

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки
Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)
Кафедра Кафедра мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ЛАЗЕР З КВАНТОВОЮ РОЗМІРНОЮ
СТРУКТУРОЮ
(тема)

Виконав:

студент 2-го курсу, групи МНПм-22-1

Бутенко Олексій Тарасович
(прізвище, ініціали)

Спеціальність

153 Мікро- та наносистемна техніка
(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма

Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. МЕЕПП Пашенко О.Г.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

_____ Бондаренко І.М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2023 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
Кафедра мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна техніка
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри МЕЕПІ
Бондаренко І.М.
(підпис)
« » 2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Бутенко Олексій Тарасович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Напівпровідниковий лазер з квантовою розмірною структурою»
затверджена наказом по університету від «20» 11 2023 року № 1368 Ст

2. Термін подання студентом роботи 15.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи

3.1 Квантово-каскадний лазер на основі двохперіодної наноструктури;

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

3.3 Ширина квантово-обсежених шарів – 40 ангстрем;

3.4 Ширина розділювальних бар'єрів – 10 ангстрем.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Елементна база фотоніки;

4.2 Квантові наноструктури і надградки;

4.3 Напівпровідниковий лазер з квантовою розмірною структурою;

4.4 Особливості квантово-каскадних лазерів з урахуванням електронного та оптичного обмеження;

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів,
комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)

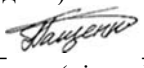
Презентація (слайди) 17 аркушів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Найменування роботи	Зміст роботи	Термін виконання
Проведення теоретичних досліджень	Надгратки теорія і застосування	До 20.10.2023
	Інжекційні напівпровідникові лазери на основі квантових розмірних структур	До 20.10.2023
	Квантово-каскадні лазери	До 25.10.2023
	Виробництво і застосування квантово-каскадних лазерів	До 30.10.2023
Проведення експериментальних досліджень	Дослідження ККЛ з сумісним електронним і оптичним обмеженням	До 10.11.2023
	Дослідження ККЛ з роздільним електронним і оптичним обмеженням	До 15.11.2023
	Вплив зовнішнього електричного поля на наноструктури з різною внутрішньою будовою	До 20.11.2023
	Генерація оптичного випромінювання у ККЛ з різними наноструктурами	До 25.11.2023
Впровадження результатів наукових досліджень	Підготовка пояснювальної записки	До 25.12.2023
	Подання роботи на кафедру	До 30.12.2023

Дата видачі завдання 25 вересня 2023 р.

Студент  Бутенко О.Т.

Керівник роботи  (підпис) доц. Пащенко О.Г.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота містить: 64 с., 31 рис., 5 табл., 17 джерел.

ГЕТЕРОСТРУКТУРА, ПОТЕНЦІЙНА ЯМА, ПОТЕНЦІЙНИЙ БАР'ЄР,
ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РІВЕНЬ, ГУСТИНА СТАНІВ, НАНОСТРУКТУРА,
ГЕНЕРАЦІЯ СВІТЛА, КВАНТОВИЙ КАСКАД

Об'єкт дослідження – напівпровідниковий квантово-каскадний лазер.

Мета роботи – обґрунтувати вибір типу наноструктури для створення квантового каскаду в активній області квантово-каскадного лазера.

Метод дослідження – порівняльний аналіз розподілу квантових станів у багатошарових квантових розмірних структурах різних конструкцій на підставі математичного моделювання.

Актуальність теми дослідження обумовлена тим, що ККЛ є перспективним напрямком розвитку напівпровідникових лазерів. Використання ККЛ дозволяє поліпшити характеристики лазерних випромінювачів і розширити можливості їх застосування.

ABSTRACT

The qualification work contains: 64 pages, 31 figures, 5 tables, 17 sources.

HETEROSTRUCTURE, POTENTIAL WELL, POTENTIAL BARRIER, ENERGY LEVEL, DENSITY OF STATES, NANOSTRUCTURE, LIGHT GENERATION, QUANTUM CASCADE

The object of research is a semiconductor quantum cascade laser.

The purpose of the work is to justify the choice of the type of nanostructure for creating a quantum cascade in the active region of a quantum cascade laser.

The research method is a comparative analysis of the distribution of quantum states in multi-layered quantum dimensional structures of various structures based on mathematical modeling.

The relevance of the research topic is due to the fact that QCL is a promising direction in the development of semiconductor lasers. The use of QCL allows to improve the characteristics of laser emitters and expand the possibilities of their application.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП	8
1 ЕЛЕМЕНТНА БАЗА ФОТОНІКИ.....	9
1.1 Конструкції лазерних діодів з кантовою розмірною структурою.....	9
1.2 Приймачі оптичного випромінювання	13
1.3 Оптичні підсилювачі.....	15
1.5 Суперлюмінесцентні діоди	16
2 КВАНТОВІ НАНОСТРУКТУРИ І НАДГРАДКИ.....	19
2.1 Основні характеристики двовіірних напівпровідникових наноструктур	19
2.2. Прямокутна потенційна яма скінченної глибини	22
1.3 Надгратки	24
2.4 Лазери на основі напівпровідникових гетероструктур	28
2.5 Лазери на основі напівпровідникових квантових ям	29
3 НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ЛАЗЕР З КВАНТОВОЮ РОЗМІРНОЮ СТРУКТУРОЮ.....	32
3.1 Інжекційні напівпровідникові лазери із квантовими розмірними шарами	32
3.2 Оптичне підсилення лазерного випромінювання.....	40
3.3 Квантово-каскадні лазери.....	42
4 ОСОБЛИВОСТІ КВАНТОВО-КАСКАДНИХ ЛАЗЕРІВ З УРАХУВАННЯМ ЕЛЕКТРОННОГО ТА ОПТИЧНОГО ОБМЕЖЕННЯ	52
4.1 Сумісне електронне та оптичне обмеження.....	52
4.2 Роздільне електронне та оптичне обмеження	57
ВИСНОВКИ.....	61
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	63
ДОДАТОК А.....	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК Б	Ошибка! Закладка не определена.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І
ТЕРМІНІВ

- 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

В сучасному інформаційному суспільстві напівпровідникові лазери з квантовою розмірною структурою (КРС) стали ключовими компонентами для низки технологічних застосувань, що охоплюють від телекомунікацій до медицини та обчислювальної техніки. Ці інноваційні пристрої відзначаються унікальними властивостями, зумовленими квантовими ефектами, які мають місце у структурі таких пристроїв. Магістерська робота присвячена вивченню та аналізу фізичних принципів, що лежать в основі функціонування напівпровідникових лазерів з квантовою розмірною структурою. Метою даного дослідження є розкриття особливостей та потенційних переваг цих лазерів у порівнянні з традиційними варіантами, а також вивчення їхнього впливу на сучасні технологічні виклики. Детальний аналіз властивостей квантових точок та інших елементів квантової розмірної структури дозволить зрозуміти механізми генерації та підсилення світла в цих пристроях, а також визначити можливості для подальшого вдосконалення їхнього функціоналу. Дана робота покликана додати свій внесок у розширення теоретичних відомостей та експериментальних даних в галузі напівпровідникових лазерів з квантовою розмірною структурою, а також надати підставу для подальших досліджень та розвитку цієї технологічно важливої галузі.

Актуальність теми дослідження обумовлена тим, що ККЛ є перспективним напрямком розвитку напівпровідникових лазерів. Використання ККЛ дозволяє поліпшити характеристики лазерних випромінювачів і розширити можливості їх застосування.

Мета дослідження - дослідити новий тип напівпровідникового лазера з КРС із заданими характеристиками.

Для досягнення поставленої мети необхідно вивчити теоретичні основи роботи напівпровідникового лазера. Провести експериментальні дослідження напівпровідникового лазера з активною областю, створеною на основі КРС.

1 ЕЛЕМЕНТНА БАЗА ФОТОНІКИ

1.1 Конструкції лазерних діодів з кантовою розмірною структурою

Сучасні інформаційні мережі не можна уявити без застосування в них елементів фотоніки. Прикладом цього є те, що напівпровідникові лазери, приймальні та передавальні оптичні модулі та підсилювачі уможливили революційне перетворення в галузі засобів зв'язку (замінивши провідні та кабельні лінії на волоконно-оптичні) у пристроях запису, зберігання, передачі та обробки інформації.

Виходячи з цього, в основу фізичних принципів конструювання інжекційних лазерів для телекомунікацій, спектроскопії високої роздільної здатності, а також інших застосувань закладено такі вимоги: безперервний та імпульсний режими роботи, низький пороговий струм, широка смуга модуляції, лінійна залежність потужності випромінювання від струму, малі шуми, великий ресурс роботи.

Епітаксіальна структура з п'ятьма квантовими ямами на довжину хвилі 1550 нм представлена на рис. 1.1 – одна з найбільш поширених моделей.

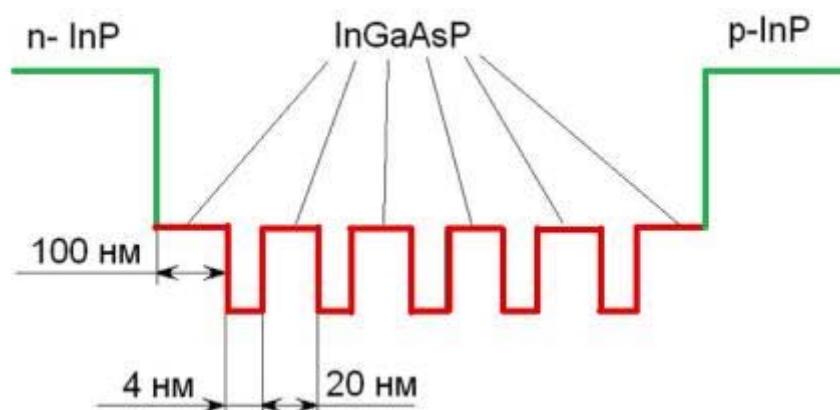


Рисунок 1.1 – Енергетична діаграма активної області епітаксійної структури ЛД з 5 квантовими ямами

Лазери виготовлялися з квантово- розмірних епітаксійних структур на основі фосфіду індію з використанням МОС – гідридної технології. Конструкція активного елемента лазерного діода показано на рис. 1.2 і 1.3 відповідно. Лазерні модулі генерують випромінювання на довжині хвиль від 405нм до 1650 нм.

Більшість лазерів для зв'язку мають резонатори Фабрі-Перо. Однак, останніми роками в магістральних лініях зв'язку на великі відстані для високошвидкісних волоконно-оптичних систем передачі стали використовувати лазери з резонаторами з розподіленим зворотним зв'язком (РЗЗ).

У лініях зв'язку із спектральним ущільненням каналів потрібні динамічно стабільні режими одночастотного лазера із дуже вузькою спектральною лінією. Цим вимогам найбільше відповідають лазери з розподіленими бреггівським дзеркалами (РБЗ) з шириною лінії генерації менше 1 МГц.

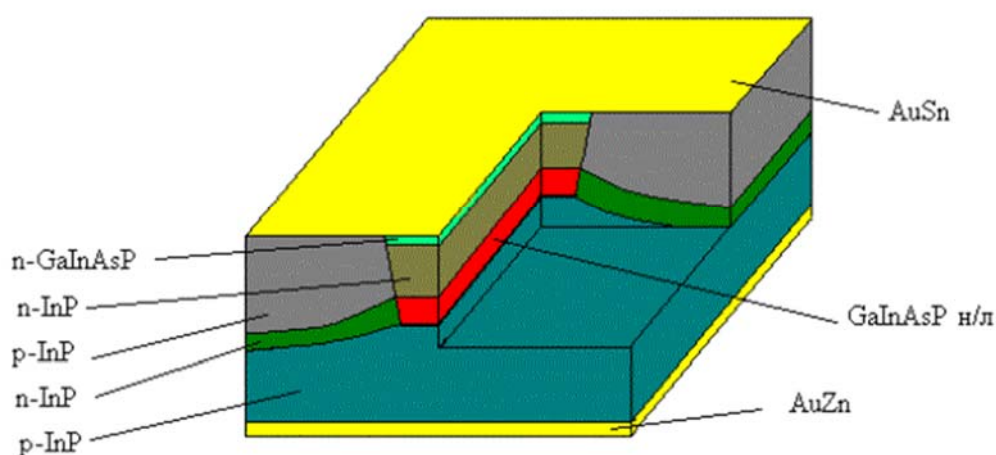


Рисунок 1.2 – Конструкція ЛД із зарощеною мезоструктурою

Найбільш повно вимогам телекомунікацій відповідають лазери із довжиною хвилі випромінювання 1,3 мкм та 1,55 мкм. Ватт-амперні характеристики лазерного діода в діапазоні температур із довжиною хвилі 1,3 мкм представлені на рис. 1.4. Лазери працюють до температури плюс 60 градусів Цельсія без охолодження та мають потужність випромінювання до 200 мВт.

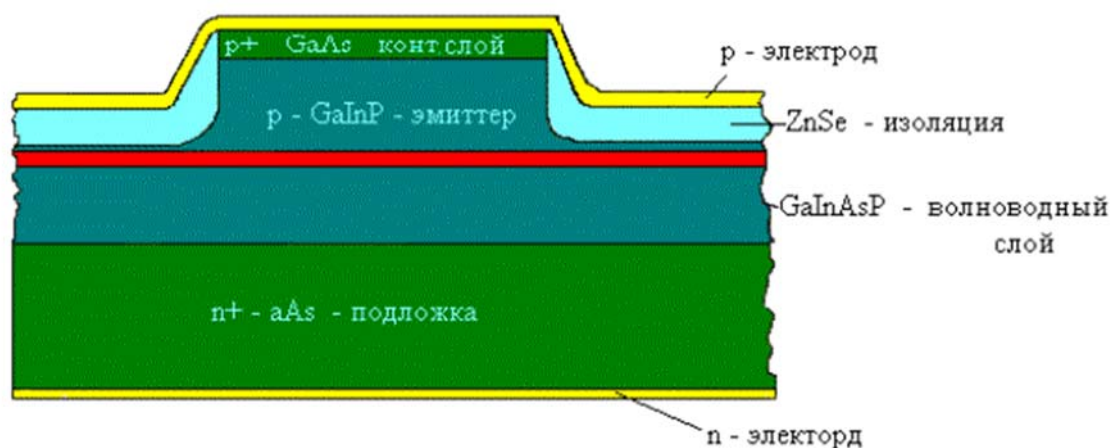


Рисунок 1.3 – Конструкція ЛД з гребенеподібним хвилеводом

Важливою економічною та технічною проблемою є введення волоконно-оптичних систем зв'язку (кабельне телебачення, мережі передачі даних, телефони та ін.) у кожную квартиру. Для цих цілей потрібні лазери, що мають підвищену надійність і малу собівартість. Для цього використовуються також лазери з довжиною хвилі 1300 нм і 1550 нм. Мінімальне значення порогового струму цих лазерів досягнуто 3–5 мА. За спектральним складом використовуювані лазери у зв'язку можуть мати багатомодовий, так і одномодовий в ідеалі - одночастотний режим генерації в залежності від швидкості і дальності передачі інформації. Діапазон довжин хвиль лазерів, що випускаються, збільшений до 1650 нм.

У волоконно-оптичних лініях зв'язку велике поширення набули конструкції лазерних модулів типу «ДІЛ» або «Баттерфляй» (міжнародний стандарт). Зовнішній вигляд цих модулів показано на рис. 1.5.



Рисунок 1.5 – Конструкції лазерних модулів 14 pinDIL і Batterfly

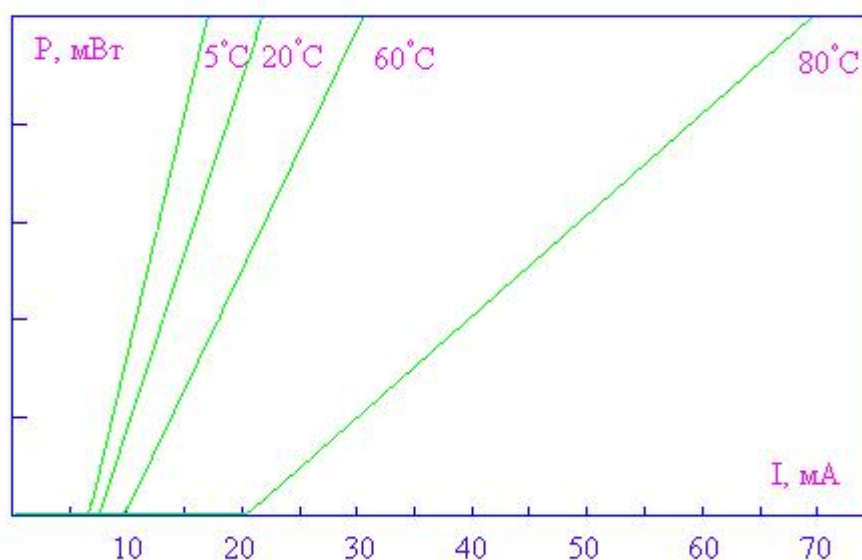


Рисунок 1.4 – Ватт-амперні характеристики лазерного модуля

Основними елементами лазерного модуля є лазерний діод, мікроходильник, фотодіод зворотного зв'язку, оптичний ізолятор, одномодовий світловод зі сферичною або з циліндричною лінзою на кінці світловода [1].

