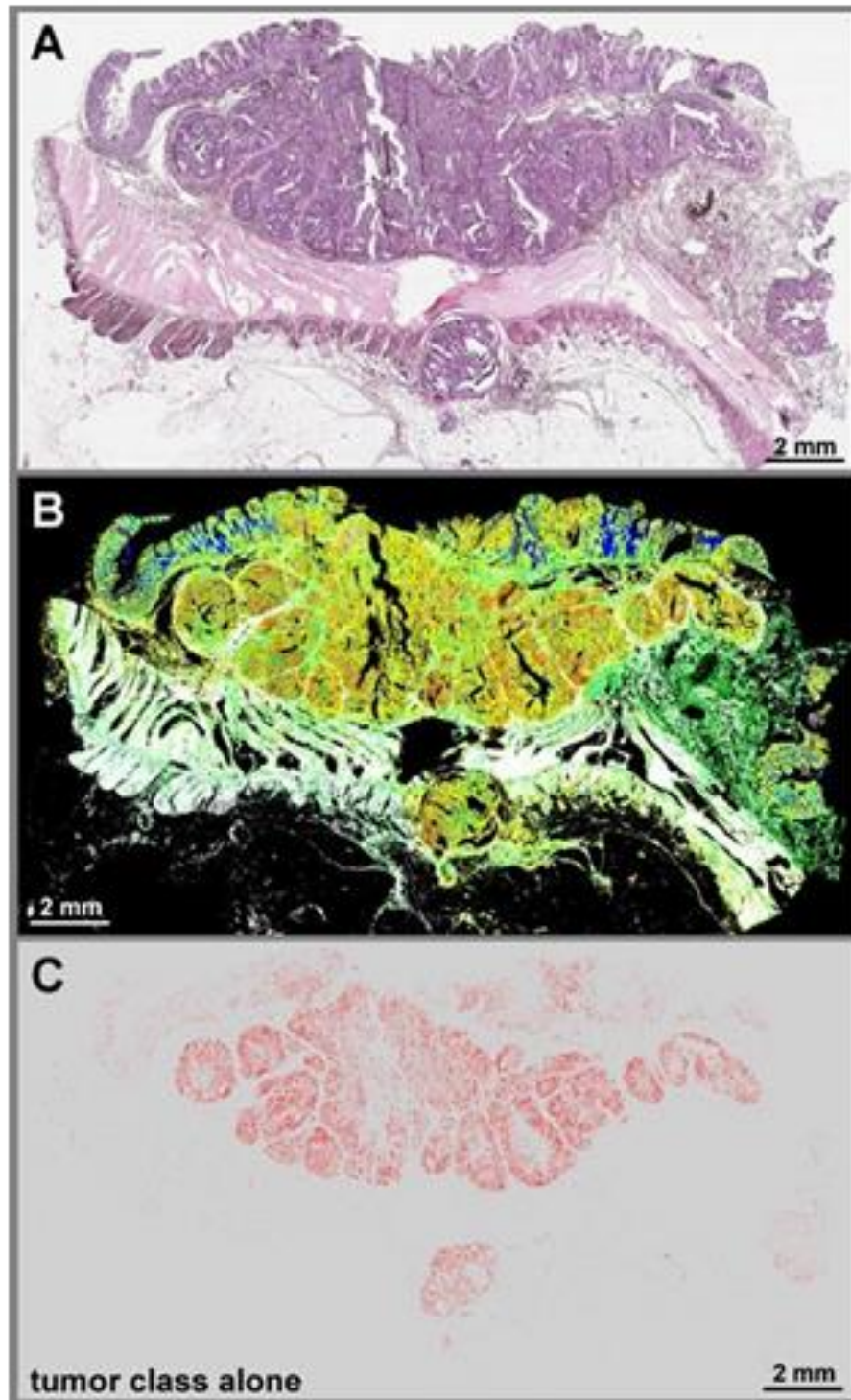


Рисунок 1.7 – Результати інфрачервоної візуалізації тканини раку товстої кишки на основі КХЛ з використанням різних дослідницьких маркерів [13]

Головною перевагою ІЧ-мікроскопа на основі КХЛ, яку обговорюють автори, є значне скорочення часу вимірювання – до кількох хвилин, що суттєво

покращує діагностику. Однак для досягнення надійності сучасних систем на основі ІЧ-спектроскопії з перетворенням Фур'є все ще необхідна подальша оптимізація системи.

Попередні дослідження показали, що зображення зразка, що містить пухлини печінки, отримане за допомогою ККЛ-лазера, що працює в ТГц-діапазоні, містить значно більше інформації, ніж оптичне зображення, і його природу можна пояснити наявністю значних структурних деформацій та змінами щільності тканини у зразку через розвиток пухлин у печінці.

Таким чином, ці результати вказують на величезний потенціал для розробки ТГц-систем візуалізації на основі ККЛ-лазерів для раннього виявлення онкологічних захворювань. Наразі квантові каскадні лазери, що працюють у терагерцовому діапазоні, виробляють потужність випромінювання в мВт у діапазоні частот 4,4–2,0 ТГц [12,13]. Дослідження терагерцової візуалізації показали, що на нижчих частотах контраст між пухлиною та нормальною тканиною та глибина проникнення випромінювання в тканину більші. Тому дуже бажано розробляти лазери, які працюють у нижньому ТГц-діапазоні частот (< 2 ТГц) та одночасно досягають потужності випромінювання (кілька мВт), необхідної для візуалізації тканин. У цьому випадку випромінювачі ККЛ з дуже високим співвідношенням сигнал/шум і малими розмірами є ідеальними кандидатами для використання в медичній та біологічній практиці.

На основі наведених прикладів, а також літератури з даної теми, можна зробити висновок, що квантові каскадні лазери, завдяки своїй здатності випромінювати випромінювання в надзвичайно широкому спектральному діапазоні, мають дуже широкий потенціал застосування як у науці, так і в повсякденному житті.

## 1.10 Застосування ККЛ в середньому інфрачервоному діапазоні

Високопродуктивні когерентні джерела в середньому інфрачервоному діапазоні є бажаними просто через привабливі застосування цього діапазону довжин хвиль. У цьому розділі в основному представлено три репрезентативні застосування, тобто газове зондування, телекомунікації у вільному просторі та інфрачервоні контрзаходи.

Багато молекул газу демонструють сильне поглинання в середньому ІЧ-діапазоні завдяки фундаментальним коливальним модам своїх молекул [16], як показано на рис. 1.8. Фундаментальний коливальний перехід  $\nu\nu 0 \rightarrow \nu\nu 1$  має на кілька порядків сильнішу силу поглинання порівняно з переходами в інших частотних діапазонах (обертонами) через велику силу осцилятора. Отже, в середньому ІЧ-діапазоні можна досягти надзвичайно високої чутливості детектування, і тому ця область довжин хвиль також відома як область «відбитків пальців».

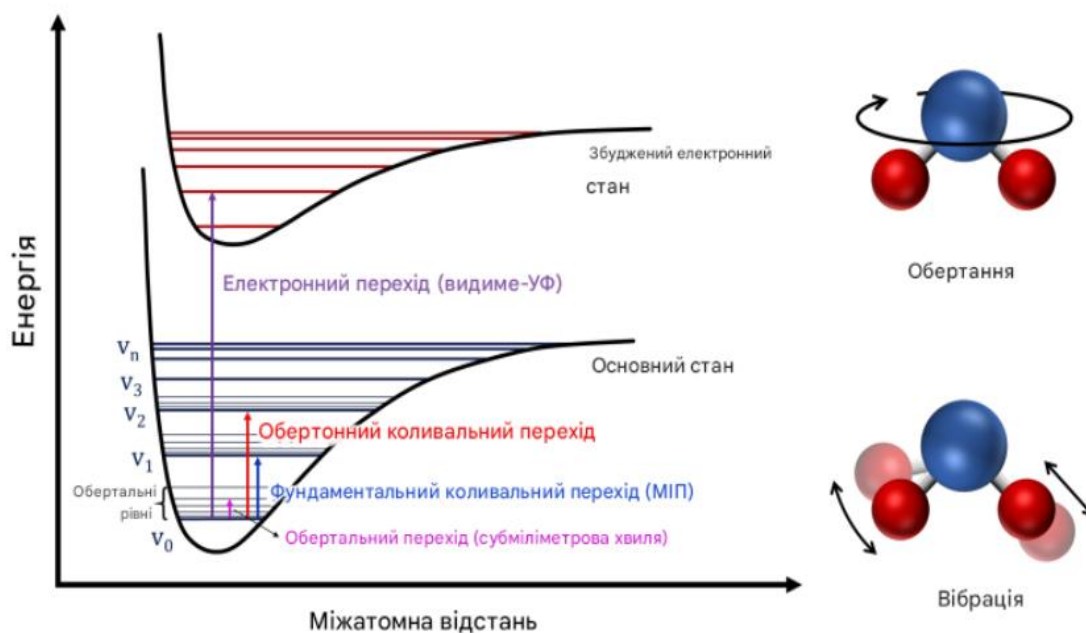


Рисунок 1.8 – Обертальні та коливальні переходи в молекулах

Загальна схема газової сенсорної системи схематично показана на рис. 1.9, де багатопрохідний резонатор, що містить зразок газу, розміщений між лазером середнього інфрачервоного діапазону та відповідним детектором. Таким чином, загальний оптичний шлях може бути подовжений до кількох метрів, десятків метрів або навіть сотень метрів, що значно підвищує чутливість виявлення, дозволяючи виявляти молекули газу при дуже низьких концентраціях.