Одночастотні напівпровідникові лазери з волоконно-брегівськими ґратами (волоконно-брегівським резонатором ВБР) з шириною лінії випромінювання менше 100 кГц мають можливість перебудови довжини хвилі випромінювання в межах 3 нм від номінальної [2]. Основні параметри лазерних модулів з ВБР наведено у таблиці 1.1.

Одночастотні лазери з ВБР застосовуються в оптичних лініях зв'язку, спектроскопії високої роздільної здатності, медицині, екології.

Таблиця 1.1 – Основні параметри лазерних модулів з ВБР

Довжина ворони, нм	Потужність, мВт	Ширина лінії, кГц
650-670	5...10	<100
700-790	5...20	<100
800-850	5...20	<100
900-980	5...40	<100
1020-1090	5...50	<100
1270-1330	5...20	<100
1510-1570	5...100	<100
1620-1650	5...10	<100

Ресурс роботи лазерних модулів становить понад 500000 год., швидкість передачі – до 2500 Гбіт/сек і більше.

1.2 Приймачі оптичного випромінювання

Поряд із лазерними діодами у волоконно-оптичних лініях зв'язку велике місце займають приймачі оптичного випромінювання. В даний час вітчизняною промисловістю створені приймачі випромінювання у спектральному діапазоні від ультрафіолету до глибокої інфрачервоної області, що працюють у діапазоні швидкостей прийому до 2,5 Гбіт/с.

Найбільш широке застосування у волоконно-оптичних лініях зв'язку знайшли застосування приймальні оптичні модулі на основі р- і n- фотодіодів з довжиною хвилі випромінювання 500–1600 нм.

Для високошвидкісних ВОСП розроблено приймальні модулі, що мають у своєму складі твердотільний підсилювач зі смугою до 2.5 ТГц.

Основні параметри приймального модуля ФДМ-14-2К та приймального модуля з підсилювачем ФДМ-1 представлені в таблицях 1.2 та 1.3.

Зовнішній вигляд конструкції зазначених модулів наведено на рис. 1.6. Модулі мають волоконно-оптичний вихід з конектором типу FC / PC як в одномодовому, так і в багатомодовому виконанні.

Таблиця 1.2 – Основні параметри приймального модуля ФДМ-14-2К

Температура		25 °C		
		Мін	Тип	Макс
Чутливість	А/Вт	0,9	0,95	1,0
Темновий струм	нА	0,5	1	2
Зворотна напруга	В	5	10	30
Довжина хвилі	нм	1000	1300	1700
Місткість	пФ	0,5	1	2

Таблиця 1.3 – Основні параметри приймального модуля ФДМ-1

Параметр	MIN	TYPICAL	MAX	Unit
Довжина хвилі	1200	1550	1600	нм
Динамічний діапазон	-39	-	+3	dBm
Чутливість фотоприймача	0.9	0.9	1	А/Вт
Місткість фотоприймача	-	0.7	1	пФ
Тривалість фронтів вихідних імпульсів	-	-	2	нс
Ширина смуги пропускання	115	-	-	МГц
Діапазон робочих температур	- 40	25	+ 70	°C
Напруга живлення	-	4.5	-	В

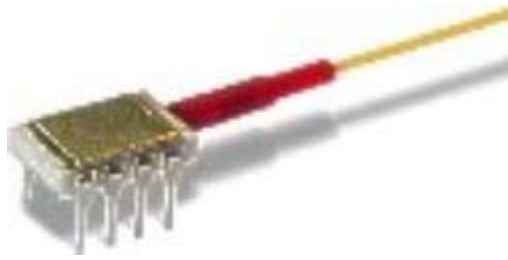


Рисунок 1.5 – Фотодіодний модуль

1.3 Оптичні підсилювачі

Посилення оптичних сигналів розглядалося спочатку як супутнє явище, яке спостерігається при дослідженні процесів у лазерних пристроях. Проте з розвитком волоконно-оптичної техніки та технології воно стало самостійним напрямом розвитку оптичної техніки. В даний час намітилося кілька напрямків у створенні оптичних підсилювачів [3].

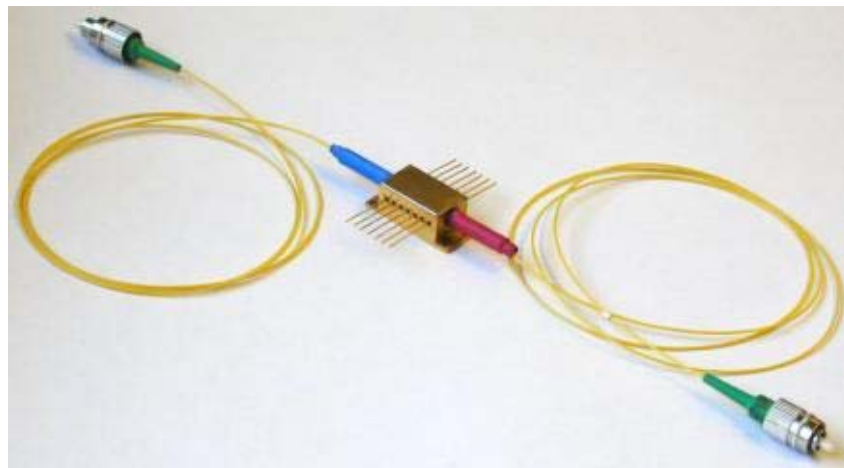


Рисунок 1.6 – Напівпровідниковий оптичний підсилювач

Основні типи оптичних підсилювачів:

- ербієві підсилювачі;
- напівпровідникові підсилювачі;
- параметричні підсилювачі.

Основні характеристики напівпровідникових оптичних підсилювачів наведено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Основні характеристики напівпровідникових оптичних підсилювачів

Параметри	Умови роботи	MIN	TYP	MAX	Од. вим.
Довжина хвилі	CW, Gain = 10 dB	1530	1550	1580	нм
Напруга	CW, $I_f = 200$ мА	-	-	2	В
Підсилення "волокно-волокно"	CW, $I_f = 200$ мА	8	10	-	dB
Чутливість на вході	CW, Gain = 10 dB	-30	-	-	dBm
Струм зміщення	CW, Gain = 10 dB	-	200	250	мА
Поляризаційна чутливість	CW, $I_f = 200$ мА	-	3	-	dB
Ширина спектру	CW, $I_f = 200$ мА	30	-	-	нм

1.5 Суперлюмінесцентні діоди

Вітчизняні суперлюмінесцентні діоди (СЛД) випускаються в діапазоні довжин хвиль 650-1650 нм із потужністю випромінювання 0,1–50 мВт. Ширина спектра випромінювання СЛД становить 20-40 нм. Спектр випромінювання СЛД подано на рис. 1.8.

Виведення випромінювання може проводитися як у відкритий простір (рис. 1.8), так і через волоконний світловод у корпусах, представлених на рис. 1.5.

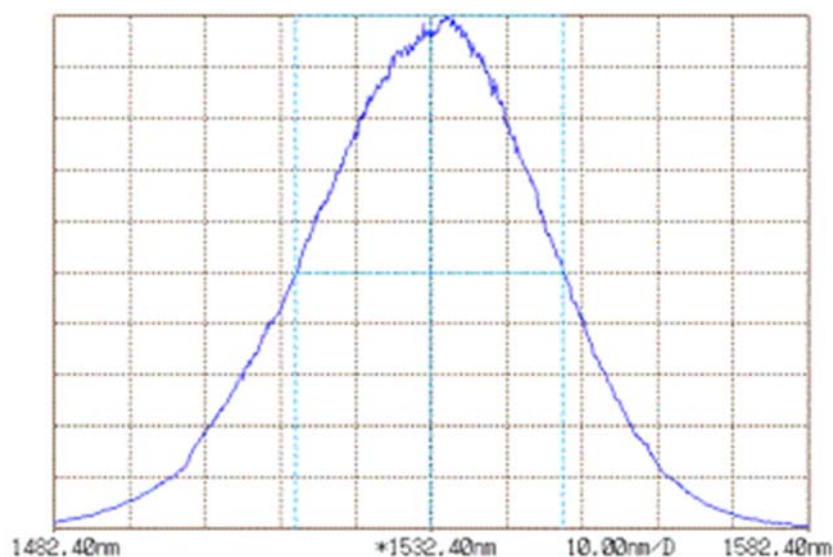


Рисунок 1.7 – Спектр випромінювання суперлюмінесцентного діода

Основні характеристики суперлюмінесцентних діодів наведено у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Основні характеристики суперлюмінесцентних діодів

Довжина хвилі випромінювання СЛД, нм	Потужність випромінювання, мВт	Спектральна ширина контуру випромінювання СЛД, нм	Струм накачування, мА
650-680	2-5	20	не більше 300
780-810	2-10	20-40	не більше 300
820-840	2-10	20-30	300
890-930	2-20	20-50	300
960-990	2-20	20-50	не більше 250
1020-1064	2-20	20-50	не більше 300
1290-1335	2-10	20-30	не більше 300
1510-1560	2-10	20-30	не більше 300
1610-1650	2-10	20-30	не більше 300



Рисунок 1.8 – Суперлюмінесцентний діод у 9 мм корпусі

Представлена тут елементна база фотоніки (суперлюмінесцентні, лазерні діоди та модулі, приймачі випромінювання та підсилювачі оптичного випромінювання) за своїми характеристиками відповідає найкращим зразкам оптоелектронних компонентів.

2 КВАНТОВІ НАНОСТРУКТУРИ І НАДГРАДКИ

2.1 Основні характеристики двовимірних напівпровідникових наноструктур

Двовимірні напівпровідникові наноструктури (ДНН) – це напівпровідникові структури, в яких в одному вимірі розміри значно менші, ніж довжина хвилі Де-Бройля електрону для обраного матеріалу. ДНН можуть бути отримані різними методами, такими як хімічна епітаксія, магнетронне розпилювання, молекулярно-променева епітаксія та деякі інші. Основними характеристиками ДНН є: концентрація носіїв заряду, ширина забороненої зони, енергія рівня Фермі [4]. Основні характеристики ДНН [2]:

- концентрація носіїв заряду в ДНН може бути значно вище, ніж у звичайних напівпровідниках. Це пов'язано з тим, що в ДНН носії заряду можуть вільно рухатися тільки в двох вимірах, що зменшує їхню енергію і, відповідно, потенціал іонізації. Концентрація носіїв заряду в ДНН може бути збільшена за рахунок зменшення розмірів ДНН в одному вимірі. Це пов'язано з тим, що в ДНН зі зменшенням розмірів збільшується ймовірність перетину носіїв заряду з краями ДНН. Концентрація носіїв заряду в ДНН має важливе значення для напівпровідникових лазерів, оскільки вона визначає потужність лазерного випромінювання;

- ширина забороненої зони в ДНН може бути значно більшою, ніж у звичайних напівпровідниках. Це пов'язано з тим, що в ДНН валентна зона і зона провідності можуть бути розділені більшою відстанню, ніж у звичайних напівпровідниках. Ширина забороненої зони в ДНН може бути збільшена за рахунок вибору відповідних матеріалів для виготовлення ДНН. Ширина забороненої зони в ДНН має важливе значення для напівпровідникових лазерів, оскільки вона визначає ширину спектральної лінії випромінювання;

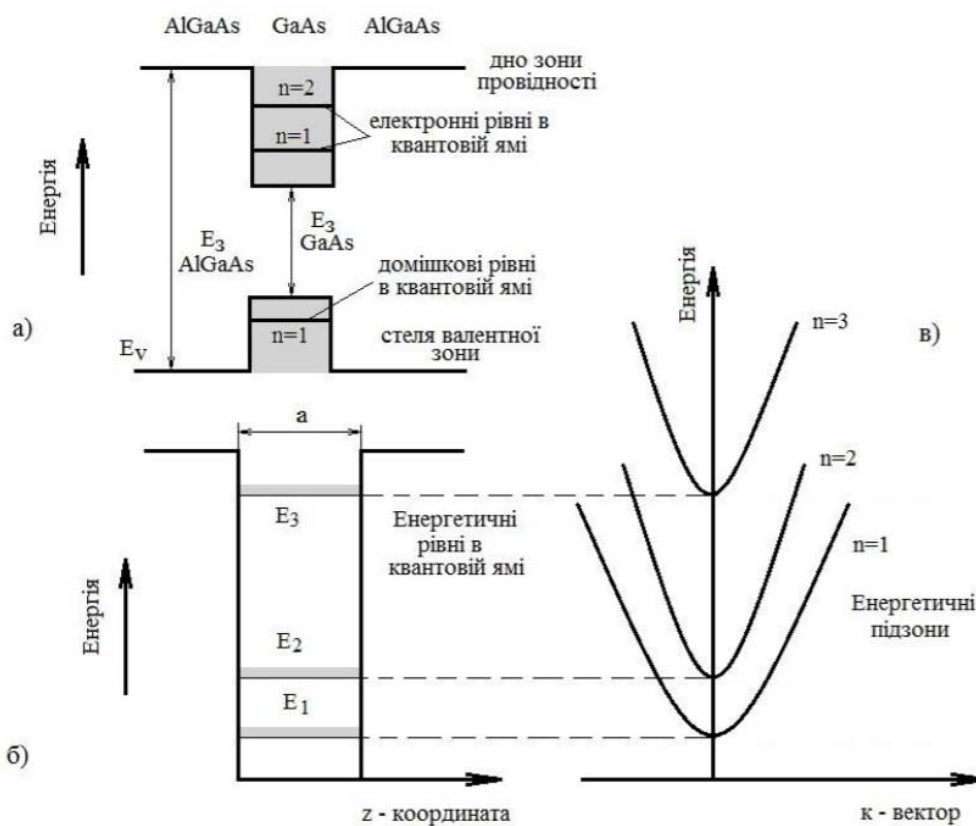
- енергія рівня Фермі в ДНН може бути значно нижче, ніж у звичайних напівпровідниках. Це пов'язано з тим, що в ДНН носії заряду можуть вільно рухатися тільки в двох вимірах, що зменшує їхній потенціал хімічного зв'язку. Енергія рівня Фермі в ДНН може бути зменшена за рахунок вибору відповідних матеріалів для виготовлення ДНН. Енергія рівня Фермі в ДНН має важливе значення для напівпровідникових лазерів, оскільки вона визначає динамічний діапазон лазера [5]. Застосування ДНН в напівпровідникових лазерах ДНН можуть використовуватися в напівпровідникових лазерах для:

- збільшення потужності лазерного випромінювання;
- зменшення ширини спектральної лінії випромінювання;
- збільшення динамічного діапазону лазера. Наприклад, лазери з ДНН на основі GaAs/AlGaAs можуть мати потужність до 100 Вт, ширину спектральної лінії до 1 нм і динамічний діапазон до 100 ГГц [5].

Додаткові відомості про характеристики ДНН. Крім основних характеристик, розглянутих вище, ДНН мають і інші характеристики, які можуть бути важливими для застосування в напівпровідникових лазерах. Однією з таких характеристик є ефективність генерації випромінювання. Ефективність генерації випромінювання в ДНН може бути значно вище, ніж у звичайних напівпровідниках. Це пов'язано з тим, що в ДНН носії заряду можуть знаходитися тільки в двох вимірах, що зменшує їхню відстань між собою і, відповідно, збільшує ймовірність випромінювання. Іншою важливою характеристикою є стійкість до теплових пошкоджень. Стійкість до теплових пошкоджень в ДНН може бути значно вище, ніж у звичайних напівпровідниках. Це пов'язано з тим, що в ДНН носії заряду можуть знаходитися тільки в двох вимірах, що зменшує їхню енергію [5 - 6].

Прикладом двовимірної напівпровідникової структури, яка широко застосовується на практиці, є тришарова структура з плівки арсеніду галію нанометрової товщини, на яку з двох сторін нанесено шар алюмінату арсеніду галію AlGaAs з більш широкою забороненою зоною. При $x = 0,3$ заборонена зона $Al_xGa_{1-x}As$ приблизно дорівнює 2 еВ, в той час як для GaAs вона складає 1,4 еВ.

Це приводить до того, що виникає потенціальний бар'єр з майже прямокутною формою з висотою 0,4 еВ для електронів і 0,2 еВ для дірок (рис. 2.1, а). В дійсності форма потенціального бар'єра є більш складною, тому що потенціал залежить від міжатомної відстані, яка в свою чергу впливає на хвильові функції [5]. Рух електронів і дірок може відбуватись лише в напрямках x і y , паралельних границі поділу, проте рух носіїв заряду уздовж координати z , яка перпендикулярна до ями, обмежено за наявності стінок ями (рис. 2.1, а).



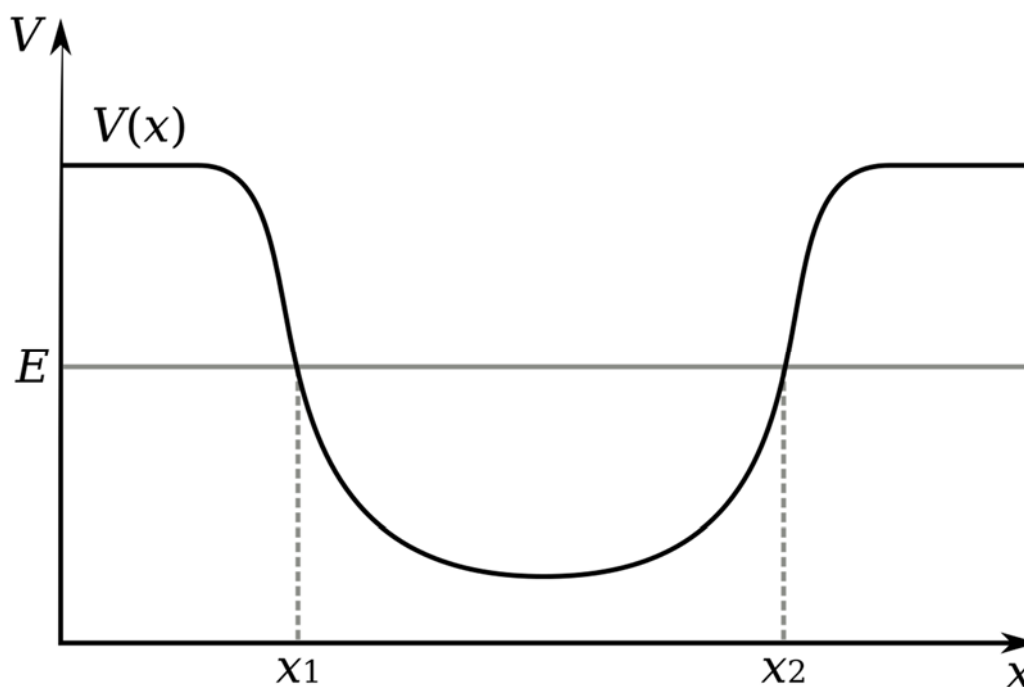
- а – прямокутна потенціальна яма у тришаровій системі AlGaAs–GaAs– AlGaAs;
- б – енергетичні рівні частинок у прямокутній потенціальній ямі;
- в – енергетичні підзони частинок у «квантово необмежених» напрямках

Рисунок 2.1 – Загальна схема прямокутної потенціальної ями у тришаровій системі AlGaAs–GaAs– AlGaAs

Цей випадок відповідає руху електронів в системах з так званими нескінченно високими стінками потенціальних бар'єрів [4].

2.2. Прямокутна потенційна яма скінченної глибини

Прямокутна потенційна яма (ППЯ) скінченної глибини – це двовимірна напівпровідникова структура, в якій в одному вимірі розміри значно менші, ніж довжина хвилі Де-Бройля електронів для даного напівпровідникового матеріалу, а в іншому вимірі розміри обмежені потенційною ямою [7]. ППЯ може бути отримана різними методами, такими як хімічна епітаксія, магнетронне розпилювання, молекулярно-променева епітаксія та інші [6].



Риунок 2.2 – Прямокутна потенційна яма

Ширина забороненої зони ППЯ дорівнює ширині забороненої зони основного напівпровідника, з якого виготовлена ППЯ. Глибина потенційної ями визначає енергію рівня Фермі в ППЯ.

Розміри потенційної ями. Розміри потенційної ями в поперечному напрямку визначають ширину забороненої зони, доступної для носіїв заряду.

Енергетичні рівні в ППЯ, носії заряду можуть перебувати тільки на енергетичних рівнях, дозволених потенційною ямою. Ці енергетичні рівні утворюють електронний газ, локалізований в ППЯ [5]. Енергетичні рівні в ППЯ можна описати рівнянням Шредінгера для одновимірного потенціалу:

$$E_n = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2 \cdot m^* l^2}$$

де E_n – енергія n-го енергетичного рівня;

m^* – ефективна маса електрона;

n – номер енергетичного рівня.

З аналізу цього рівняння випливає, що енергетичні рівні в ППЯ дискретні, і їхня енергія залежить від номера енергетичного рівня. ППЯ мають ряд фізичних властивостей, які роблять їх привабливими для застосування в напівпровідникових лазерах. До цих властивостей відносяться: Зменшення ширини забороненої зони. Глибина потенційної ями може бути використана для зменшення ширини забороненої зони в ППЯ [8]. Це дозволяє отримати лазери з більшою потужністю і меншою шириною спектральної лінії. Збільшення концентрації носіїв заряду. Ширина потенційної ями може бути використана для збільшення концентрації носіїв заряду в ППЯ. Це дозволяє отримати лазери з більшою потужністю. Збільшення стійкості до теплових пошкоджень. Носії заряду в ППЯ мають меншу енергію, ніж в звичайних напівпровідниках. Це дозволяє отримати лазери з більшою стійкістю до теплових пошкоджень.

Застосування ППЯ в напівпровідникових лазерах. ППЯ широко використовуються в напівпровідникових лазерах. Вони дозволяють отримати лазери з такими характеристиками, як: потужність до 100 Вт, ширина спектральної лінії до 1 нм, динамічний діапазон до 100 ГГц [6]. ППЯ використовуються в таких типах напівпровідникових лазерів, як: мультимодальні лазери, моноmodalні лазери, фазова модуляційні лазери, імпульсні лазери.

ПІЯ є важливим типом двовимірних напівпровідникових структур, які мають ряд фізичних властивостей, які роблять їх привабливими для застосування в напівпровідникових лазерах.

1.3 Надгратки

Надгратка – це періодична шарувата структура, що складається з тонких шарів напівпровідників, які чергуються в напрямі росту кристалу. Загальний вигляд і енергетична діаграма надгратки показана на рис. 2.3.

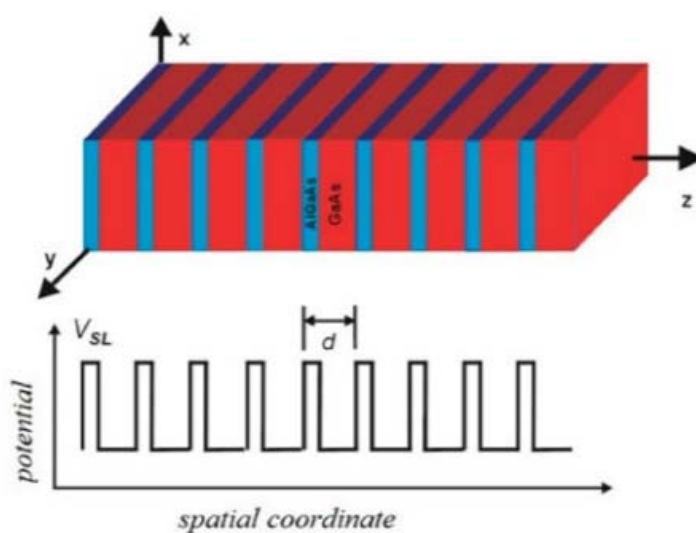


Рисунок 2.3 – Схематичне зображення надгратки

Структури типу шаруватих кристалів мають характерні ширини шарів лежать в межах 1–100 нанометрів. Об'єкти з такими розмірами прийнято називати наноструктурами. Крім напівпровідникових надграток до наноструктур можна віднести і ряд інших матеріалів: магнітні мультишари, фулерени, пористі кремнієві трубки, деякі біологічні об'єкти. Хоча шаруваті структури, такі як напівпровідникові надгратки, вперше були запропоновані ще у 1969-1970 Есакі та Цу, інтерес до їх дослідження не зменшується, а в останні роки навіть зростає. Не зважаючи на десятиріччя їх теоретичних та експериментальних досліджень,

пошуки ефективних методів аналізу і моделювання електронної структури надграток все ще потребують вдосконалення [5].

Зазвичай товщина одного шару надгратки – d (рис. 2.3) складає декілька нанометрів, проте вона завжди менша за довжину вільного пробігу електрона. Надгратки крім періоду кристалічної ґратки у наявних напівпровідниках мають додатковий «штучний» період, який дорівнює товщині двох сусідніх шарів. Оскільки шари в таких структурах чергуються тільки в одному напрямку, для дослідження специфічних властивостей надграток стало звичним і загальноприйнятим використання одномірної моделі фізики напівпровідників. Надгратки можуть виготовлятися з напівпровідників, металів, надпровідників і діелектриків, проте найбільш поширеними є напівпровідникові надгратки (рис 2.4). Виготовляють надгратки, наприклад, за допомогою технології молекулярно-променевої епітаксії, що дозволяє нарощувати шари будь-якої сполуки й товщини [8].

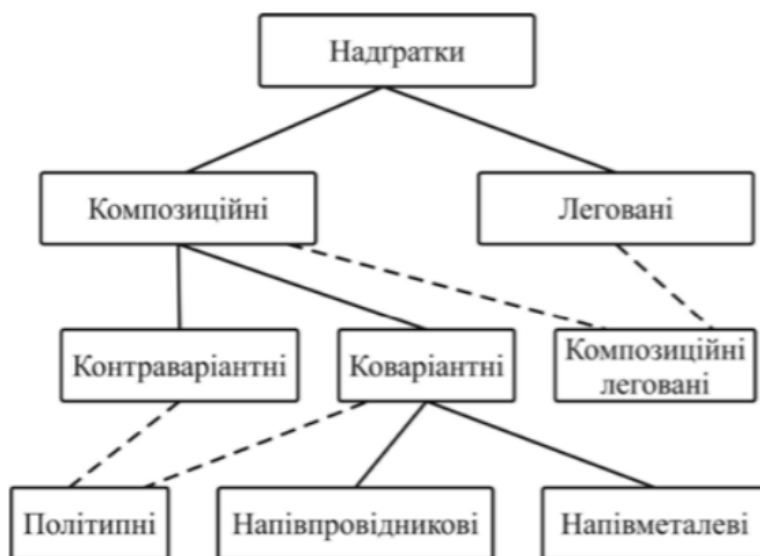


Рисунок 2.4 – Класифікація надграток

Найбільш широко використовують два типи напівпровідникових надграток: композиційні й леговані. Композиційні надгратки – це

гетероструктури із прошарків сполук різного хімічного складу й різної ширини забороненої зони, але з близькими значеннями сталих кристалічних ґраток. В таких структурах додатковий періодичний потенціал створюється за рахунок періодичної зміни ширини забороненої зони. Леговані надґратки – це періодична послідовність шарів n- і p-типу одного й того самого напівпровідника. Донорні атоми в n-шарах віддають електрони, які зв'язуються акцепторними атомами у p-шарах. Додатковий періодичний потенціал створюють заряди іонізованих акцепторів і донорів. У роботі Есакі за основний матеріал було взято арсенід галію (GaAs), шари якого чергуються з шарами його сполуки з алюмінієм (AlGaAs). Ця комбінація і сьогодні є основним об'єктом дослідження у багатьох роботах, тому що найбільш важливим параметром при формуванні гетероструктур є узгодження структур відповідних кристалічних ґраток, зокрема близькість сталої ґратки. Якщо структури і сталі кристалічних ґраток близькі, то атомам одного матеріалу легко підлаштовуватися до атомів іншого. Таке узгодження ґраток називають псевдоморфним зростанням, що вкрай бажано для досягнення високої якості гетеропереходів. Є небагато систем, у яких сталі кристалічних ґраток дуже близькі. Сталі кристалічних ґраток у GaAs та AlGaAs є майже однаковими, а розміри іонів Ga та Al також майже співпадають [6].

Один з можливих способів створення напівпровідникових надґраток це використання так званих дельта-шарів- тонких моно- або небагатоатомних сильно легованих кристалічних шарів. В таких шарах носії заряду, що утворюється в результаті іонізації домішок утримуються поблизу площини шару завдяки локальному електричному полю, яке утворюється домішками. Характерною рисою дельта-шару є можливість створення в їх околі високої концентрації носіїв. Практичний інтерес викликають надґратки з періодичних пар дельташарів з n-p- типами провідності. Особливість структури зонних спектрів таких структур зумовлює інтерес до них в зв'язку можливістю їх використання як чутливих фото-елементів з довгохвильовим зсувом краю фото-чутливості та великим часом життя збуджених носіїв. Найбільш розповсюдженим підходом до теоретичного дослідження і моделювання

суперграток є модель Кроніга – Пені. Метод Кроніга-Пені є простим і відносно точним для дослідження електронних станів у провідникових гетероструктурах. Сучасні уявлення про електронну структуру награток засновані на моделях подібних до цієї. Р. Кроніг і В. Пенні досліджували поведінку електронів в періодичному потенціалі, розглядаючи відносно просту одновимірну модель. Періодичний потенціал в якій було апроксимовано за допомогою періодичної прямокутної функції [10].

На рис. 2.5 позначка II відповідає ділянці з позитивно зарядженим іоном кристалічної ґратки. Ділянка позначена як I відповідає порожньому місцю між іонами. Постійна ґратки дорівнює $a=d+s$. Для розуміння доречності використання моделі Кроніга-Пенні для описання більшості електронних властивостей надґраток. Основна відмінність двох матеріалів, що утворюють надґратку, полягає у ширині їх заборонених енергетичних зон E_g . Мінімум зони провідності для GaAs (точка Γ) завжди нижчий за відповідний мінімум для AlGaAs[5].

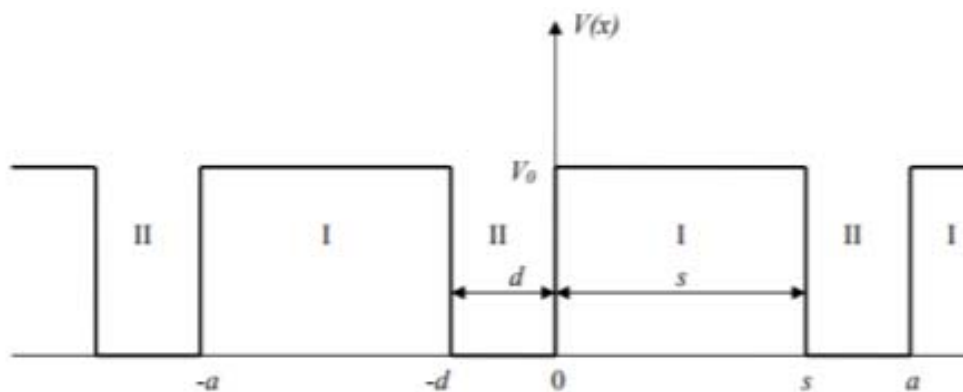


Рисунок 2.5 – Періодичний потенціал у моделі Кроніга-Пенні

Точніше, для GaAs E_g 1,5 eВ при низьких температурах. Ширина зазору сполука збільшується (загалом нелінійно) зі значенням іонної фракції заміщення x , яку зазвичай називають композицією. Очевидно, що для $x=1$ пряма ширина зазору досягає низькотемпературне значення для AlAs, тобто $E_g= 3,1$ eВ.

2.4 Лазери на основі напівпровідникових гетероструктур

Напівпровідникові гетероструктури (НГ) – це напівпровідникові структури, в яких два або більше напівпровідників з різними властивостями з'єднані один з одним. Напівпровідникові гетероструктури широко використовуються в напівпровідникових лазерах, оскільки вони дозволяють отримати лазери з унікальними характеристиками, які не можуть бути отримані за допомогою гомогенних напівпровідникових структур. Основними типами напівпровідникові гетероструктури, що використовуються в напівпровідникових лазерах, є: прямокутні НГ. У прямокутних НГ два напівпровідники з'єднані один з одним поперек їхньої довжини. Прямокутні НГ використовуються для створення квантових ям [10].

Спіральні НГ. У спіральних НГ два напівпровідники з'єднані один з одним по спіралі. Спіральні НГШ використовуються для створення квантових точок.