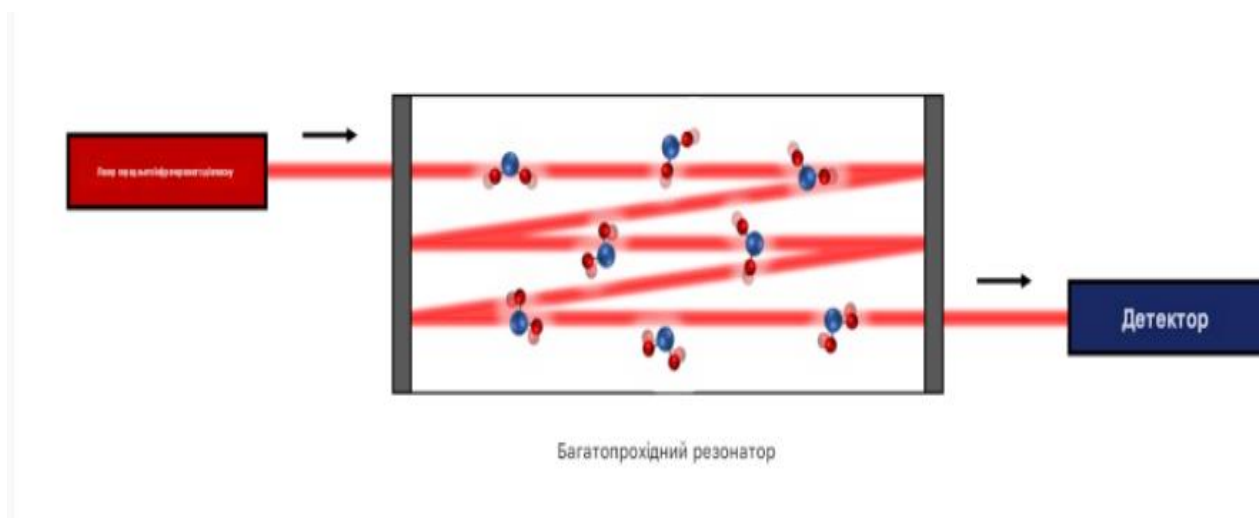


Рисунок 1.9 – Принципова схема установки газового зонда

Зрозумівши загальну теорію, ми тепер можемо розглянути, що насправді може робити газове зондування. На рис. 1.10 перераховано низку поширених газових молекул, які мають сильні характерні піки поглинання в середньому інфрачервоному діапазоні між 2,5 і 15 мкм. Надвисока точність виявлення цих газів має багато цінних і незамінних застосувань. Наприклад, область 3–5 мкм є переважною для моніторингу навколишнього середовища, таких як вивчення парникового ефекту, моніторинг якості навколишнього повітря, моніторинг забруднення тощо. Газове зондування 7–10 мкм може бути використане для виявлення витоків у промисловому процесі. Крім того, ця область також застосовується для цілей оборони та безпеки, тобто для виявлення хімічної та вибухової загрози. Це пояснюється тим, що такі хімічні речовини, як тротил,

$\text{H}_2\text{O}_2$ , ацетон і зарин, також мають сильне характеристичне поглинання в цій області, яке не відображено на рисунку через обмеження об'єму. Газове зондування в області 8–12 мкм знаходить популярне застосування в медичній діагностиці саме тому, що це неінвазивний метод. Наприклад, виявлено, що концентрація ацетону у видихуваному повітрі пацієнтів з діабетом значно збільшена [14]. Тому виявлення ацетону у видихуваному повітрі може бути використане для попередньої діагностики діабету як біомаркера. Більше того, на відміну від іншого широко використаного методу аналізу дихання, газової хроматографії, яка зазвичай вимагає кількох вдихів, середньо-інфрачервона спектроскопія забезпечує надзвичайно вищу чутливість; таким чином, загальний час діагностики може бути значно скорочений, і навіть діагностика за допомогою одного вдиху може бути можливою.

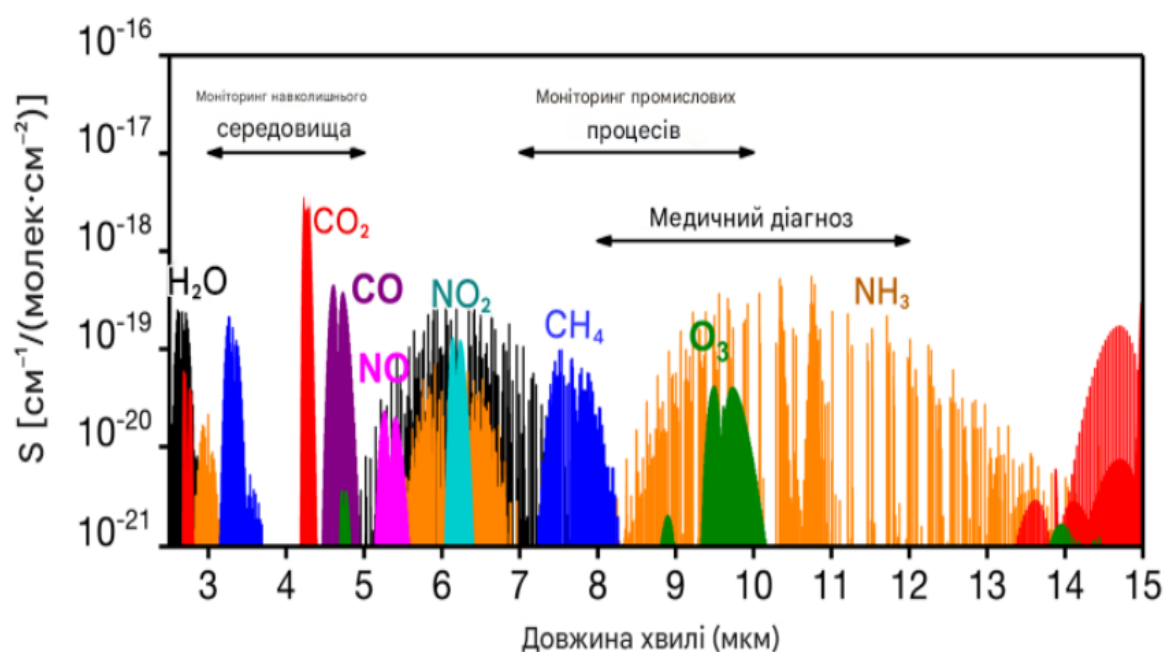


Рисунок 1.10 – Ряд молекул газу з сильними лініями поглинання в середньому інфрачервоному діапазоні між 2,5 та 15 мкм. Дані поглинання молекул були зібрані з видання HITRAN2020 [17]

### 1.11 Зв'язок у вільному повітряному просторі

Найпоширенішою та найширше використовуваною оптичною телекомунікаційною технологією є волоконно-оптичний зв'язок; однак звичайні скляні оптичні волокна не можуть передавати середній інфрачервоний діапазон через високе поглинання, а волокна, сумісні з середнім інфрачервоним діапазоном, такі як волокна As-Se, є дуже дорогими. З іншого боку, як показано на рис. 1.11, два вікна пропускання атмосфери в середньому інфрачервоному діапазоні, тобто 3–5 мкм та 8–14 мкм, дозволяють використовувати когерентні джерела середнього інфрачервоного діапазону для зв'язку у вільному просторі [18, 19]. Порівняно з волоконно-оптичним зв'язком, середовищем передачі в цій техніці є просто повітря; отже, можна заощадити витрати на встановлення, обслуговування та ремонт оптичного волокна, що є найпривабливішою особливістю зв'язку у вільному просторі.

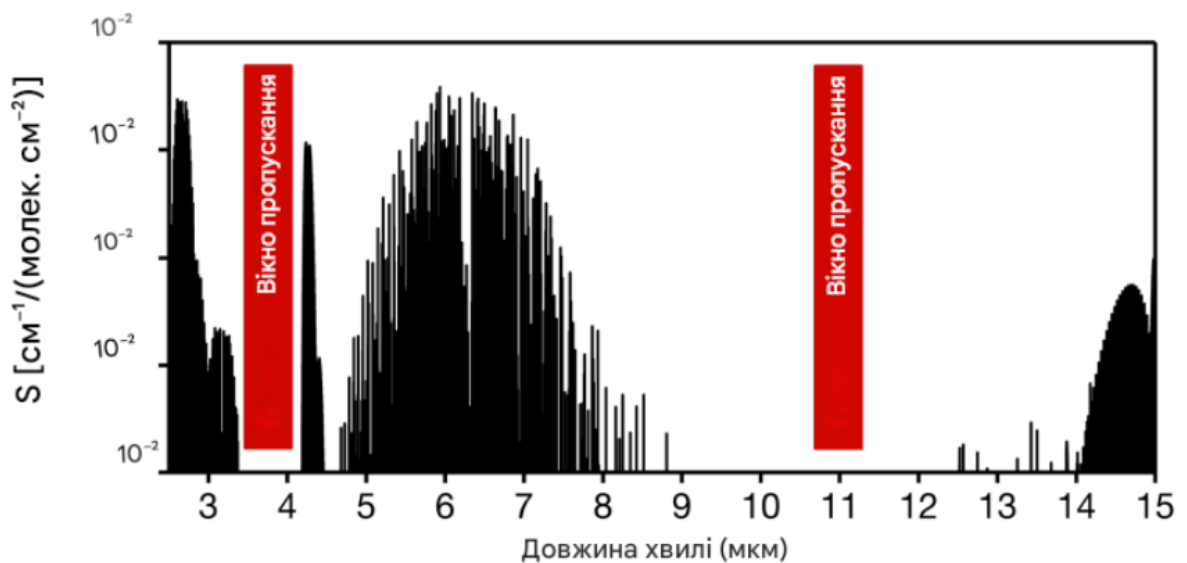


Рисунок 1.11 – Спектр атмосферного поглинання в середньому інфрачервоному діапазоні між 2,5 та 15 мкм. Нанесені дані базуються на моделі газової суміші, наданій HITRAN [20].