Шаруваті НГ. У шаруватих НГ два або більше напівпровідників розташовані один над одним у вигляді шарів. Шарувата НГ може бути використана для створення квантових ям, квантових точок або інших типів квантових розмірних структур. Лазери на основі напівпровідникових гетероструктур мають ряд переваг порівняно з лазерами на основі гомогенних напівпровідників: зменшення ширини забороненої зони. НГ з різними напівпровідниками можуть бути використані для зменшення ширини забороненої зони в активній області лазера. Це дозволяє отримати лазери з більшою потужністю і меншою шириною спектральної лінії. Збільшення концентрації носіїв заряду [11]. НГ можуть бути використані для збільшення концентрації носіїв заряду в активній області лазера. Це дозволяє отримати лазери з більшою потужністю. Зміни розподілу носіїв заряду по довжині лазера. НГ можуть бути використані для зміни розподілу носіїв заряду по довжині лазера. Це дозволяє отримати лазери з мономодальним випромінюванням. Збільшення стійкості до теплових пошкоджень. НГ можуть бути використані для

збільшення стійкості до теплових пошкоджень лазера. Застосування лазерів на основі напівпровідникових гетероструктур Лазери на основі напівпровідникових гетероструктур широко використовуються в різних областях, таких як: оптична комунікація. Лазери на основі напівпровідникових гетероструктур використовуються в оптичних комунікаційних системах для передачі інформації на великі відстані [10].

Лазери на основі напівпровідникових гетероструктур використовуються в медичній техніці для проведення операцій, лікування захворювань і діагностики. Промислові застосування. Лазери на основі напівпровідникових гетероструктур використовуються в промислових застосуваннях для різання, зварювання, гравіювання та інших операцій [10].

Лазери на основі напівпровідникових гетероструктур мають широкий спектр застосування в різних областях. Ці лазери мають ряд переваг порівняно з лазерами на основі гомогенних напівпровідників, що робить їх привабливими для використання в різних галузях[8].

2.5 Лазери на основі напівпровідникових квантових ям

Лазери на основі напівпровідникових квантових ям (КЯ) - це один з типів лазерів на основі напівпровідникових гетероструктур. КЯ - це напівпровідникові структури, в яких носії заряду локалізовані в потенційній ямі. Принцип роботи лазерів на основі КЯ Принцип роботи лазерів на основі КЯ заснований на явищі квантової електроніки, яке називається ефектом Рамана. Ефект Рамана - це явище, при якому електрон в квантовій ямі може поглинути фотон і переходити на вищий енергетичний рівень, а потім випромінювати фотон з меншою енергією [8 – 10]. У лазерах на основі КЯ носії заряду інжектуються в активну область, яка складається з квантових ям. Носії заряду, які знаходяться в квантових ямах, можуть поглинути фотони з випромінювача і переходити на вищий енергетичний рівень. Потім ці електрони можуть випромінювати фотони з меншою енергією, які виходять з лазера. Переваги лазерів на основі КЯ Лазери

на основі КЯ мають ряд переваг порівняно з лазерами на основі гомогенних напівпровідників: Зменшення ширини спектральної лінії. Ширина спектральної лінії лазера на основі КЯ залежить від ширини забороненої зони в квантовій ямі. Ширина забороненої зони в КЯ може бути значно меншою, ніж ширина забороненої зони в гомогенному напівпровіднику. Це дозволяє отримати лазери з дуже вузькою спектральною лінією. Збільшення стійкості до теплових пошкоджень. Носії заряду в КЯ мають меншу енергію, ніж носії заряду в гомогенному напівпровіднику. Це дозволяє отримати лазери з більшою стійкістю до теплових пошкоджень. Збільшення ефективності генерації випромінювання. Ефективність генерації випромінювання лазера на основі КЯ може бути значно вищою, ніж ефективність генерації випромінювання лазера на основі гомогенного напівпровідника. Застосування лазерів на основі КЯ Лазери на основі КЯ широко використовуються в різних областях [9].

Оптична комунікація. Лазери на основі КЯ використовуються в оптичних комунікаційних системах для передачі інформації на великі відстані. Медична техніка. Лазери на основі КЯ використовуються в медичній техніці для проведення операцій, лікування захворювань і діагностики. Промислові застосування. Лазери на основі КЯ використовуються в промислових застосуваннях для різання, зварювання, гравіювання та інших операцій [10].

Лазери на основі однієї квантової ями. У цих лазерах активна область складається з однієї квантової ями. Лазери на основі ряду квантових ям. У цих лазерах активна область складається з ряду квантових ям, розташованих послідовно один за одним. Лазери на основі багат шарових квантових ям. У цих лазерах активна область складається з багат шарових квантових ям, розташованих один над одним.

Лазери на основі КЯ є перспективним типом лазерів, які мають ряд переваг порівняно з лазерами на основі гомогенних напівпровідників. Ці лазери використовуються в різних областях, і їх застосування буде продовжувати зростати в майбутньому [12].

Якщо товщина активного шару лазера зменшується до розмірів, порівнянних з довжиною хвилі де Бройля ($\lambda = h/p$), виникає так звана квантова яма (Quantum Well, QW), і в цьому випадку ми маємо справу з лазером на квантоворозмірних структурах (чи квантових ямах). Такі лазери використовують найважливіші оптичні переваги квантоворозмірних (QW) або множинних квантоворозмірних (MQW) гетероструктур. Серед переваг таких структур перед об'ємними матеріалами слід відзначити насамперед збільшення диференціального посилення та зменшення залежності цього посилення від температури. Дані особливості пов'язані з тим, що, порівняно з об'ємними кристалами в квантоворозмірних структурах, мають місце принципово інші механізми формування щільності станів, зумовлені квантовим обмеженням вздовж напрямку ями. Однак внаслідок зменшення товщини шару в одиночних та множинних квантових ямах, тут суттєво зменшується фактор локалізації пучка. І щоб обмежити розмір пучка вздовж напрямку квантової ями, необхідно використовувати структури з роздільним обмеженням [13].

3 НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ЛАЗЕР З КВАНТОВОЮ РОЗМІРНОЮ СТРУКТУРОЮ

3.1 Інжекційні напівпровідникові лазери із квантовими розмірними шарами

З розвитком технології наноелектроніки, переходом на субмікронні прилади значний інтерес проявився до лазерів на структурах зі зниженою розмірністю. До таких структур належать насамперед гетероструктури з обмеженням по одній із координат. І тут утворюється область з двовимірним електронним газом. Такі структури отримали назву «Квантові ями». Структури з обмеженням по двох координат отримали назву «квантові нитки». Для структур з тривимірним обмеженням прийнято термін «квантові точки». У таких структурах спостерігається зниження порогової густини струму.

Розрізняють два фактори, що стимулюють зменшення граничної густини. Перший фактор – обсяг активного середовища. У лазерах першого покоління чи гомоструктурах інжектвані носії могли вільно мігрувати у напівпровідниковому середовищі. Тому активний об'єм у відсутності суворо окреслених кордонів, і густина порогового струму приймала досить великі значення.

Перший фактор зниження густини порогового струму генерації був пов'язаний з використанням гетероструктур. У цих структурах фактична область локалізації носіїв визначається профілями густини ймовірності відповідних хвильових функцій. Ці функції залежать від ширини квантової ями, головного квантового числа, ефективної маси носіїв та висоти бар'єру.

Другий фактор пов'язаний із квантовими розмірними ефектами. Такі ефекти впливають на характер руху носіїв в об'ємах, порівнянних з довжиною хвилі електрона або дірки. У той самий час ці обсяги мають бути достатніми до виконання законів зонної теорії, наприклад наявності ширини забороненої зони,

ефективної маси. При локалізації носіїв у квантовій ямі з'являються дискретні дозволені енергетичні рівні.

Основний, або нижній стан характеризується кінетичною енергією локалізації, що відокремлює основний рівень від дна потенційної ями. Мінімальну товщину ями d_{min} , коли вже не забезпечується локалізація носіїв, можна оцінити із співвідношення $E_0 > \Delta E$, де ΔE — глибина ями. В арсенід-галієвих структурах величина d_{min} становить 4–5 нм. Енергія переходу між основними станами в квантовій ямі виявляється більшою за енергію міжзонного переходу в тому ж матеріалі. Це дозволяє змінювати довжину хвилі випромінювання з допомогою розмірів квантової ями.

Можливість керувати густиною станів забезпечує суттєвий ресурс для подальшого поліпшення лазерних характеристик. Дискретизація спектру зводиться до модифікації розподілу щільності станів енергії. Для роботи лазера потрібно і достатньо, щоб були інвертовані робочі рівні. Саме робочі рівні в зонах фактично забезпечують граничне посилення та необхідну швидкість вимушених переходів при надпороговому накачуванні.

У напівпровідникових гомоструктурах необхідно також заповнювати кілька рівнів у зонах, які прямо не беруть участь у генерації. Звичайна, чи невимушена, рекомбінація з участю цих рівнів входить у вираз порогових втрат. Ці рівні розташовані за енергією нижче або вище за робочі рівні. Нижчі рівні доводиться заповнювати, оскільки самі вони не забезпечують достатнього посилення, і для його збільшення потрібно потужне накачування. В об'ємному напівпровіднику щільність станів зростає приблизно як квадратний корінь з кінетичної енергії.

Зовсім інша картина у низькорозмірних структурах. У квантовій ямі густина станів зростає стрибком, і якщо вона достатня для отримання ефекту генерації, немає «непрацюючих» рівнів. Населеність рівнів енергії, що перебувають вище робочих рівнів, пов'язана з температурним розмиттям квазірівномірної функції заповнення. Число носіїв цих рівнях відповідає інтегралу від добутку густини стану на функцію заповнення але у зазначеному інтервалі енергії. Функція заповнення визначається положенням рівня Фермі та

температурою. Густина станів квантових ниток і точок зменшується з енергією, що перевищує квантовий рівень. Завдяки цьому можна оптимізувати енергетичний спектр та зменшити внесок неробочих станів, що лежать вище за робочий рівень. У таких лазерних середовищах можна суттєво послабити температурну залежність посилення та порогу генерації.

Використання квантових ефектів в наноструктурах зниження порогової густини струму напівпровідникового лазера полягає в оптимізації профілю густини станів.

Іншими словами, йдеться про продуману зонну інженерію або про створення структури з наперед заданою зонною структурою.

Для роботи лазера потрібна наявність активного середовища, що містить атоми з дискретними рівнями енергії. Між цими рівнями повинні мати місце квантові переходи. Має бути відомий механізм накачування активного середовища з метою створення інверсної населеності, при якій на більш високоенергетичному рівні має накопичуватися більша кількість збуджених атомів, ніж на нижньому рівні.

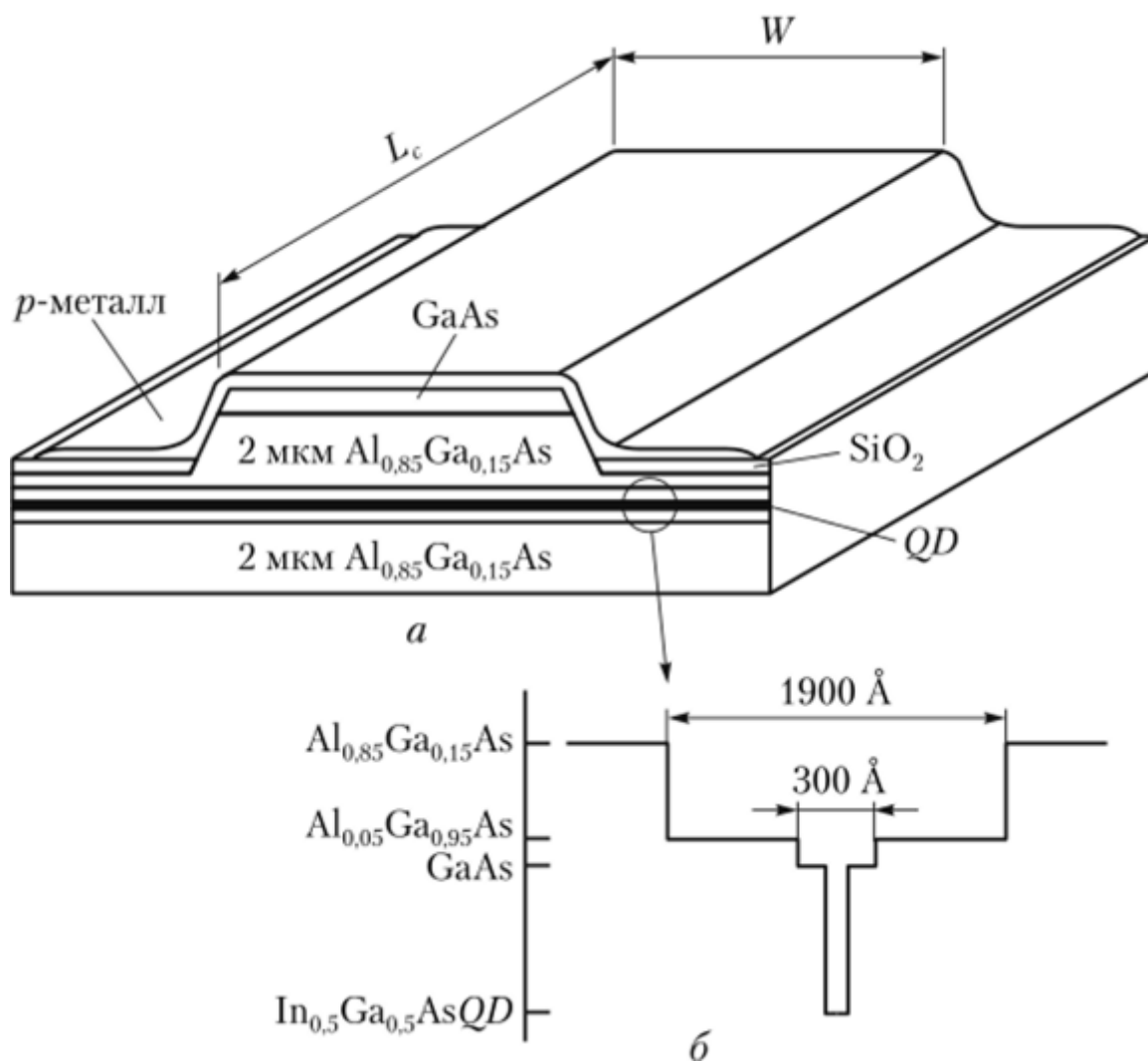
У лазерних наноструктурах як активне середовище зазвичай використовуються квантові точки або квантові нитки.

Квантові точки мають дискретний спектр енергії. При дискретному спектрі немає теплового розширення смуги випромінювання, а коефіцієнт посилення має тенденцію до стабілізації. Випромінювальний час життя збудженого нульвимірною стану залежить від температури, що дозволяє поліпшити температурну стабільність такого типу лазерів. Для лазерів на квантових структурах має місце низьковольтне електричне накачування.

Типовими конструкціями лазерів на структурах зі зниженою розмірністю на теперішній час є діодна і з вертикальним резонатором.

На рис. 3.1 представлено діодну конструкцію лазера на квантових точках. На підкладці з n типу GaAs вирощується гетероструктура між шарами $\text{Al}_{0,85}\text{Ga}_{0,15}\text{As}$ у якій міститься 12 моношарів $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$ квантових точок. Верхній металевий шар контактує з арсенідом галію. Хвильовий канал $\text{Al}_{0,05}\text{Ga}_{0,95}\text{As}$ має

товщину 190 нм і служить провідником випромінювання до вихідних вікон на межах структури. Довжина L_c і ширина каналу W може змінюватися від 1–5 мм та 5–60 мкм відповідно.



a - діодна арсенід-галієва структура;

б - хвилевід, що складається з 12 моношарів квантових точок (шар QD)

Рисунок 3.1 – Конструкція лазера на квантових точках

Торці лазера вкриті шарами, що відбивають $ZnSe/MgF_2$, дзеркалами що формують своєрідний резонатор Фабрі – Перо. Лазер працює в інфрачервоній ділянці спектру на довжині хвилі 1,32 мкм.

Інжекційні напівпровідникові лазери з квантовими розмірними шарами – це тип напівпровідникових лазерів, які використовують квантові ями з квантовими розмірними шарами для досягнення контролю над електронами та дірками в активному середовищі. Однією з ключових особливостей інжекційних лазерів є процес інжекції носіїв заряду у квантові ями, що викликає стимульовану емісію фотонів і, таким чином, генерацію лазерного випромінювання. Квантові розмірні шари додають новий аспект до управління властивостями електронів і дірок у напівпровіднику. Квантові розмірні шари визначаються тривимірною квантовою ямою, розмірність якої вздовж одного чи декількох напрямків становить кілька нанометрів. Ця розмірність приводить до квантових ефектів, таких як квантові точкові стани, заборонені зони енергії, які впливають на розподіл носіїв заряду [12].

Інший тип перспективної конструкції лазера із вертикальним резонатором представлений на рис. 3.2. Квантове посилення в активній області досягається за рахунок процесів інжекції та рекомбінації електронів та дірок. Активна область складається з кількох квантових ям або кількох шарів квантових точок.

Запропоновано конструкцію каскадного лазера, в якому використовуються оптичні переходи між міні-зонами надграток. У надрешітках з поступово змінним періодом при додатку зовнішнього постійного електричного поля рівні енергії окремих квантових ямах зливаються в міні-смути. Відбувається генерація у безперервному режимі.

Впорядковані наноструктури на основі вертикально пов'язаних $InGaAs$ дозволяють створити лазерні пристрої. На рис. 3.3 показано схему лазера, який випромінює з поверхні вертикально зв'язаних нанокластерів $m InGaAs$ в матриці $GaAs$. Конструкції лазерів. Показаних на рис. 3.2 і рис. 3.3 – подібні, але виведення генерованого випромінювання у кожній з наведених конструкцій здійснюється по іншому.

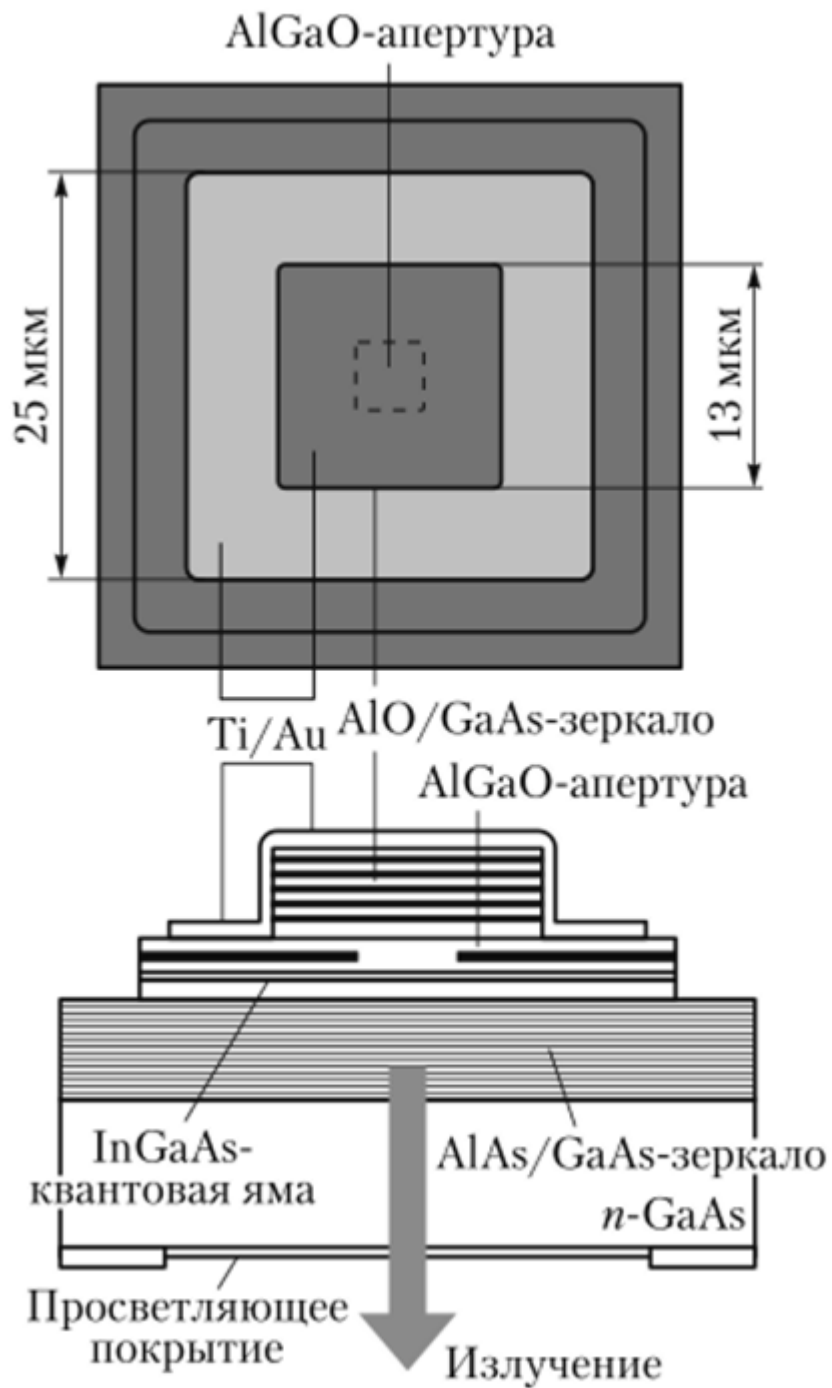
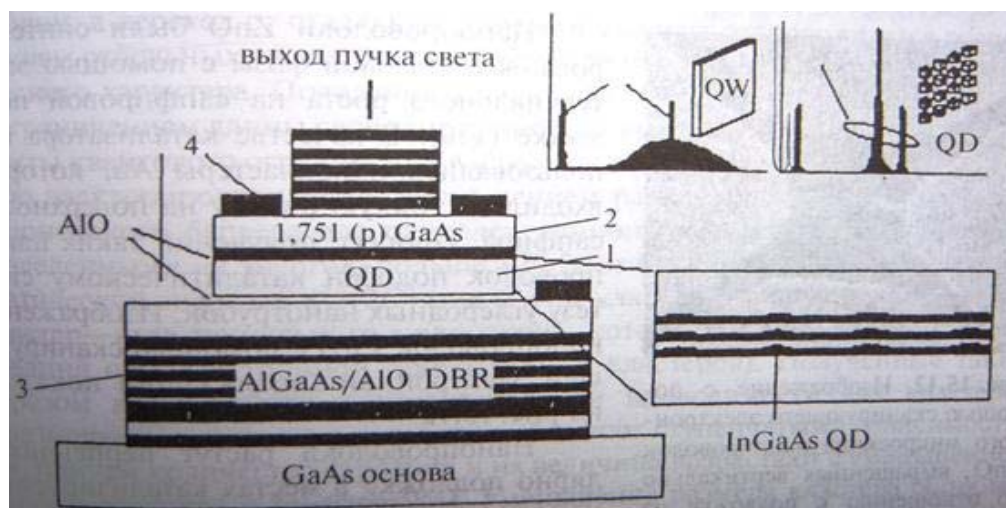


Рисунок 3.2 – Структура лазера с вертикальным резонатором

Лазер включає активну зону на основі впорядкованої наноструктури у вигляді нанокластерів InGaAs в матриці GaAs, середовище для інжектування електронів і дірок, розподілені брегівські рефлектори AlGaAs/AlO як дзеркал і електроди [14].

При кімнатній температурі у разі оптимальної кількості верств верхнього брегівського рефлектора максимальна ефективність складала 16%, а мінімальний пороговий струм 68 мкА. На рис. 3.4 представлені технічні дані такого лазера - вихідна потужність та коефіцієнт корисної дії.



1 - нанокластерна порожнина, що містить квантові точки.

2 - (p) GaAs спейсер містить арсенід галію з акцепторною провідністю.

3 – брегівські рефлектори. 4 – електроди.

QW - квантові ями, QD - квантові точки

Рисунок 3.3 – Схема лазера на вертикально пов'язаних нанокластерах InGaAs у матриці арсеніду галію GaAs. На вставці праворуч наведено поперечний переріз активної зони лазера

На рис. 3.4 – суцільні лінії – потужність лазера, короткий пунктир – ККД лазера, довгий пунктир вольт – амперна характеристика. Криві потужності наведені в залежності від числа шарів брегівських рефлекторів, що відбивають (3, 4, 5).

Напівпровідникові вертикально випромінюючі лазери знаходять широке застосування швидкодіючих оптоволоконних системах передачі інформації. Подібні лазери працюють у діапазоні ближнього інфрачервоного

випромінювання (ІЧ) довжин хвиль 850 нм та 980 нм. Розроблено лазери у ІЧ діапазоні 1,2–1,5 мкм [18].

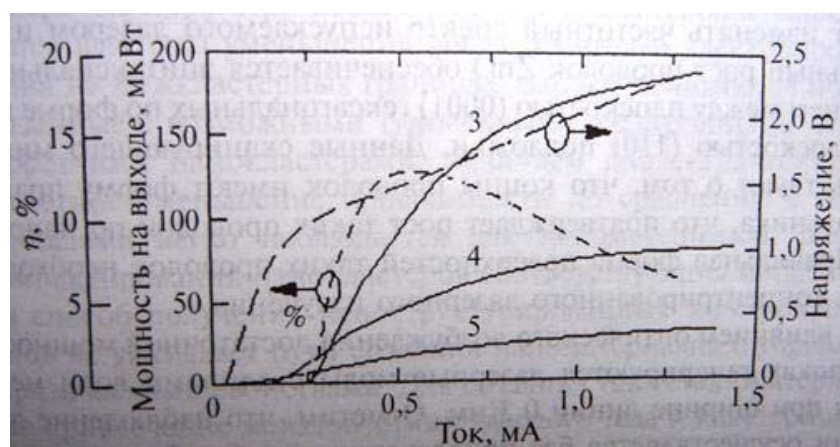


Рисунок 3.4 – Залежність вихідної потужності та ККД лазера на вертикально пов'язаних нанокластерах InGaAs у матриці арсеніду галію GaAs від струму інжекції

Для лазерів на основі нанокластерів напівпровідників генерують випромінювання в оптичному та ультрафіолетовому УФ-діапазоні використовують широкозонні матеріали. Таким матеріалом є окис цинку ZnO із забороненою зоною 3,37 еВ, оптичні переходи якого лежать у діапазоні УФ. Лазерне екситонне випромінювання отримано для нанодротів ZnO на сапфіровій підкладці під дією оптичного збудження.

Інжекційні напівпровідникові лазери із квантовими розмірними шарами мають широкий спектр застосувань. Вони використовуються у високошвидкісних оптичних комунікаціях, лазерних діодах, оптичних волокнах, а також у високоточних наукових та медичних дослідженнях. Хоча інжекційні лазери із квантовими розмірними шарами демонструють значний потенціал, існують виклики, такі як теплове розсіювання та стійкість до експлуатації. Проте, зусилля вчених у напрямку вирішення цих проблем відкривають нові перспективи для розвитку цієї технології. Інжекційні напівпровідникові лазери із квантовими розмірними шарами є однією з перспективних галузей сучасної

оптичної електроніки та квантової технології. Вони обіцяють стати ключовими складовими високошвидкісних та ефективних оптичних систем [12].

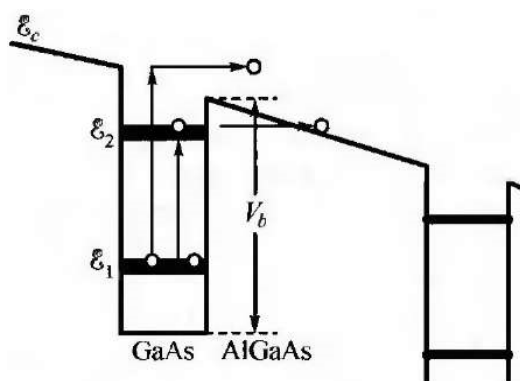
3.2 Оптичне підсилення лазерного випромінювання

Лазерне випромінювання визначається своєрідністю, яка відрізняє його від інших типів світлового випромінювання. Однак для використання у багатьох технологічних і наукових застосуваннях часто необхідне оптичне підсилення лазерних сигналів. Оптичне підсилення базується на принципах спонтанної та стимульованої емісії, що забезпечують генерацію когерентного світла у лазерах. Активне середовище лазерів, таке як тверді тіла, гази або півпровідники, відіграє ключову роль у цьому процесі, де збуджені атоми чи молекули випромінюють енергію у вигляді фотонів. Одним з типів лазерів, що здобувають популярність, є твердотільні лазери. Вони використовують тверді кристали чи скло, як активне середовище. Такі лазери відзначаються високою ефективністю та широким спектром застосувань, включаючи лазерну обробку матеріалів та наукові дослідження. Газові лазери є іншим важливим класом, де активним середовищем служить газ. Вони використовуються для досліджень атмосферних явищ, лазерної аерозольної технології, а також для структурної діагностики середовищ в екстремальних умовах [14]. Півпровідникові лазери, засновані на використанні напівпровідникових матеріалів, широко застосовуються у сучасних електронічних та оптичних технологіях. Вони можуть бути використані у високошвидкісних комунікаційних системах та інтегрованих оптичних лазерних системах. Для управління оптичним підсиленням в лазерах важливими є методи модуляції, стабілізації та регулювання параметрів. Це дозволяє адаптувати лазерні системи під конкретні вимоги та застосування.

Застосування оптичного підсилення включає лазерну хірургію, комунікаційні технології, наукові дослідження, промислову обробку матеріалів та багато інших галузей [14]. Розвиток нових концепцій і матеріалів сприяє появі більш ефективних та універсальних лазерних систем. Слід підкреслити

важливість оптичного підсилення для сучасних технологій та визначити перспективи його майбутнього розвитку. Оптичне підсилення лазерного випромінювання залишається ключовим фактором у вдосконаленні та розширенні застосувань лазерних технологій у різних сферах життя.

Методом молекулярно-променевої епітаксії створено новий клас наноструктурних матеріалів у вигляді гетероепітаксціальних структур. Такі структури складаються із шарів, товщина яких l_a становить кілька постійних решіток базового матеріалу. У таких шарах спостерігаються ефекти розмірного квантування з характерними енергіями $E = (h/l_a)^2$. Зонна діаграма багатошарової структури із квантоворозмірних шарів GaAs представлена на рис. 3.5. Такі структури мають властивості домішкових фотопровідників. Механізм фотопровідності в них здійснюється за рахунок збудження електронів і дірок із шарів із квантовими ямами в стан над бар'єром і наступним дрейфом у зовнішньому електричному полі.



E_C — край зони провідності об'ємного матеріалу;

E_1 і E_2 — рівні квантування для поперечного руху електронів;

Стрілками показані механізми фотоіонізації фотоелектронів

Рисунок 3.5 – Енергетична діаграма зони провідності багатошарової наноструктури з квантовими ямами

У таких структурах фотоактивні носії в шарах строго впорядковані й розділені потенційними бар'єрами, які перешкоджають протіканню наскрізного темного струму. Зміна геометрії квантоворазмерних шарів дозволяє в широких межах змінювати спектральні характеристики приладів [13].

Фотопровідність у структурах із квантовими ямами забезпечує фотоіонізацію електронів і дірок через потенційний бар'єр і тому не має принципового значення використовуваний матеріал. Найбільше поширення мають матеріали на основі $A^{III}B^V$, технологія яких добре відпрацьована для створення квантоворозмірних гетероструктур. Багатошарові наноструктури із квантовими ямами складаються із квантово обмежених шарів GaAs товщиною до 5 нм і бар'єрів з AlGaAs товщиною 40–50 нм. Шари GaAs легуються донорної домішкою Si з концентрацією $N_{Si} \approx 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3} - 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Стан електронів у зоні провідності квантово обмеженого GaAs описується хвильовою функцією, що має вигляд плоскої хвилі, яка рухається в напрямку уздовж шарів та обмеженою в перпендикулярному до них напрямку [14].

Для підсилення оптичного випромінювання у лазерних установках або волоконно-оптичних каналах зв'язку окремі квантово-обмежені структури об'єднуються у багатошарові структури і блоки, фотопровідністю яких, у свою чергу, можливо відносно легко керувати за допомогою звичайних підсилювачів детекторів у вигляді окремих мікросхем, які підключені окремо.

3.3 Квантово-каскадні лазери

Квантовий каскадний лазер (ККЛ) є уніполярним напівпровідниковим приладом, заснованому на міжпідзонних переходах квантової ями, створеної, зазвичай, у зоні провідності. Відмінною рисою ККЛ є властивість змінювати довжину хвилі випромінювання змінюючи розмір шарів, що нарощуються [13].

Такі лазери засновані на міжпідзонних переходах електронів у зоні проведення гетероструктур GaAs/AlGaAs, є унікальними компактними твердотілими джерелами терагерцового (ТГц) випромінювання з інжекційною

накачкою, у яких за рахунок варіації товщин шарів можна перебудувувати частоту генерації від 1,2 до 5,4 ТГц (без використання великих магнітних полів). Незважаючи на значний прогрес ККЛ за останні 15 років, актуальність завдань щодо покращення характеристик даних джерел пов'язана як з фундаментальними питаннями дослідження електронного транспорту у надзвичайно складних квантових системах, що складаються з понад 1000 шарів нанометрової товщини, так і з прикладними завданнями, де необхідна спектральна чистота випромінювання, певні потужнісні та температурні характеристики [16].