Крім того, порівняно з ближнім інфрачервоним або видимим діапазоном, середній інфрачервоний діапазон безпечніший для очей, краще відрізняється від

сонячного спектру та менш чутливий до туману та міської імли завдяки довшій довжині хвилі, що призводить до зменшення ефекту розсіювання Релея.

З іншого боку, якість зв'язку все ще може залежати від несприятливих погодних умов, таких як дощ та сніг; розбіжність променя від джерел середнього інфрачервоного діапазону також може сприяти додатковому ослабленню сигналу, що може вплинути на життєздатні відстані зв'язку. Це приклади обмежень зв'язку у вільному просторі; тому він підходить для встановлення оптичних каналів передачі даних у міських районах як доповнення до волоконно-оптичного зв'язку для забезпечення тимчасового збільшення пропускної здатності.

### 1.12 Системи інфрачервоних контрзаходів

Когерентне світло середнього інфрачервоного діапазону також має важливе застосування у військовій справі. Літаки з високотемпературними двигунами випромінюють дуже сильні інфрачервоні сигнали в результаті випромінювання абсолютно чорного тіла; тому їх можна відстежувати та вражати ракетами з інфрачервоним наведенням. Для боротьби з цими ракетами з тепловим наведенням військові літаки оснащені системами інфрачервоної контрзаходів (IRCM), які можуть випромінювати ще сильніші інфрачервоні сигнали та вводити в оману теплові самонаведення. Поширеним методом є розгортання спалахів, які можуть одночасно створювати численні цілі для ракети з інфрачервоним наведенням, тим самим заплутуючи її. На противагу цьому, лазерні промені є вузькоспрямованими, що, очевидно, не може «транслювати» в інфрачервоному діапазоні, як це роблять спалахи, але потужні інфрачервоні лазери також можуть використовуватися для введення в оману ракет з інфрачервоним наведенням [16]. Це відомо як спрямовані інфрачервоні контрзаходи (DIRCM). Після отримання сигналу від системи попередження про ракету, буде випромінено яскравий інфрачервоний промінь, який націлиться на ракету з тепловим самонаведенням та порушить роботу її системи наведення.

Окрім захисту літаків від ракет з інфрачервоним наведенням, потужні інфрачервоні лазери також можуть бути використані для засліплення камер нічного бачення, що використовуються у військовій техніці (наприклад, гелікоптерах, танках тощо), оскільки ці пристрої зазвичай базуються на інфрачервоному зображенні.

## 2 АНАЛІЗ СИСТЕМИ LIDAR У СЕРЕДНЬОМУ ІЧ-ДІАПАЗОНІ З ВИКОРИСТАННЯМ КВАНТОВО-КАСКАДНОГО ЛАЗЕРА

### 2.1 Квантово-каскадні лазери середнього інфрачервоного діапазону

ККЛ середнього інфрачервоного діапазону є універсальними джерелами світла для широкого спектру застосувань молекулярного зондування завдяки сильним лініям поглинання молекул газу в діапазоні довжин хвиль середнього інфрачервоного діапазону. Крім того, вони також мають потенційне застосування для виявлення набагато більших частинок, таких як аерозолі, в атмосфері. Оскільки аерозолі різних категорій в атмосфері мають значний вплив на клімат і здоров'я людини та є важливим об'єктом для метеорологічних досліджень, системи лідар середнього інфрачервоного діапазону на основі ККЛ для характеристики профілю атмосферного аерозолу є ще одним дуже привабливим застосуванням [1 – 4]. Для таких застосувань лазери контролю якості середнього інфрачервоного діапазону пропонують можливість ефективнішого націлювання на більші частинки аерозолу, ніж лазери видимого та ближнього інфрачервоного діапазонів завдяки їх набагато більшій довжині хвилі.

У діапазоні довжин хвиль середнього інфрачервоного діапазону існують два атмосферні вікна, придатні для дистанційного зондування, такі як лідар або системи зондування з відкритим шляхом [5 – 7], які становлять від 3 мкм до 5 мкм та від 8 мкм до 14 мкм відповідно. Завдяки розробленим високопродуктивним лазерам з надсильним зв'язком, що працюють на довжинах хвиль у першому середньому інфрачервоному атмосферному вікні, як описано в розділі 2, ми досліджували їхній потенціал для реалізації системи прицілювання LIDAR у середньому інфрачервоному діапазоні на основі ККЛ для характеристики профілю відносно великих аерозольних частинок у прикордонному шарі атмосфери (планетарному прикордонному шарі), тобто в

найнижчій частині атмосфери, яка безпосередньо взаємодіє з поверхнею планети.

## 2.2 Принципи роботи систем LIDAR

Система LIDAR працює в принципі подібно до радіолокаційної системи, оскільки діапазон віддалених цілей визначається із затримки між вихідним та поверненим сигналом, а інформація про певні властивості цілей міститься в часовій еволюції інтенсивності поверненого сигналу. Однак, одна з найбільш суттєвих відмінностей полягає в тому, що система LIDAR використовує світло (зазвичай світло від лазерів) замість радіочастотних хвиль або мікрохвиль. Таким чином, системи LIDAR забезпечують набагато вищу спрямованість, і, використовуючи різні форми взаємодії між світлом та речовиною, системи LIDAR не тільки здатні виявляти макроскопічні об'єкти [8], але й частіше використовуються для дистанційного виявлення мікроскопічних частинок, таких як аерозолі та молекули [3,10], що є їхньою унікальною перевагою перед радарями.

## 2.3 Механізми взаємодії світла та матерії, що використовуються в системах LIDAR

Взаємодія між світлом та мікроскопічними частинками переважно включає кілька різних механізмів розсіювання та поглинання. Коли фізичний розмір частинок значно менший ( $< 1/10$ ) за довжину хвилі світла, частинки викликають релєївське розсіювання світла, яке добре відоме як причина блакитного неба. Якщо розглядати частинки як сферичні об'єкти, інтенсивність розсіяного світла окремою частинкою в атмосфері в режимі релєївського розсіювання визначається як

$$I = I_0 \frac{1 + \cos^2 \theta}{2R^2} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \left( \frac{d}{2} \right)^6,$$

де  $I_0$  – інтенсивність падаючого світла;

$\theta$  – кут розсіювання;

$R$  – відстань від частинки;

$\lambda$  – довжина хвилі світла;

$n$  – показник заломлення частинки;

$d$  – діаметр частинки.

Релеївське розсіювання світла молекулою зумовлене світлоіндукованим дипольним моментом молекули, а інтенсивність розсіювання пов'язана з поляризованістю молекули за даними [11]

$$I = I_0 \frac{8\alpha^2}{R^2} \left( \frac{\pi}{\lambda} \right)^4 (1 + \cos^2 \theta),$$

де  $\alpha$  – поляризованість молекули.

Тому інтенсивність релеївського розсіювання критично залежить від довжини хвилі світла, а також від розміру розсіюючих частинок або властивості розсіюючих молекул.

Коли розмір частинок порівняний з довжиною хвилі світла, розсіювання світла більше не може бути описане релеївським розсіюванням, натомість застосовується теорія розсіювання Мі [10]. Багато типів аерозольних частинок у нижній частині атмосфери (пил, пилок, краплі води, морська сіль, дим тощо) мають діаметр  $\sim 1$  мкм, і тому вони викликають розсіювання Мі як на видиме, так і на інфрачервоне світло.

Релеївське розсіювання та розсіювання Мі є процесами пружного розсіювання. Непружне розсіювання, таке як комбінаційне розсіювання [12], також присутнє в атмосфері. Комбінаційне розсіювання в основному викликане молекулами, а зсув частоти між падаючим світлом та розсіяним світлом є характеристикою відповідної молекули. Отже, комбінаційне розсіювання може бути використане для ідентифікації молекул розсіювання в навколишньому середовищі, а також застосовується в різних системах LIDAR [2,13,14].

Окрім різних механізмів розсіювання, світло також може поглинатися частинками та молекулами. Фактично, процеси поглинання та розсіювання взаємопов'язані: одночасне поглинання світла пов'язане як з розсіюванням Релея, так і з розсіюванням Мі; а комбінаційне розсіювання можна розглядати як процес, що включає поглинання падаючого фотона з подальшим випромінюванням іншого фотона. Крім того, відносно сильне поглинання світла відбувається, коли енергія фотона знаходиться в резонансі зі специфічними електронними або коливальними та/або обертальними переходами, пов'язаними з молекулами. Системи LIDAR, засновані на молекулярній абсорбційній спектроскопії, також були широко досліджені.

Завдяки широкій різноманітності цікавих частинок і молекул, а також різним придатним для використання взаємодіям між світлом і речовиною, багато типів лазерів у широкому діапазоні частот, від ультрафіолетового до середнього інфрачервоного, використовувалися в різних типах систем лідарів [15]. Системи лідарів середнього інфрачервоного діапазону становлять особливий інтерес для виявлення великих аерозольних частинок (діаметром  $\gg 1$  мкм), які в основному присутні в прикордонному шарі атмосфери

#### 2.4 Зворотнє розсіювання LIDAR у середньому інфрачервоному діапазоні на основі квантово-каскадного лазера

Системи дистанційного зондування середнього інфрачервоного діапазону, продемонстровані досі, здебільшого являють собою системи з відкритим

шляхом, в яких для відбиття світлового сигналу назад використовується ретрорефлектор або твердий об'єкт [5,18]. Відсутність потужних імпульсних лазерів у середньому інфрачервоному діапазоні довжин хвиль обмежила реалізацію систем лідарів середнього інфрачервоного діапазону, заснованих на виявленні сигналу зворотного розсіяння (рис. 2.1) від частинок та/або молекул, який значно слабший, ніж сигнал від відбиття твердими об'єктами.

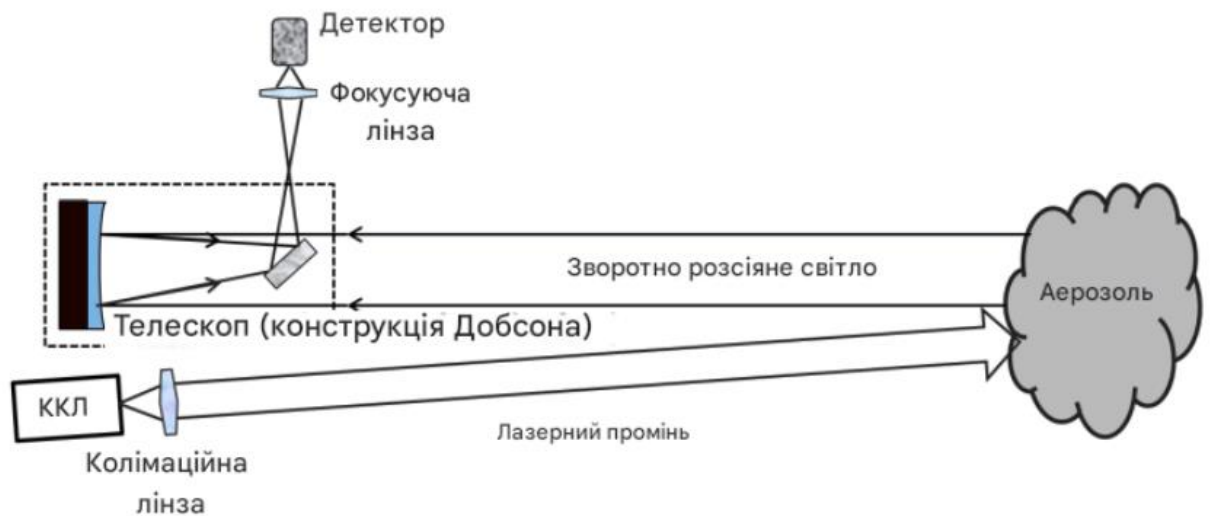


Рисунок 2.1 – Схематичне проектування системи зворотного розсіювання LIDAR.

2.5 Вертикально орієнтована система зворотного розсіювання LIDAR у середньому ІЧ-діапазоні для моніторингу аерозолів

Після демонстрації концепції системи лідару на основі ККЛ в середньому інфрачервоному діапазоні для виявлення сигналу зворотного розсіювання від штучного аерозолю, предстає вертикально орієнтована система лідару зворотного розсіювання на основі ККЛ, спрямовану на характеристику профілю відносно великих аерозольних частинок в прикордонному шарі атмосфери (найнижчий діапазон  $\sim 200$  м). Базова структура вертикально орієнтованої системи, показана на рис. 2.2, подібна до попередньої горизонтально

орієнтованої. Однак ця нова система лідару розроблена з коаксіальною конфігурацією, тобто вихідний колімований лазерний промінь рухається вздовж оптичної осі телескопа, щоб максимізувати функцію перекриття для всього діапазону виявлення. Для досягнення такої структури системи використовуються три дзеркала з позолотою для спрямування лазера вздовж потрібного шляху.

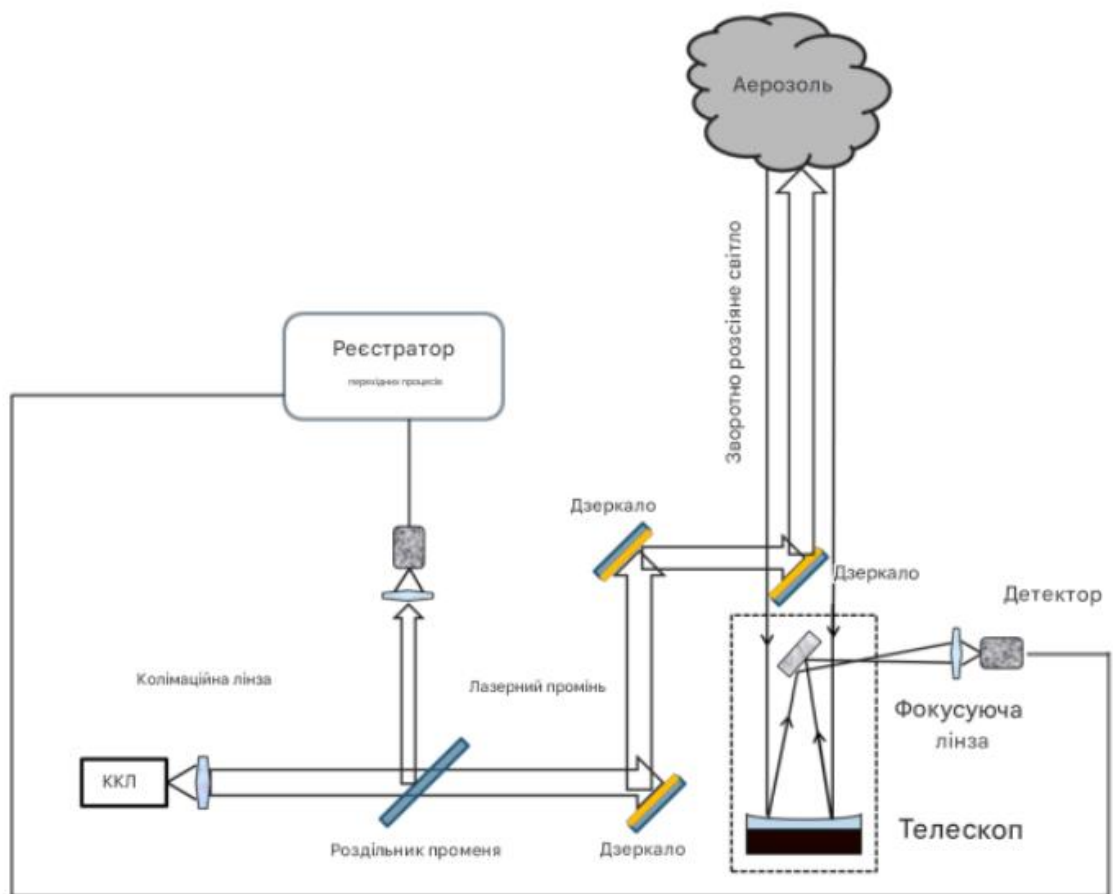


Рисунок 2.2 - Схема вертикально орієнтованої системи зворотного розсіювання на основі ККЛ для виявлення та характеристики аерозолів.

Для того, щоб розрізнити інформацію про час повернення сигналу, детектор та передпідсилювач повинні бути достатньо швидкими. Просторова та часова роздільна здатність вимірювання зрештою обмежена тривалістю лазерних імпульсів, щоб досягти такої межі роздільної здатності, час відгуку детектора

повинен бути значно меншим за тривалість імпульсу, а смуга пропускання передпідсилювача повинна бути значно більшою за обернену величину тривалості імпульсу. Раніше використовуваний детектор InSb, охолоджуваний рідким азотом, є дуже повільним порівняно з тривалістю лазерного імпульсу, тому не придатний для реальних застосувань LIDAR. У новій системі замість нього використовується термоелектрично охолоджуваний високочутливий детектор на основі МСТ з часом відгуку 15 нс.

Швидка еволюція сигналу зворотного розсіяння, розділеного детектором, потребує подальшої обробки в режимі реального часу, включаючи вибірку, усереднення та зберігання. Для виконання такого завдання в системі використовується самописець перехідних процесів (Licel TR40), спеціально розроблений для застосування LIDAR. З частотою вибірки 40 МГц межа роздільної здатності, встановлена тривалістю імпульсу ( $\geq 100$  нс), добре підтримується в процесі вибірки. Самописець перехідних процесів пов'язує вибіркового сигнал зворотного розсіяння з інформацією про дальність сигналу, ініціалізуючи процес вибірки щоразу, коли спрацьовує лазерний імпульс, та вибірку з високоточною частотою. Таким чином, точка даних  $n$ th, вибіркована в циклі, відповідає сигналу зворотного розсіяння, що генерується на відстані  $\sim n \times c \times 25\text{ns}/2$  від системи LIDAR.

Отже, для належного функціонування реєстратора перехідних процесів потрібен пусковий сигнал, синхронізований з лазерними імпульсами. У цій системі такий пусковий сигнал забезпечується виходом іншого швидкодіючого детектора, який контролює спрацьовування світлових імпульсів. Невелика частина (<5%) світлових імпульсів спрямовується на цей пусковий детектор незбалансованим розщеплювачем променя. Незбалансований розщеплювач променя, по суті, є вікном CaF<sub>2</sub> з просвітлювальним покриттям, і тому має пропускання понад 95%. Залишкове відбиття від вікна CaF<sub>2</sub> фокусується в пусковий детектор за допомогою іншої лінзи. Окрім забезпечення пускової функції для реєстратора перехідних процесів, пусковий детектор також

функціонує як опорний детектор для моніторингу коливань потужності світлових імпульсів.