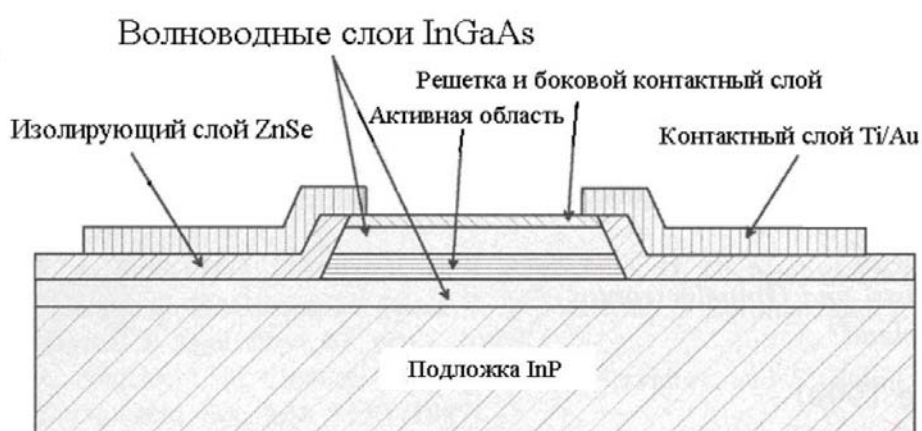


Рисунок 3.6 – Конструкція ККЛ

У сучасних ККЛ один електрон може породжувати до 100 фотонів і більше. При цьому період свєрхрешітки становить ~ 50 нм. А найменша ширина квантової ями (ширина окремого шару) може бути близько 1 нм і менше. Ідея створення ККЛ була вперше висловлена радянськими фізиками Р.Ф. Казариновим і Р.А. Сурісом ще в 1971 році, проте перший експериментальний зразок з'явився тільки в 1994 році. В свою чергу, серійне виробництво ККЛ розпочалося на фірмі Alpes Lasers у Швейцарії у 1997 році [14]. Так що пройшло достатньо часу, щоб підвести про проміжні підсумки розвитку цього напрямку з погляду областей застосування ККЛ та обговорити проблеми, що стоять перед цією областю лазерної техніки. Поява комерційних ККЛ суттєво розширила спектральний діапазон лазерів аж до терагерцевої області, що уможливило створення на їх основі компактних пристроїв, здатних

вирішувати нові завдання галузі оборони, безпеки, екологічного моніторингу, атмосферних оптичних ліній зв'язку, медицини та біології, у наукових дослідженнях та інших галузях людської діяльності.

Класифікація ККЛ заснована на їх відмінності за типом з'єднання, типу надгратки та за типом активної області. За типом з'єднання розрізняють ККЛ на основі AlInAs/GaInAs , GaAs/AlGaAs , InAs/AlSb , Si/SiGe , InGaAs/InGaP , InGaAs/AlAs . За типом надграток розрізняють структури ККЛ з плавно мінливим періодом, з подвійним оптичним резонансом, переходах рівень – мінізона. За типом активної області (легованої або нелегованої) розрізняють структури з однією квантовою ямою (КЯ), з двома КЯ, з трьома КЯ [15]. ККЛ – уніполярний прилад, що забезпечує випромінювання фотонів при міжзонних переходах У ККЛ кожен електрон випромінює N_p фотонів (N_p – число каскадів). У звичайному напівпровідниковому лазері відбувається рекомбінація електронно-діркових пар через заборонену зону напівпровідника, що не заповнена електронами, з випромінюванням одного фотона. У ККЛ кожен електрон багаторазово випромінює фотон під час переходу від одного активного шару в іншій. Число активних шарів завтовшки в один атом може бути 1000-2000. Типова структура ККЛ показана на рис. 3.7

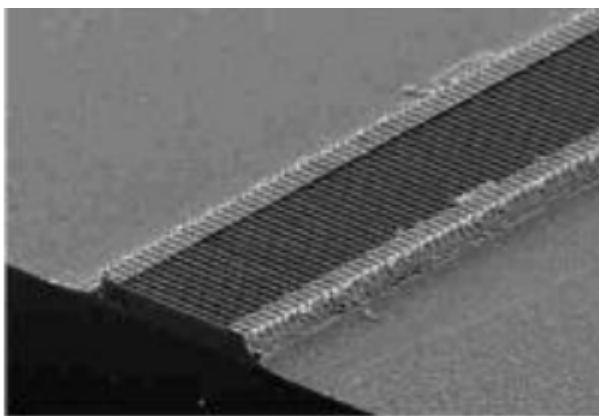


Рисунок 3.7 – Структура ККЛ

У ККЛ відбувається генерація випромінювання, коли електрон переміщається між гетероструктурами напівпровідника всередині однієї зони. Ці

шари трохи різняться за товщиною і розділені шарами іншого матеріалу, тому різні рівні енергії утворюють свого роду «сходи», з яких електрон і «спускається», випромінюючи фотон на кожній сходинці [13]. Частота генерації задається шляхом підбору товщини шарів та перебудовується за допомогою прикладеної напруги. Другий промінь у ККЛ реабсорбує (тобто поглинає) лише 10% випущених фотонів по порівняно з першим променем. Завдяки цьому можлива генерація в ККЛ довгохвильового інфрачервоного (ІЧ) випромінювання при високих температурах. Робоча температура ККЛ значно перевищує кімнатну – сягає 400 К, а характеристична температура може досягати 500 К. Особливо більшу потужність випромінювання ККЛ генерують в області спектру 4–5 мкм: до 5 Вт у безперервному та 120 Вт у імпульсному режим при 300 К. Для одномодових ККЛ типова потужність випромінювання становить близько 0,1 Вт, хоча у готельних випадках може бути значно вище [15]. Типовий вигляд ККЛ. Що випускаються промислов показаний на рис. 3.8.



Рисунок 3.8 – Зовнішній вигляд ККЛ фірми Hamamatsu

Основні застосування ККЛ: спектроскопія, газоаналіз (чутливість $ppm - ppb$), медицина (дихальна діагностика, діагностика пухлин, опіків та ін), гетеродинування в ІЧ області спектра, інтроскопія різних матеріалів, охорона, військові застосування (ІЧ підсвічування, ІЧ буї та маяки), секретний зв'язок у

вільному просторі без ризику бути виявленим, ІЧ цілевказівка та вимірювання дальності, теплобачення, створення глушників для ракет з ІЧ наведенням та інших ІЧ перешкод, огляд багажу і людей та іншого [15].

У принциповому плані ККЛ є поміщеною у хвилевод багатошаровою гетероструктурою, поперек якої пропускається електричний струм (тобто нормально до шарів). Структура складається з декількох активних областей, що чергуються, в яких відбувається випромінювання фотонів, і інжекційних областей, через які носії резонансно тунелюють до наступної активної області. Така каскадна конструкція лазера забезпечує досить простий спосіб збільшення вихідної потужності одиночного приладу. Так як, долаючи кожен каскад, електрон випускає фотон, то за свій прохід через ККЛ один електрон випускає безліч фотонів. Чим більша кількість каскадів в ККЛ, тим більше фотонів випускає один електрон за свій прохід.

Отже, збільшення числа каскадів має призводити до збільшення вихідний потужності приладу та зниження порогового струму генерації. Як ілюстрацію до сказаного вище на рис. 3.9 представлена конструкція полоскового ІЧ ККЛ із зазначенням характерних розмірів.

Звичайно, існують і інші, складніші конструкції активної зони, проте їх аналіз виходить за межі цієї монографії [17]. Наприклад, значне поліпшення характеристик ІЧ ККЛ (нижчий поріг генерації і висока потужність випромінювання при кімнатній температурі) було досягнуто за рахунок введення в дизайн гетероструктури ІЧ ККЛ так званого подвійного фононного резонансу. Активна область такого лазера має вже чотири квантові ями і три енергетичні стани, однаково віддалені один від одного на величину.

Для порівняння з традиційними біполярними лазерними діодами (ЛД) нижче наведено основні відмінні риси ККЛ [12]:

- уніполярні лазери;
- випромінювання фотонів у квантово-розмірних структурах відбувається в результаті внутрішньозонних переходів електронів (тобто в межах однієї зони, наприклад, зони провідності);

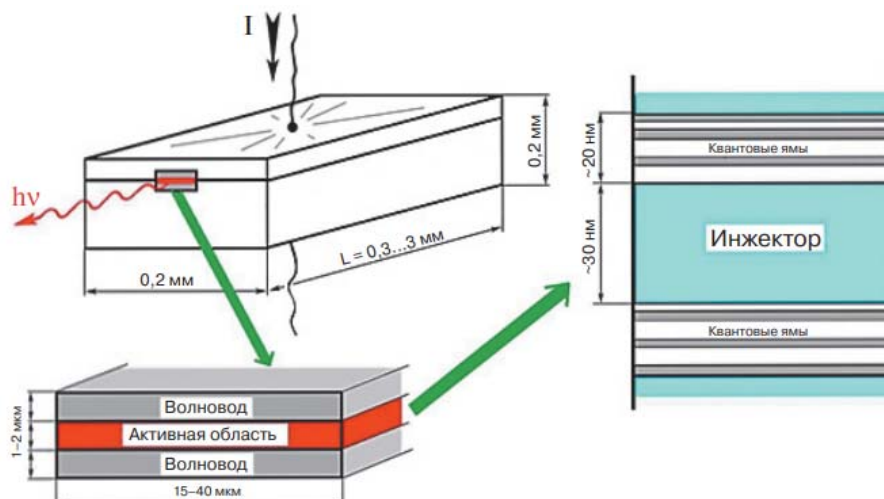


Рисунок 3.9 – Типова конструкція полоскового ІЧ ККЛ із зазначенням характерних розмірів активного елемента (нагорі зліва), активної області (внизу) та елементів гетероструктури (каскаду)

- каскадний характер випромінювання фотонів (один електрон породжує N фотонів, де N – число каскадів або періодів у гетероструктурі ККЛ);
- довжина хвилі генерації не залежить від ширини забороненої зони і в основному визначається шириною квантової ями, а не складом матеріалів гетеропари;
- потужність (енергія) випромінювання за інших рівних умов залежить від числа каскадів і перевищує її значення для біполярних лазерних діодів (квантова ефективність >1);
- ККЛ працюють як у галузі середньохвильового (MWIR, Mid-Wave Infrared) та довгохвильового (LWIR, Long-Wave Infrared) ІЧ-діапазонів (3,4–25 мкм), і у ТГц-області частот (1,5–5 ТГц);
- в області середньохвильового (MWIR) ІЧ-діапазону потужність випромінювання комерційних одиночних ККЛ при кімнатній температурі в безперервному (CW) режимі генерації на сьогоднішній день досягла значень 4 Вт, а в області довгохвильового (LWIR) ІЧ-діапазону перевищує 1 Вт;

- у ТГц-діапазоні частот при кімнатній температурі досягнуто потужності випромінювання в CW-режимі 0,2 мВт, в імпульсному — 1 Вт (при криогенних температурах);

- в середньому ІЧ квантово-каскадні лазери мають широкий діапазон плавної перебудови — понад 900 см;

- вузька лінія генерації в одномодовому режимі;

- ККЛ є компактними енергоефективними (ККД > 10 %) надійні, стабільні та довговічні напівпровідникові випромінювачі.

Поява комерційних ККЛ суттєво розширила спектральний діапазон лазерів аж до терагерцевої області, що уможливило створення на їх основі компактних пристроїв, здатних вирішувати нові завдання у різних сферах діяльності. Багато в чому це обумовлено унікальними властивостями випромінювання ККЛ, серед яких слід відзначити такі [16]:

- випромінювання середньохвильового (MWIR) та довгохвильового (LWIR) ІЧ-діапазону, а також терагерцеве (THz, ТГц) випромінювання неінвазивні, вони не є іонізуючим випромінюванням і при помірних інтенсивностях не становлять небезпеки для здоров'я людини;

- спектральні характеристики (коефіцієнти поглинання та відображення випромінювання, діелектрична проникність та ін.) більшості складних хімічних сполук мають характерні особливості (fingerprints, відбитки пальців) у середньохвильовому та довгохвильовому інфрачервоному діапазонах, а також у ТГц-області частот електромагнітного спектру, тобто потрапляють в область довжин хвиль генерації, характерних для ККЛ. Насамперед це стосується вибухових, отруйних, наркотичних та токсичних речовин промислового походження, що дозволяє не тільки дистанційно виявляти ці речовини, але і з великим ступенем достовірності проводити їхню ідентифікацію навіть у багатокомпонентному середовищі;

- в ІЧ-області квантово-каскадні лазери мають широкий діапазон плавної перебудови;

- терагерцеве випромінювання суттєво менше схильне до розсіювання, ніж видиме чи інфрачервоне випромінювання. Тому такі об'єкти, як сухі тканини, дерево, папір, пластмаси, кераміка, фарби, забарвлене скло, прозорі в терагерцевому діапазоні частот (за винятком металів і речовин, що складаються з полярних молекул, наприклад води).

- у вікнах прозорості атмосфери випромінювання середнього ІЧ- та ТГц-діапа зона поширюється крізь туман, серпанок, дощ та сніг з мінімальними втратами;

- в порівнянні з видимим або ближнім ІЧ-діапазоном спектра випромінювання ККЛ більш стійке до збурень (турбулентності) в атмосфері через більшу довжину хвилі;

- малий час життя електрона (<1 пс) у збудженому стані всередині квантових ям ККЛ забезпечує високу робочу частоту та визначає граничну частоту модуляції до 100 ГГц, що в принциповому плані не уможливорює створення атмосферних оптичних ліній зв'язку з дуже високою пропускнуою здатністю.

В силу перелічених вище унікальних властивостей випромінювання ККЛ становлять значний інтерес для атмосферних оптичних ліній зв'язку, вони вже знайшли широке практичне застосування у сфері оборони, безпеки, медицини та біології, моніторингу навколишнього, інфрачервоної спектроскопії. Як зазначалося, перша експериментальна демонстрація роботи ККЛ мала місце у 1994 році, тобто через більше двох десятиліть після теоретичного передбачення про можливість реалізації таких лазерів. Комерційний випуск ККЛ розпочався 1997 року фірмою Alpes Lasers у Швейцарії. Зараз на ринку є продукція від багатьох виробників (NanoPlus GmbH, Alpes Lasers, Fraunhofer IAF, Daylight Solutions Inc., Pranalytica Inc. та інших). Є всі підстави вважати, що за подальшого вдосконалення та здешевлення технології виготовлення ККЛ, поліпшення їх параметрів можливі галузі застосування ККЛ не обмежаться переліченими вище[14].

На рис. 3.10 наведена схема, реалізована на надгратках. Лазер випромінює в інфрачервоному діапазоні довжин хвиль (7,6 мкм) і за кімнатної температури досягає пікової потужності 0,5 Вт. Порогова густина струму становить 5 кА/см².

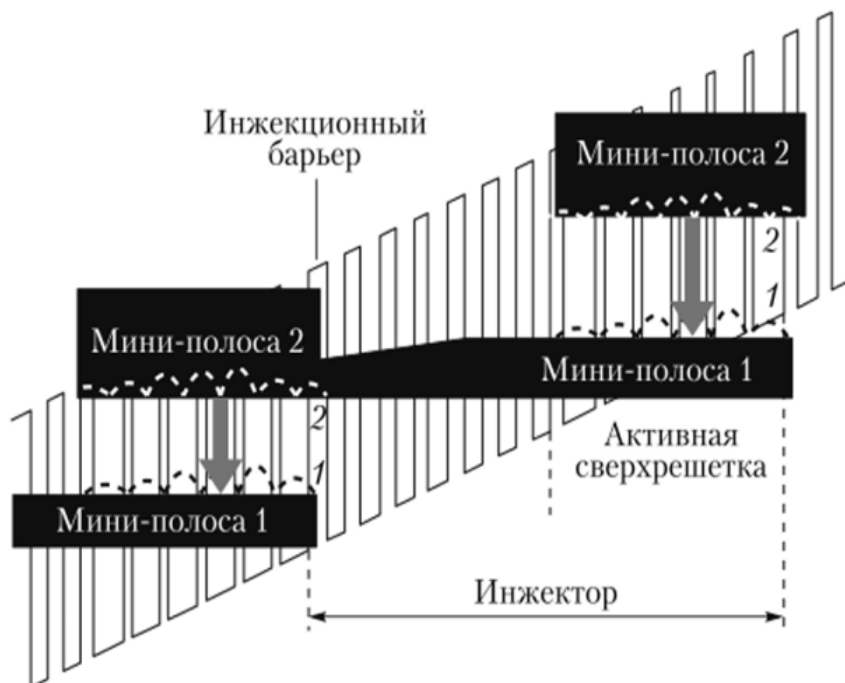


Рисунок 3.10 – Схема використання надграток для генерації випромінювання ККЛ

Згідно загальної схеми, наведеної на рис. 3.9, на рис 3.10 показано частину активної області ККЛ, а саме – інжектор, оточений з обох боків мінісмугами, що являють собою багатощарову квантоворозмірну структуру – один каскад. Багатокаскадний напівпровідниковий лазер являє собою сендвіч, що складається з декількох (більше двох) найтонших, в кілька нанометрів товщиною, шарів напівпровідника, що чергуються, з трохи відрізняється провідністю. Якщо прикласти до різних кінців такого сендвіча електричну напругу, то електрони потечуть крізь ці шари дуже специфічним чином: накопичивши достатньо енергії, вони синхронно перестрибують крізь шар і потрапляють в квантову яму, випромінюючи витрачену на перехід енергію у вигляді фотонів. Характерною

особливістю такого лазера є те, що він випромінює безперервно і рівномірно, суворо паралельно до площини, в якій лежать шари напівпровідників.