### 3 АНАЛІЗ КВАНТОВО-КАСКАДНИХ ЛАЗЕРІВ З УРАХУВАННЯМ ЕЛЕКТРОННИХ І ОПТИЧНИХ МЕХАНІЗМІВ ОБМЕЖЕННЯ

#### 3.2 Сумісна дія електронного й оптичного обмеження

Власні значення енергії електронів у зоні провідності і на фоні зміни її профілю показані на рис. 3.1

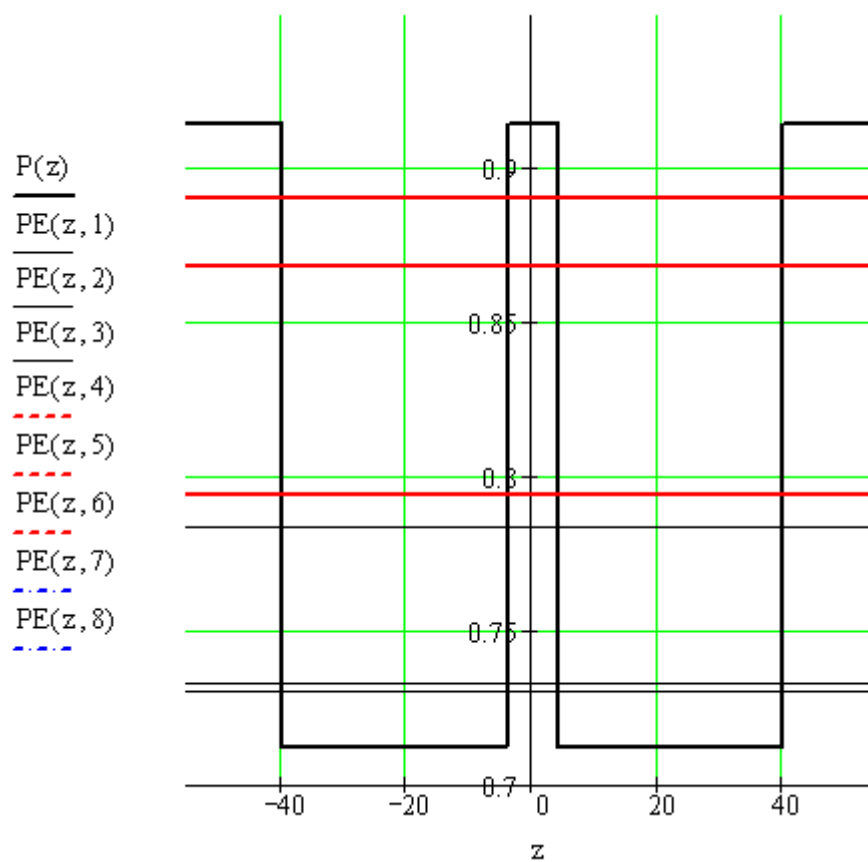


Рисунок 3.1 – Власні значення енергії електронів у зоні провідності

Функція густини електронних станів у зоні провідності, що відповідає спектру енергетичних рівнів, показаному на рис. 3.1, представлена на рис. 3.2.

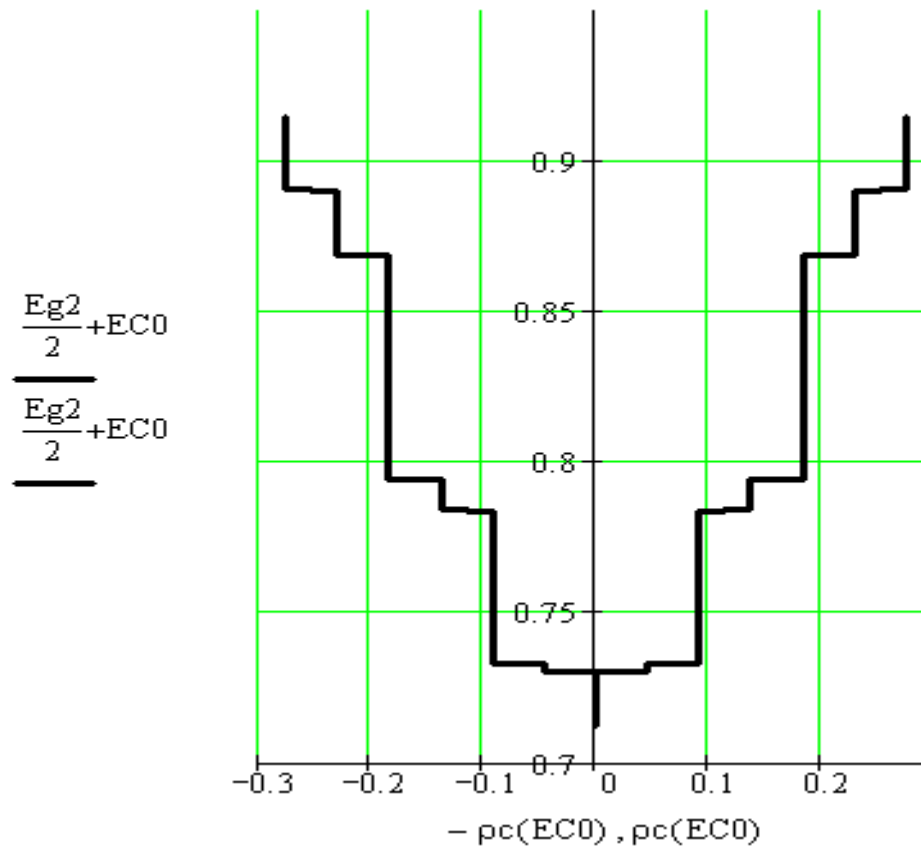


Рисунок 3.2 – Густина станів у зоні провідності для електронів

Аналіз результатів, отриманих в результаті моделювання енергетичних станів електронів, як представлено на рис. 3.1 та 3.2, показує, що існує нерівномірний розподіл власних значень енергії по всій глибині квантової ями. Цей характерний розподіл виникає завдяки можливостям тунелювання між цими енергетичними станами всередині квантово-обмеженого шару арсеніду галію та його відповідними станами всередині необмеженого матеріалу за потенційним бар'єром, що виникає через підбар'єрне проходження частинок без втрати їхньої енергії.

Ці механізми безпосередньо впливають на ступінь локалізації електронів в області квантового обмеження: зі збільшенням енергії частинки та наближенням її стану до континууму її локалізація в квантовій ямі зменшується. Така тенденція підтверджується просторовою щільністю ймовірності розподілу частинок у зоні квантового обмеження, як зображено на рис. 3.3.

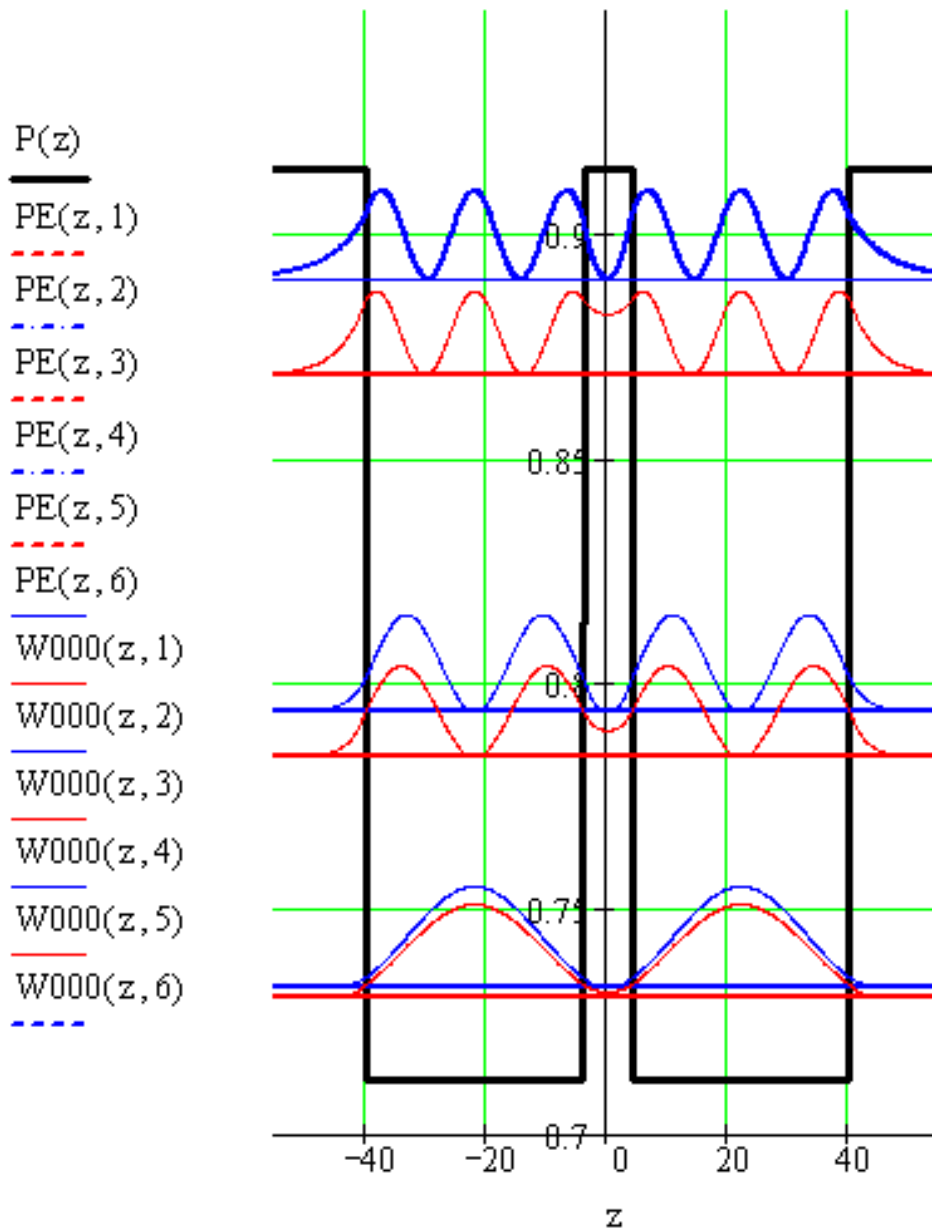


Рисунок 3.3 – Густина розподілу ймовірності електронів у зоні провідності в галузі квантового обмеження

У роботі квантового каскадного лазера на активну область впливає зовнішнє електричне поле джерела накачування. Щоб проаналізувати, як це поле впливає на енергетичний профіль досліджуваної структури, у цій роботі ми застосували друге наближення теорії малих збурень. Зміни в енергетичному профілі структури, а також у просторовому розподілі хвильових функцій електронів, розраховані в рамках другого наближення теорії збурень, проілюстровано на рис. 3.4.