Лазерний випромінювач має розмір всього 50 мкм, що вдвічі тонше за людське волосся. За допомогою вбудованих фотонних кристалів вдалося направити потік випромінювання від боків до поверхні плівки та змусити лазер випромінювати у вертикальному напрямку. Таким чином, для використання нового лазера не потрібні додаткові пристрої фокусування, що дозволить розширити сферу застосування напівпровідникових лазерів.

Велика ймовірність того, що в майбутньому мікросхеми, що містять величезні масиви подібних лазерних випромінювачів, широко застосовуватимуться в оптичних телекомунікаціях, а також як чутливі сенсори для різних датчиків.

4 ОСОБЛИВОСТІ КВАНТОВО-КАСКАДНИХ ЛАЗЕРІВ З УРАХУВАННЯМ ЕЛЕКТРОННОГО ТА ОПТИЧНОГО ОБМЕЖЕННЯ

4.1 Сумісне електронне та оптичне обмеження

Власні значення енергії електронів для наноструктури, показаної на рис. 3.10, було розраховано в даній роботі на підставі квантово-механічної моделі. Власні значення енергії електронів у зоні провідності і на фоні зміни її профілю показані на рис. 4.1.

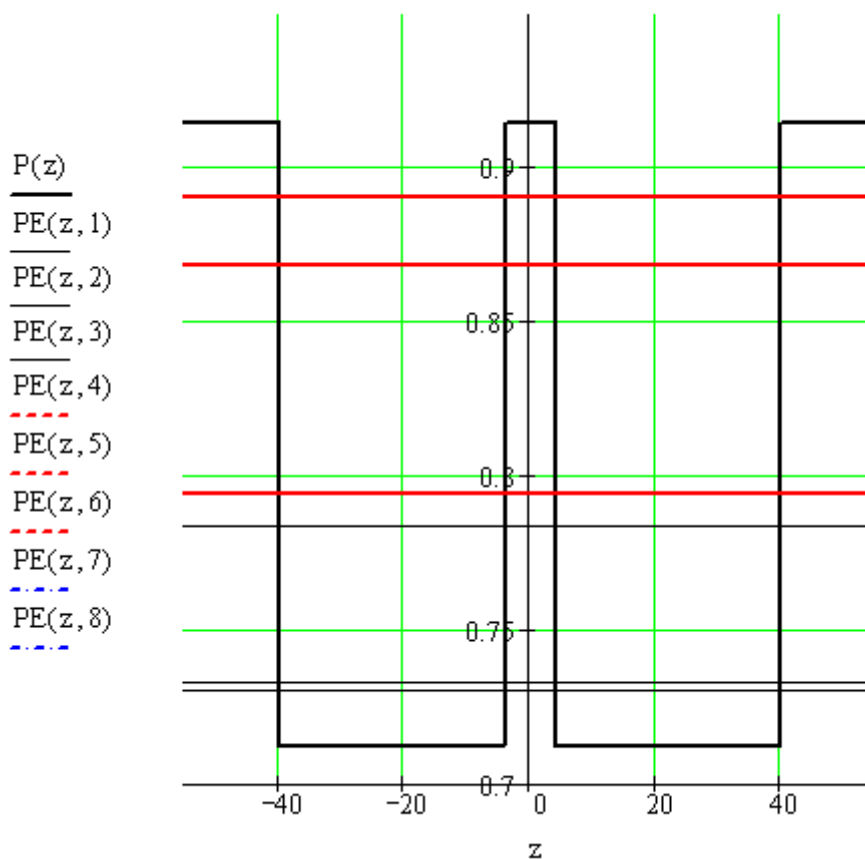


Рисунок 4.1 – Власні значення енергії електронів у зоні провідності

Функція густини станів електронів у зоні провідності, що відповідає спектру енергетичних станів, наведеному на рис. 4.1 показано на рис. 4.2.

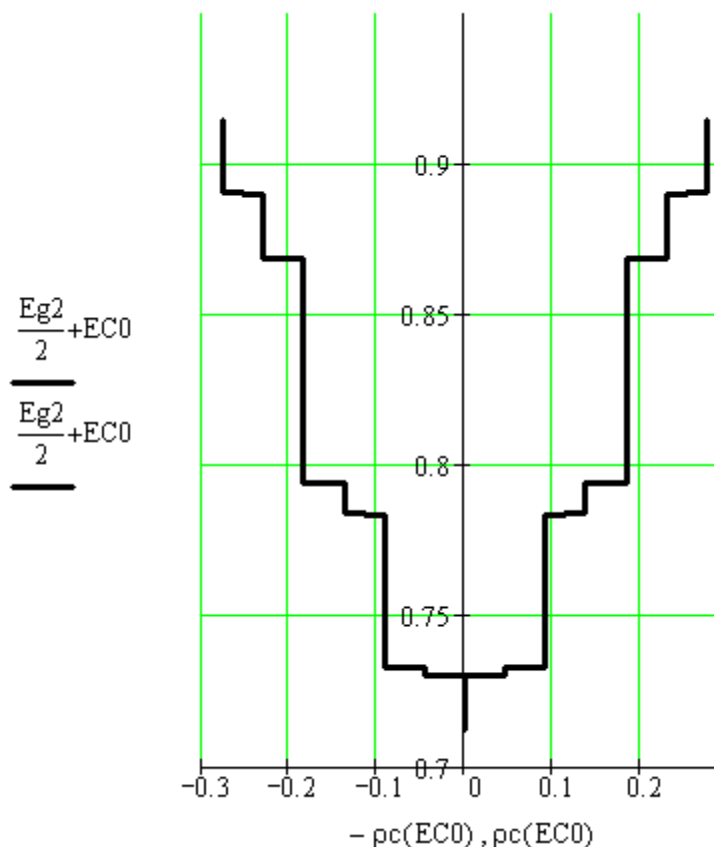


Рисунок 4.2 – Густина станів у зоні провідності для електронів

З аналізу результатів моделювання енергетичних станів електронів, наведених на рис. 4.1 і 4.2 випливає, що власні значення енергії розподілені нерівномірно по глибині кантової ями.

Нерівномірність розподілу енергій електронів квантовою ямою пояснюється тим, що між енергетичними станами в квантово-обмеженому шарі арсеніду галію і такими ж станами в необмеженому матеріалі (за бар'єром) можуть виникати ефекти тунелювання - підбар'єрного проходження частинок без втрати енергії. Подібні явища також безпосередньо впливають на локалізацію частинок в області квантового обмеження, чим більша енергія частинки, чим ближче частка до стану континууму, тим менше вона локалізується в ямі. Така поведінка частинок добре узгоджується із густиною розподілу ймовірності частинок в області квантового обмеження, показаного на рис. 4.3.

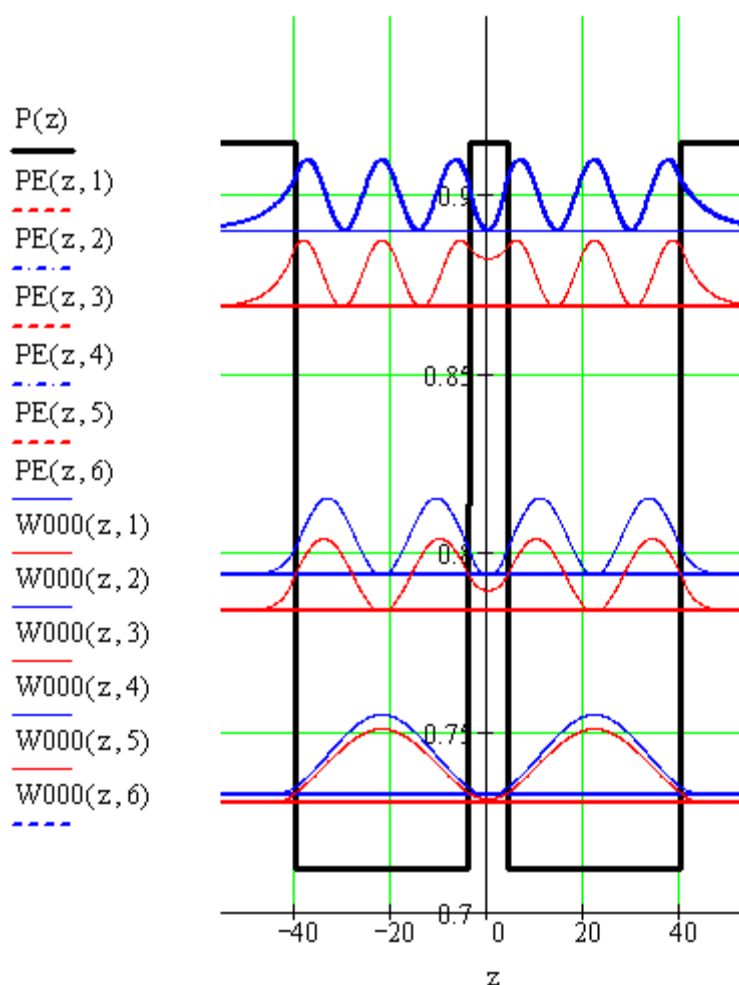


Рисунок 4.3 – Густина розподілу ймовірності електронів у зоні провідності в галузі квантового обмеження

Під час роботи ККЛ активна область перебуває під впливом зовнішнього електричного поля джерела накачки. Для дослідження впливу зовнішнього електричного поля на енергетичний профіль структури, що розглядається, в даній роботі було використано друге наближення теорії малих збурень. Зміна енергетичного профілю структури та зміна координатного розподілу хвильових функцій електронів розраховані у другому наближенні теорії збурень показано на рис. 4.4.

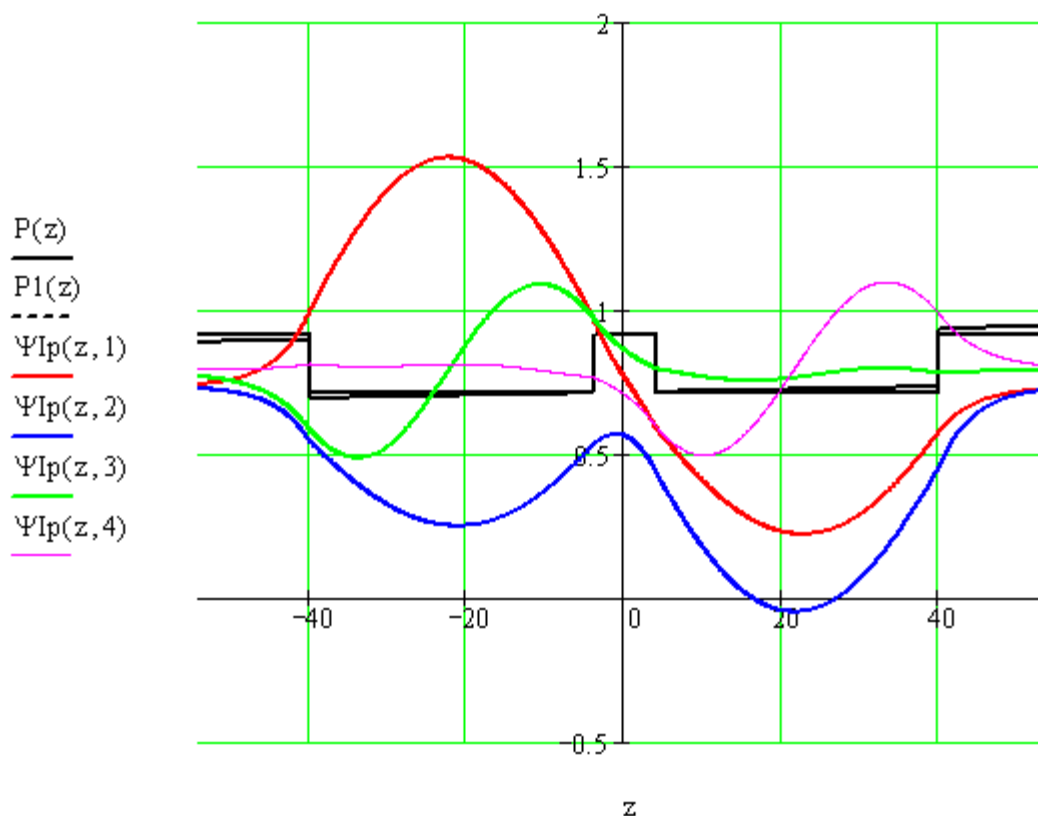


Рисунок 4.4 – Хвильові функції електронів у зоні провідності квантово-обмеженого вузькозонного матеріалу

З аналізу результатів чисельного моделювання, представлених на рис. 4.4 і 4.5 випливає, що під дією зовнішнього постійного в часі електричного поля хвильові функції частинок і квазічастинок змінюють свою парність, це призводить до того, що густини ймовірності розподілу частинок по квантово-обмеженим шарам перерозподіляються. Зокрема, частинки, що відповідають «першому», «третьому», «п'ятому» тощо. енергетичним рівням локалізуються в "лівій" квантовій ямі, а частинки відповідні "другому", "четвертому", "шостому" і т.д. енергетичним рівням локалізуються у «другій» квантовій ямі. Подібний перерозподіл пояснюється характером зовнішнього впливу – напруга змінюється лінійно у межах активної області та є непарною функцією координати.

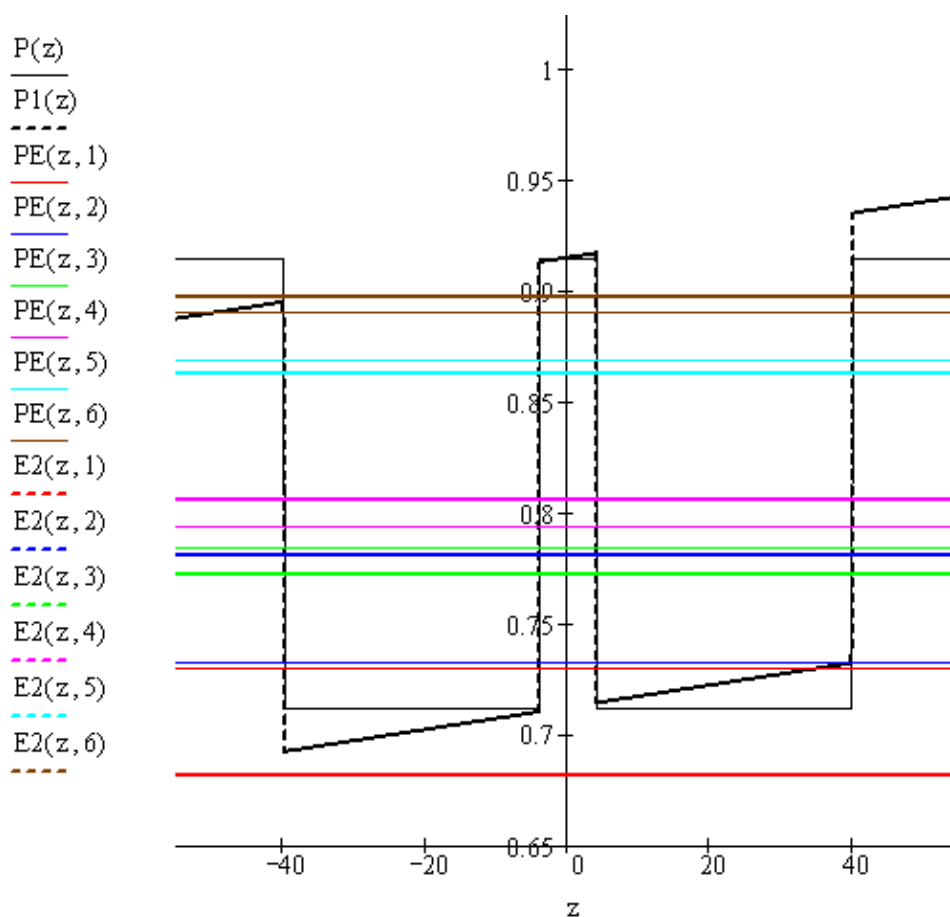


Рисунок 4.5 – Зміна власних значень енергії електронів під впливом зовнішнього електричного поля

З аналізу даних, представлених рис. 4.5 випливає, що під впливом зовнішнього стаціонарного електричного поля у квантово-обмежених системах чітко спостерігається квантово-обмежений ефект Штарка, що виявляється у розширенні енергетичного зазору між сусідніми станами частинок. На тлі ефекту подвоєння енергетичного стану, що відбувається внаслідок тунелювання частинок, що знаходяться на близьких енергетичних рівнях у сусідніх квантових ямах, відбувається значне зміщення першого енергетичного стану за енергетичною шкалою вниз – в заборонену зону. Приблизно ту саму величину «другий» енергетичний рівень зміщується «вгору». У меншій мірі така ж поведінка спостерігається з «третьим» і «четвертим» енергетичними рівнями та іншими енергетичними рівнями частинок і квазічастинок, що лежать вище.