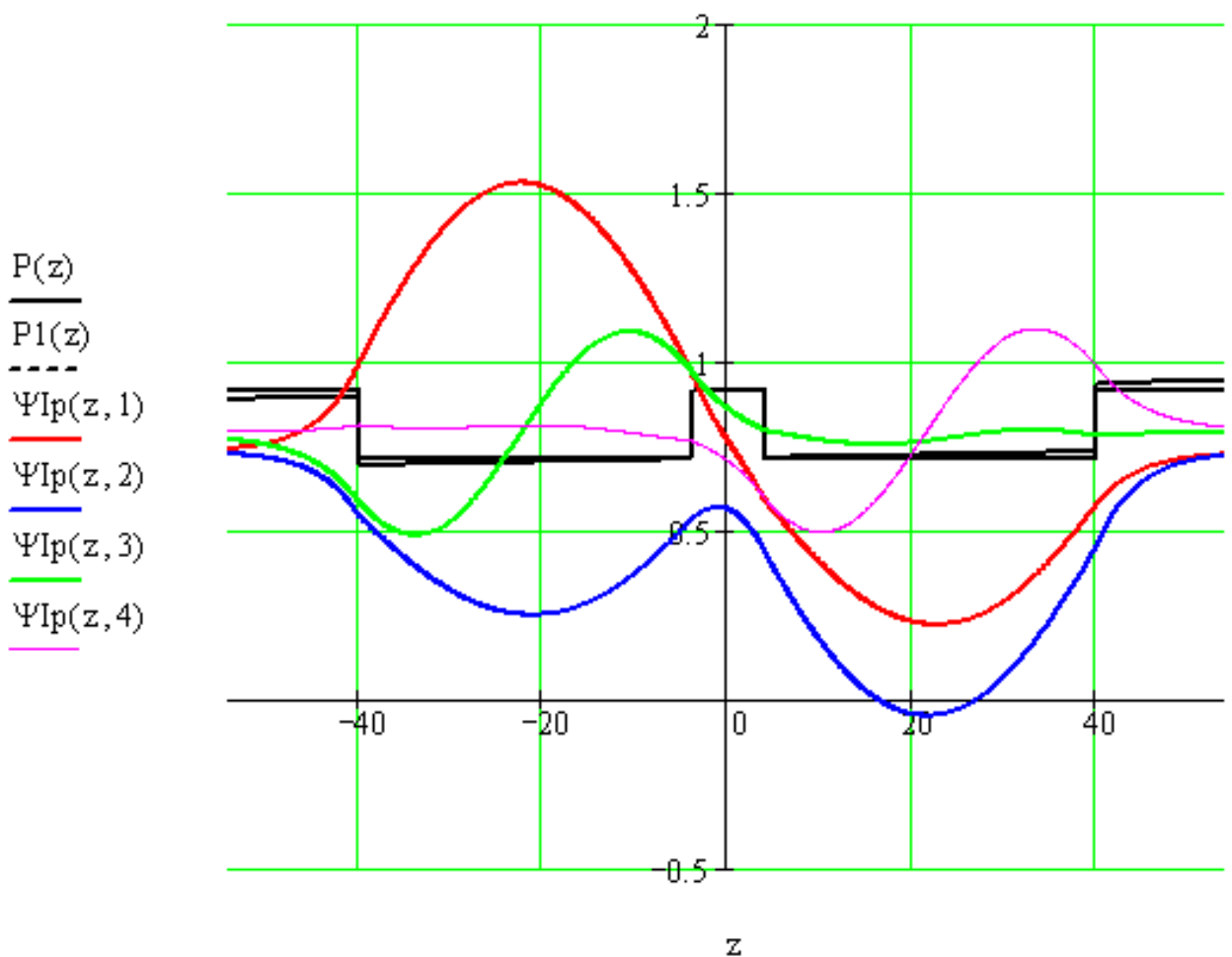


Рисунок 3.4 – Хвильові функції електронів у зоні провідності квантово-обмеженого вузькозонного матеріалу

Результати числового моделювання, описані на рисунках 3.3 та 3.4, чітко вказують на те, що під впливом зовнішнього статичного електричного поля відбувається зміна парності між хвильовими функціями частинок та квазічастинок. Це призводить до перерозподілу щільності ймовірності щодо їх просторової локалізації всередині квантово-обмежених шарів.

Зокрема, стани, пов'язані з першим, третім, п'ятим тощо енергетичними рівнями, локалізовані переважно в «лівій» квантовій ямі, а стани, пов'язані з другим, четвертим, шостим та наступними парними енергетичними рівнями, зосереджені в «правій» квантовій ямі. Такий характер перерозподілу виникає через специфічність зовнішнього електричного впливу, тобто лінійної зміни напруги в активній області та її непарної залежності від координати.

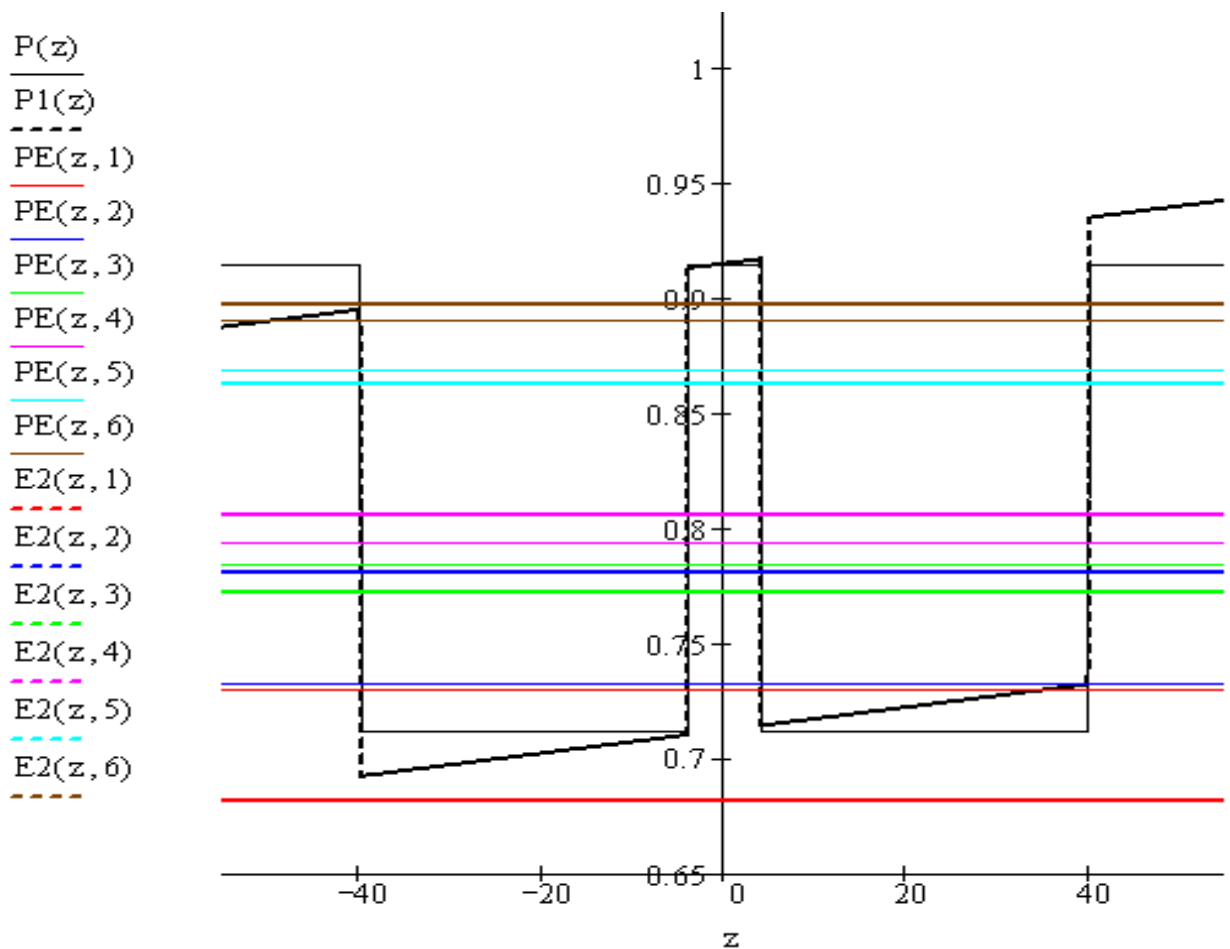


Рисунок 3.5 – Зміна власних значень енергії електронів під впливом зовнішнього електричного поля

Вже з рисунку 3.5 видно, що під дією зовнішнього стаціонарного електричного поля явище квантово-обмеженого ефекту Штарка проявляється при квантуванні чітко: енергетичний інтервал між двома сусідніми квазічастинками збільшується. Нам, з боку, як описано вище, ефект подвоєння енергетичних рівнів: більшість частинок між близькими близьким за енергією станами в сусідніх квантових ямах, суттєве зміщення перший рівень у меншенеграфики. Другий енергетичний рівень на таку саму величину зміщує у протилежний від першого напрямком додатково: в переносятьці у верхню сторону. Така ж властивість проявляється також на третьому, четвертом і вище енергетичних рівнях частинок або квазічастинок.

В результаті зміни хвильових функцій змінюється і густина електронних станів. Це призводить до локальних змін діелектричної проникності та показника заломлення. Схема одночасного електронного та оптичного обмеження не завжди найкраща з точки зору енергії для створення лазера. Щоб розділити електронне й оптичне обмеження, потрібні квантово-обмежені структури з більш складною будовою.

### 3.3 Роздільне оптичне та електронне обмеження

В якості прикладу квантово-розмірної конструкції розглянемо п'ятишарову структуру, показану на рисунку 3.6. На рисунку 3.6 (а) ви можете побачити загальний вигляд цієї структури, а на рисунку 3.6 (б) – її енергетичну діаграму. Для створення цієї структури використані напівпровідникові матеріали GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As.

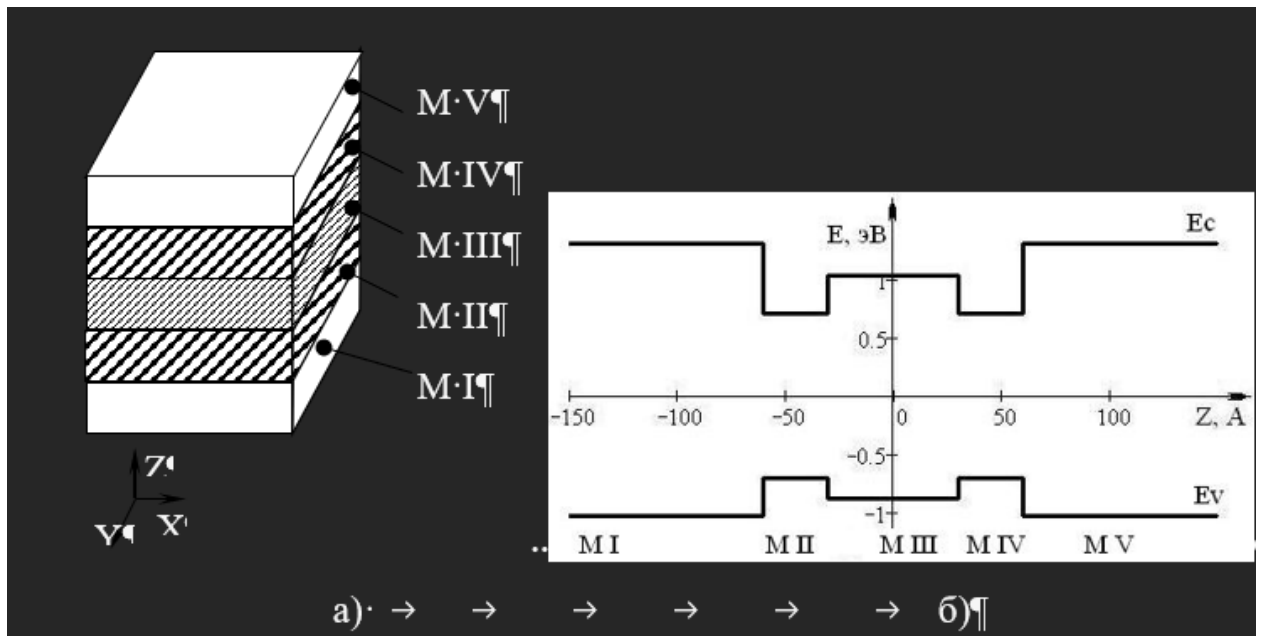


Рисунок 3.6 – Енергетична діаграма та загальний вигляд п'ятишарової структури

Перший та п'ятий шари структури, M I та M V, виконані з твердого розчину  $\text{Al}_x \text{Ga}_{1-x} \text{As}$  з максимальною кількістю алюмінію. Це забезпечує їм найбільшу ширину забороненої зони та, відповідно, найвищі потенційні бар'єри для електронів і дірок по всій структурі.

Другий і четвертий шари, M II та M IV, навпаки містять мінімальну кількість алюмінію або повністю складаються з GaAs, тому вони набувають поведінки прямокутних квантових ямів для носіїв обох типів.

Третій шар (M III) має проміжний вміст алюмінію — більше, ніж другий і четвертий, але менше, ніж перший і п'ятий. Через це між першим і п'ятим шарами, а також над потенційним бар'єром третього шару, формується зона квазі-континууму. У цій зоні носії в другому та четвертому шарах відчують квантове обмеження, оскільки товщина цих шарів менша за довжину хвилі де Бройля. Бар'єри при цьому відносно тонкі й вважаються проникними. Загальна відстань між крайніми бар'єрами (першим і п'ятим шарами) може бути близькою до розмірів об'ємного зразка.

Результати розрахунку рівнів власної енергії електронів у зоні провідності показано на рисунку 3.7 (а). Відповідні стаціонарні власні функції електронів, що відповідають цим рівням енергії, показано на рисунку 3.7 (б).

Коли зовнішнє електричне поле діє на квантово-вимірну структуру з енергетичним профілем складної форми, стани частинок в області квазіконтинууму зазнають суттєвих змін, спричинених, з одного боку, силою прикладеного зовнішнього поля, а з іншого боку, додатковою потенційною енергією, яку ці частинки мають у цій області. Відстежувати зміни, що відбуваються всередині структури під дією зовнішнього електричного поля, за допомогою другого наближення теорії збурень може бути відносно легко.

На рис. 3.8 (а) та 3.8 (б), відображені власні значення енергії та власні функції електронів у зоні провідності, розраховані для випадку впливу зовнішнього стаціонарного електричного поля.

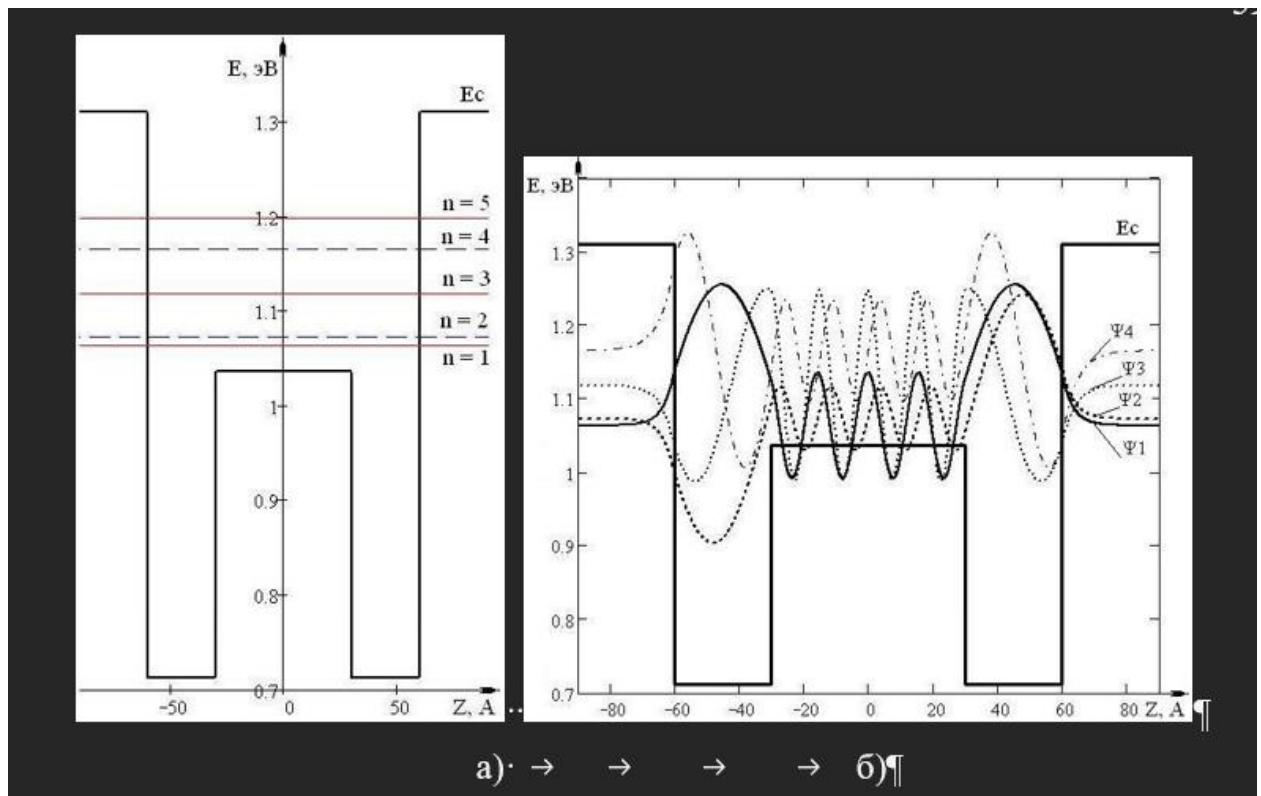


Рисунок 3.7 - Власні значення енергії електронів та функції у стаціонарному стані