Таким чином, густина електронних станів перерозподіляється слідом за хвильовими функціями і викликає відповідні локальні зміни діелектричної проникності та коефіцієнта оптичного заломлення.

Як зазначалося, у розділі 3 даної роботи, для здійснення лазерної генерації така схема – одночасного електронного та оптичного обмеження енергетично – не завжди вигідна. Для проведення роздільного електронного та оптичного обмеження необхідно використовувати квантові обмежені структури дещо складнішої конструкції.

4.2 Роздільне електронне та оптичне обмеження

Як приклад однієї з таких можливих конструкцій квантов-розмірних структур у цій роботі розглянуто п'ятишарову структуру, показану на рис. 4.6, загальний вигляд – рис. 4.6 (а) та енергетична діаграма - рис. 4.6 (б). Структура створена на основі GaAs/Al_xGa_{1-x}As.

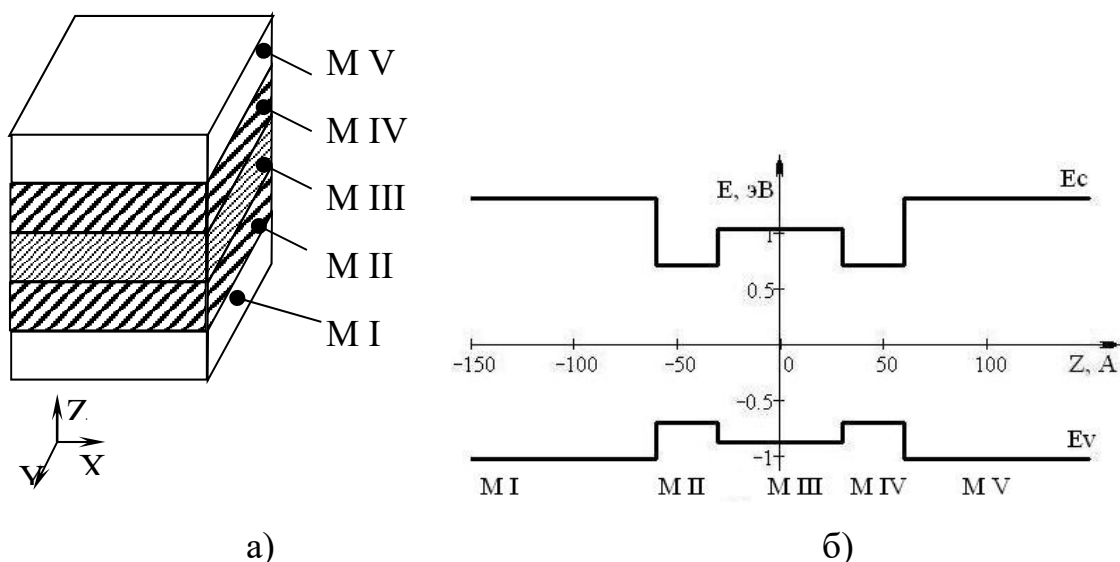


Рисунок 4.6 – Загальний вигляд та енергетична діаграма п'ятишарової структури

Матеріали першого та п'ятого шарів M I, M V складаються з твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$ з максимальним вмістом алюмінію, що забезпечує найбільшу ширину забороненої зони в цих шарах, і, як наслідок, найвищі потенційні бар'єри для носіїв обох типів по всій структурі.

Матеріали другого та четвертого шарів – M II, M IV, навпаки, мають мінімальний вміст алюмінію або повністю складаються з арсеніду галію. Цим забезпечується формування у другому та четвертому шарах прямокутних квантових ям для носіїв обох типів. У матеріалі третього шару – M III вміст алюмінію більше, ніж у матеріалах другого та четвертого шарів, але менше, ніж у матеріалах першого та п'ятого шарів структури. Таким чином, у другому, третьому та четвертому шарах над потенційним бар'єром третього шару та між потенційними бар'єрами першого та п'ятого шарів формується зона квазі-континууму, оскільки носії у другому та четвертому шарі відчувають квантове обмеження, їх товщина не перевищує довжини хвилі де Бройля, товщина роздільного бар'єру також невелика, оскільки бар'єр вважається проникним. При цьому загальна відстань між бар'єрами першого та п'ятого шарів у загальному випадку може наближатися до величин об'ємного зразка.

Результати знаходження власних значень енергії для електронів у зоні провідності показано на рис. 4.7 (а). На рис. 4.7 (б), показані власні функції електронів у стаціонарному стані, що відповідають власним значенням енергії.

Під впливом на квантово-розмірну структуру з енергетичним профілем складної форми зовнішнього електричного поля, стани частинок в області квазиконтинууму піддаються істотним змінам, викликаним, з одного боку, впливом напруженості зовнішнього поля, з іншого, наявністю у частинок у цій області додаткової потенційної енергії. Зміни, викликані у структурі зовнішнім електричним полем, можна відносно легко простежити, використовуючи друге наближення теорії збурень.

На рис. 4.8 (а) та 4.8 (б), відповідно, показані власні значення енергії та власні функції електронів у зоні провідності, розраховані для випадку впливу зовнішнього стаціонарного електричного поля.

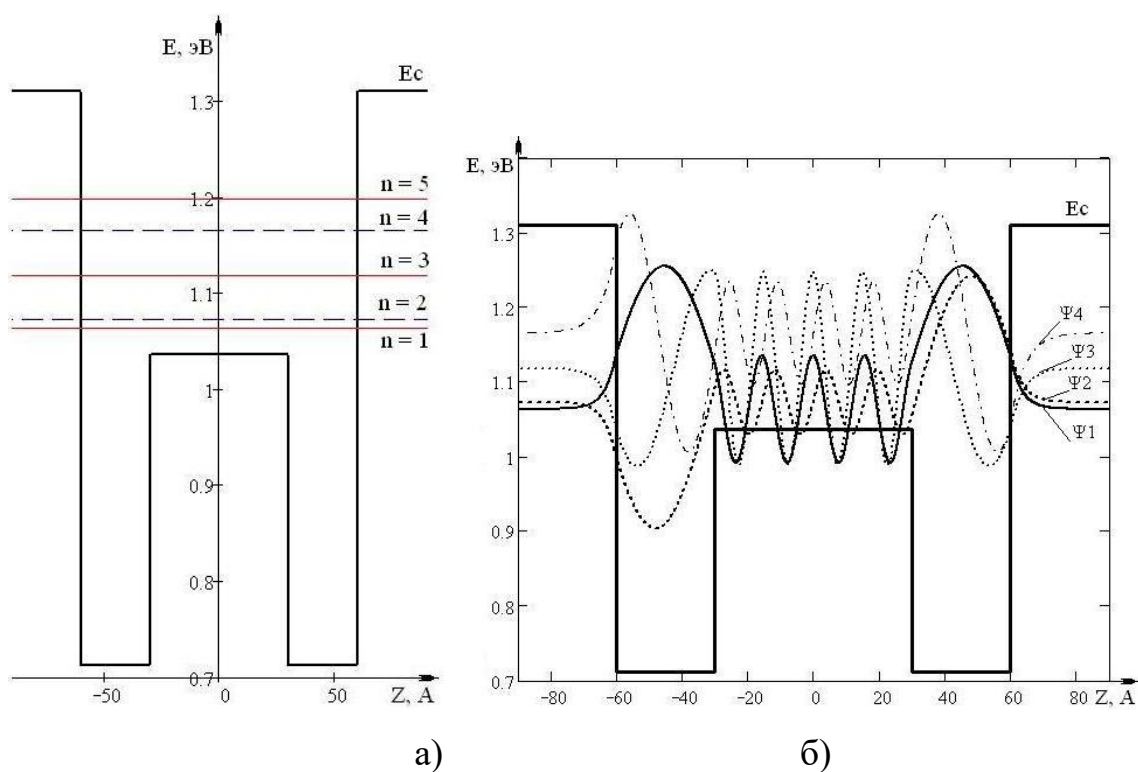


Рисунок 4.7 – Власні значення енергії електронів та власні функції для стаціонарного стану

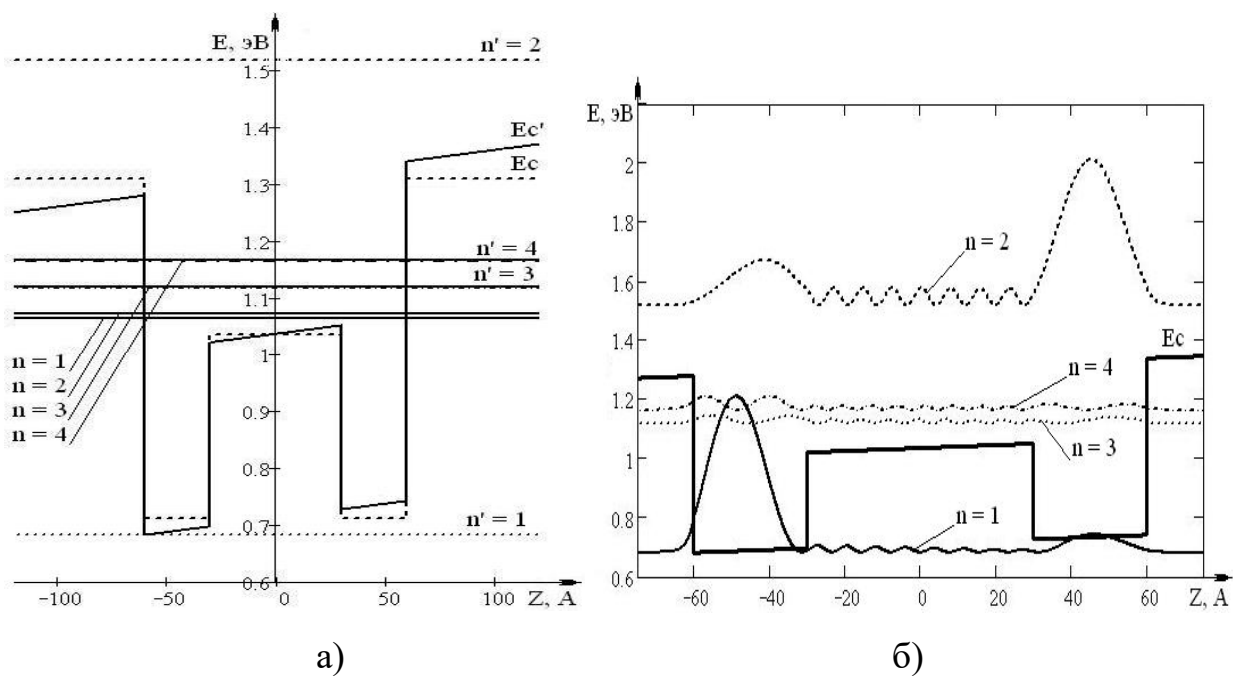


Рисунок 4.8 – Власні значення енергії електронів та власні функції для випадку впливу на систему зовнішнього поля

На рис. 4.8 (а), для порівняння, показані безперервними лініями стаціонарні стани електронів.

Аналіз власних значень та власних функцій носіїв у квантово-розмірній структурі з енергетичним профілем складної форми, розрахованих як для стаціонарного стану (рис. 4.7), так і для випадку впливу зовнішнього стаціонарного електричного поля (рис. 4.8) дозволяє зробити наступні висновки:

- у стаціонарному стані носії, частинки, що знаходяться в області квазі-континууму мають різко немонотонно зростаючий спектр власних значень енергії та локалізуються в галузі квантових ям;

- частинки, що знаходяться вище за енергією щодо перших двох станів локалізуються у всьому просторі квазі -континууму більш рівномірно;

- під дією зовнішнього постійного електричного поля квантово-обмежений ефект Штарка проявляється трохи інакше, ніж в одношарових структурах або симетричних багатошарових структурах (рис. 4.4, 4.5), тут також до зовнішнього впливу найбільш схильні перші два енергетичні рівні, проте вплив зовнішнього поля проявляється більш різко, у той час як для вищих рівнів цей вплив майже непомітний;

- вплив зовнішнього поля призводить також до суттєвої декалізації носіїв, розташованих на перших двох рівнях без зміни парності станів.

Таким чином для ККЛ – лазерні оптичні переходи здійснюються між першими двома рівнями – з максимальною деколізацією станів, у той час як накопичення інверсної населеності проходить на вищих станах в області квазі-континууму.

ВИСНОВКИ

Унікальні властивості випромінювання ККЛ становлять значний інтерес для атмосферних оптичних ліній зв'язку, вони вже знайшли широке практичне застосування у сфері оборони, безпеки, медицини та біології, моніторингу навколишнього, інфрачервоної спектроскопії.

Основними відмінностями ККЛ від традиційних біполярних лазерних діодів є:

- ККЛ – уніполярні прилади;
- випромінювання фотонів у квантово-розмірних структурах ККЛ відбувається в результаті внутрішньозонних переходів електронів;
- каскадний характер випромінювання фотонів;
- довжина хвилі генерації не залежить від ширини забороненої зони і в основному визначається параметрами квантової ями, а не складом матеріалів гетеропари;
- потужність випромінювання за інших рівних умов залежить від числа каскадів і перевищує її значення для біполярних лазерних діодів;
- ККЛ працюють як у галузі середньохвильового та довгохвильового ІЧ-діапазонів (3,4 – 25 мкм), і у ТГц-області частот (1,5–5 ТГц);
- в області середньохвильового ІЧ-діапазону потужність випромінювання комерційних одиночних ККЛ за кімнатної температури в безперервному режимі генерації на сьогоднішній день досягла значень 4 Вт, а в області довгохвильового ІЧ-діапазону перевищує 1 Вт;
- у ТГц-діапазоні частот при кімнатній температурі досягнуто потужності випромінювання в CW-режимі 0,2 мВт, в імпульсному — 1 Вт (за криогенних температур);
- у середньому ІЧ діапазоні квантово-каскадні лазери мають широкий діапазон плавної перебудови – понад 900 см;
- ККЛ характеризуються вузькою лінією генерації в одномодовому режимі;

- ККЛ є компактними енергоефективними ($\text{ККД} > 10 \%$) надійними, стабільними та довговічними напівпровідниковими випромінювачами.

Поява комерційних ККЛ суттєво розширила спектральний діапазон лазерів аж до терагерцевої області, що уможливило створення на їх основі компактних пристроїв, здатних вирішувати нові завдання у різних сферах діяльності.

Аналіз власних значень та власних функцій носіїв у квантово-розмірній структурі з енергетичним профілем складної форми, розрахованих як для стаціонарного стану, так і для випадку впливу зовнішнього стаціонарного електричного поля дозволяє зробити наступні висновки:

- у стаціонарному стані носії, частинки, що знаходяться в області квазі-континууму мають різко немонотонно зростаючий спектр власних значень енергії та локалізуються в галузі квантових ям;

- частинки, що знаходяться вище за енергією щодо перших двох станів локалізуються у всьому просторі квазі-континууму більш рівномірно;

- під дією зовнішнього постійного електричного поля квантово-обмежений ефект Штарка проявляється трохи інакше, ніж в одношарових структурах або симетричних багатшарових структурах (рис. 4.4, 4.5), тут також до зовнішнього впливу найбільш схильні перші два енергетичні рівні, проте вплив зовнішнього поля проявляється більш різко, у той час як для вищих рівнів цей вплив майже непомітний;

- вплив зовнішнього поля призводить також до суттєвої декалізації носіїв, розташованих на перших двох рівнях без зміни парності станів.

Таким чином для ККЛ – лазерні оптичні переходи здійснюються між першими двома рівнями – з максимальною деколізацією станів, у той час як накопичення інверсної населеності проходить на вищих станах в області квазі-континууму.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Дураев В.П., Неделин Е.Т. Полупроводниковые лазеры с волоконной брэгговской решеткой и узким спектром генерации на длинах волн 1530-1560 нм. Квантовая Электроника, 31, № 6, С. 529-530, 2001.
2. Дураев В.П., Медведев С.В. Перестраиваемые одночастотные полупроводниковые лазеры. Физика и техника полупроводников, 2014, том 48, вып. 1.
3. Дураев В.П., Медведев С.В. Полупроводниковые оптические усилители в диапазоне длин волн 840–1550 нм. Научное Приборостроение, 2012, Том 22, № 3, С. 53–57.
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_xGa_{1-x}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. J. Faist, F. Capasso, C. Sirtori, K. West, and L. N. Pfeiffer. (1994). "Distributed feedback quantum cascade lasers." *Applied Physics Letters*, 64(5), 706-708.
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.