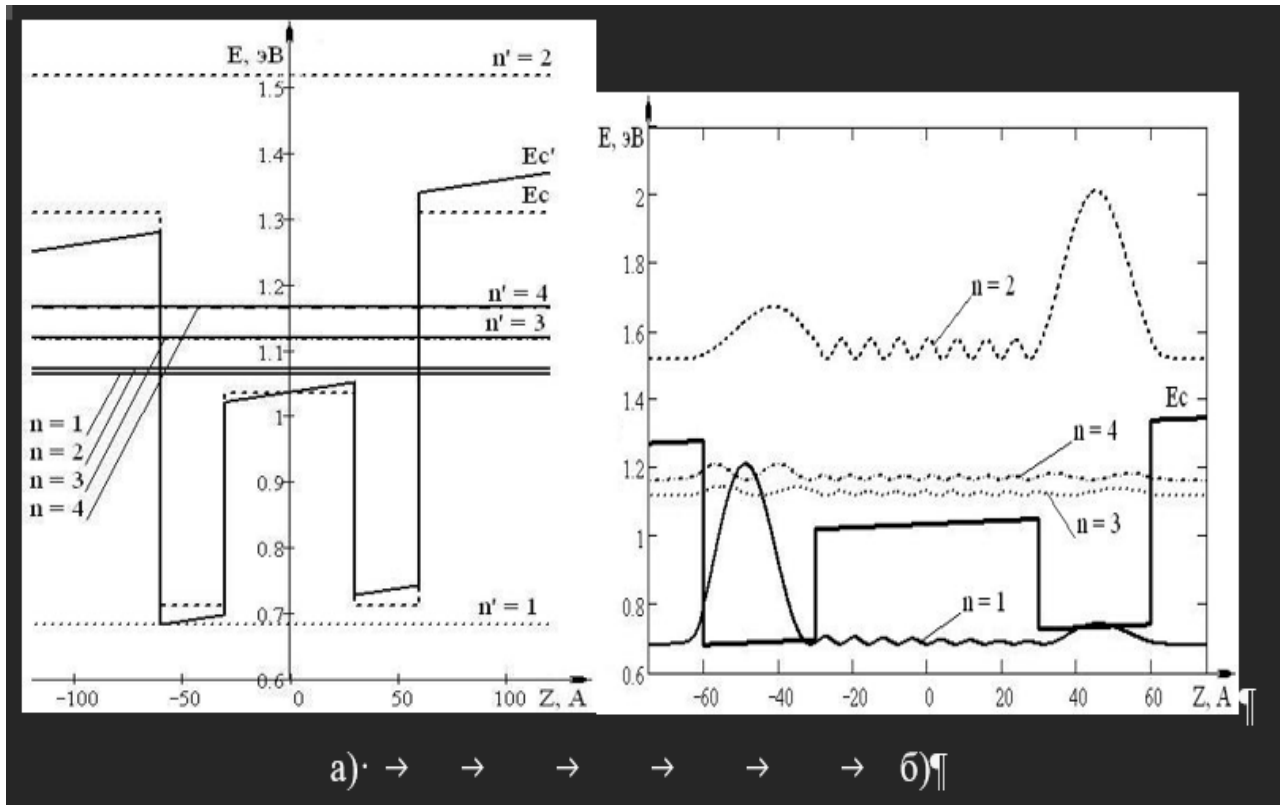


Рисунок 3.8 – Власні значення енергії електронів та функції у випадку впливу на зовнішнє поле

На рис. 3.8(а) для порівняння стаціонарні стани електронів представлені суцільними лініями. Аналіз власних значень та власних функцій носіїв заряду в квантово-вимірній структурі з енергетичним профілем складної форми, розрахований як для стаціонарного стану, як показано на рис. 3.7, так і у випадку під дією деякого зовнішнього стаціонарного електричного поля, як представлено на рис. 3.8, дає такі результати:

– у стаціонарних носіях заряду частинки, розташовані в області квазіконтинууму, мають різко немонотонно зростаючий спектр власних значень енергії та локалізовані в області квантових ям;

– квазіконтинуальний простір містить частинки з вищою енергією, ніж перші два стани, і вони локалізовані більш рівномірно. Під дією зовнішнього постійного електричного поля квантово-обмежений ефект Штарка проявляється дещо інакше, ніж в одношарових структурах або симетричних багат шарових структурах (рис. 3.4, 3.5). Тут перші два енергетичні рівні також найбільш схильні до зовнішнього впливу, але водночас вплив зовнішнього поля проявляється набагато різкіше, тоді як для вищих рівнів цей вплив майже непомітний.

– вплив зовнішнього поля також пов'язаний із сильною делокалізацією носіїв на перших двох рівнях, не змінюючи парності станів.

Таким чином, в ККЛ – лазерні оптичні переходи відбуваються між першими двома рівнями – з максимальною делокалізацією станів, тоді як інверсія населеності накопичується на вищих станах в області квазіконтинууму.

## ВИСНОВКИ

Особливості характеристик випромінювання ККЛ дають можливість використовувати їх для атмосферних оптичних ліній зв'язку, також подібні випромінювачі опанували широке конкретне використання у області оборонних пристроїв, забезпечення безпеки, впровадження у медицині та біотехнологіях, контролю навколишнього середовища, досліджень спектрів у інфрачервоному діапазоні.

Базовими відмінностями ККЛ у порівнянні з традиційними лазерними діодами є:

- внутрішньозонні переходи електронів між рівнями, що призводить до випромінювання фотонів у квантово-розмірних структурах;
- наявність каскадного випромінювання квантів світла;
- частота, а отже і енергія генерації не залежить від ширини забороненої зони матеріалу, що дає можливість використовувати технологічні та добре відпрацьовані сполуки;
- інтенсивність випромінювання залежить, здебільшого від кількості каскадів і значно перевищує її амплітуду у традиційних лазерних джерел;
- розглянуті випромінювальні структури працюють у області ближнього, середнього та далекого ІЧ-діапазонів (3,4 – 25 мкм), а також у діапазоні 1,5–5 ТГц;
- типові значення потужності у середньохвильовому ІЧ діапазоні за температури 300 К в безупинному режимі випромінювання на сьогодні досягають значень 4 Вт, а значення потужності генерації комерційних поодиноких ККЛ в діапазоні довгохвильового ІЧ випромінювання перевищує 1 Вт;
- у діапазоні декількох терагерць частот за температури 300 К в безупинному режимі випромінювання на сьогодні отримано потужність випромінювання 0,2 мВт, а в імпульсному режимі – 1 Вт

У результаті виконання кваліфікаційної роботи розглянуто різні модифікації квантово-каскадних лазерів на основі надрешітки. Виконано моделювання декількох варіантів наноструктури – арсенід галію/алюміній – галій арсенід з різною товщиною шарів, та з параметрами квантово-обмежених шарів згідно завдання.

Результати дослідження підтверджують високу ефективність ККЛ, здатність успішно конкурувати з традиційними структурами у діапазоні ІЧ випромінювання, а також у діапазоні 1...5 ТГц.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. A.V. Babichev, A.G. Gladyshev, A.S. Kurochkin, E.S. Kolodeznyi, G.S. Sokolovskii, V.E. Bougrov, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, A.G. Bousseksou, A.Yu. Egorov. // *Semiconductors*, 52(8), 1082 (2018).
2. V.V. Dudelev, D.A. Mikhailov, A.V. Babichev, A.D. Andreev, S.N. Losev, E.A. Kognovitskaya, Yu.K. Bobretsova, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin, A.G. Gladyshev, D.V. Denisov, I.I. Novikov, L.Ya. Karachinsky, V.I. Kuchinskii, A.Yu. Egorov, G.S. Sokolovskii. // *Quantum Electron.*, 50(2), 141 (2020).
3. E. Luzhansky, F. S. Choa, S. Merritt, A. Yu, M. Krainak. In: *Laser Radar Technology and Applications XX; and Atmospheric Propagation XII*, 9465, *Int. Soc. Opt. Photon.*, 2015, May (2015).
4. Основи наноелектроніки: Навчальний посібник / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук. – Вінниця: ВНТУ, 2016.
5. Іваненко І.І., Гаврилюк С.С., & Каспрук Я.Г. (2010). *Квантова електродинаміка напівпровідникових лазерів*. Київ: Наукова думка.
6. Мазур Ю.І., & Лозовський А.А. (2012). *Основи фізики напівпровідникових лазерів*. Харків: Каразінський університет.
7. *Наноелектроніка. Квантово-механічні засади, структури, фізичні властивості: Н25 навч. посіб.* / Д.М. Заячук, Ю.І. Якименко, В.М. Співак, О.В. Богдан, А.Т. Орлов, В.М. Коваль. — К.: Кафедра, 2013. — 428 с., іл.
8. A. Pashchenko, O. Gritsunov, O. Babichenko Energy states of particles in a quantum sized structure with a complex shaped band diagram // *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries № 4 (14)*, 2020 p. 176-185; (DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.176>).
9. S. Adachi, *J. Appl. GaAs, AlAs, and Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As: Material parameters for use in research and device applications* .Phys. 58 (1985) R1.
10. Kira M., & Koch S.W. (2011). "Semiconductor Quantum Optics." Cambridge University Press.

11. Luo G.P., Peng C., Le H.Q., Pei S.S., Hwang W.-Y., Ishaug B., Um J., Baillargeon J.N., Lin C.-H. // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 78. P. 2834–2836.
12. Williams, B. S., Kumar, S., Hu, Q., & Reno, J. L. (2007). Operation of terahertz quantum-cascade lasers at 164 K in pulsed mode and at 117 K in continuous-wave mode. *Optics Express*, 15(1), 113-128.
13. Kumar, S., Williams, B. S., Hu, Q., & Reno, J. L. (2010). Terahertz quantum-cascade lasers. *Nature Photonics*, 4(12), 610-618.
14. Siebert, K. J., Lee, A. W., & Holonyak Jr, N. (1994). Quantum-well infrared photodetector. *Applied Physics Letters*, 64(16), 2082-2084.
15. Agrawal, G. P. Gain nonlinearities in semiconductor lasers: Theory and application to distributed feedback lasers / G. P. Agrawal // *IEEE J. Quant. Electron.* – 1987. – Vol. 23, № 6. – P. 860–868.
16. Quantum cascade lasers with double metal-semiconductor waveguide resonators / K. Unterrainer [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2002. – Vol. 80, № 17. – P. 3060–3062.
17. Huang, J. Gain and saturation in semiconductor lasers / J. Huang, L. W. Casperson // *Opt. Quant. Electron.* – 1993. – Vol. 25, № 6. – P. 369–390.
18. Галат О. Б. Розрахунок поглинальної здатності сонячного фотоперетворювача на основі  $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$  // *Радіотехніка : Всеукр. міжвідом. наук.-техн. зб.* 2017. Вип. 190. С. 44–49.
19. Натарова Ю. В., Галат А. Б. Поглинальна здатність найбільш перспективних матеріалів сонячних фотоперетворювачів // *Радіоелектроніка та молодь у ХХІІ столітті : зб. тез доп. ХХІ Харків. конф. молодих науковців*, 17–19 квіт. 2018 р. Харків, 2018. С. 45.