

**Міністерство освіти і науки України  
Чернівецький національний університет  
імені Юрія Федьковича**

**Навчально-науковий інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук  
Кафедра електроніки і енергетики**

**Оптичні властивості епітакційних шарів нітрида галію**

**Дипломна робота**

**Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)**

**Виконав:** студент 4 курсу, групи 432ск  
Спеціальність 153 Мікро- та  
наносистемна техніка  
Савчук Іван Юрійович

**Керівник:** Олексій СЛЮТОВ

**До захисту допущено:**

**Протокол засідання кафедри № \_\_\_\_**

від „\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2024 р.

Зав. кафедри \_\_\_\_\_ проф. Едуард МАЙСТРУК

Чернівці – 2024

### Анотація

Стор. 38, рис. 11, табл. 2, літ. 11

В літературному огляді розглядаються основні параметри і головні властивості нітриду галію, наводиться відомості про особливості технології отримання плівок і кристалів GaN.

В експериментальній частині описуються особливості отримання кристалів GaN, розглядаються методики проведених досліджень оптичного пропускання, відбивання і фотолюмінесценції. Наводяться результати досліджень базових оптичних властивостей шарів і кристалів, проводиться їх співставлення і аналізуються процеси формування генераційно-рекомбінаційних процесів у шарах і кристалах GaN відповідно.

**Ключові слова:** *нітрид галію, епітаксійні шари, кристали, оптичне поглинання, оптичне відбивання, фотолюмінесценція, механізми випромінювання.*

### Анотація

The literature review provides the main parameters and main properties of gallium nitride, information on the features of the technology for obtaining GaN films and crystals.

In the experimental part, the peculiarities of obtaining GaN crystals are described, the methods of optical transmission, reflection, and photoluminescence studies are considered. The results of studies of the basic optical properties of layers and crystals of GaN are presented, their comparison is made, and the formation processes of generation-recombination processes in GaN layers and crystals are analyzed, respectively.

**Keywords:** *gallium nitride, epitaxial layers, crystals, optical reflection, optical absorption, photoluminescence, emission mechanisms.*

Дипломна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів наукових досліджень інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_  
(підпис) Іван САВЧУК

## Зміст

Вступ.....	4
Розділ 1. Огляд літературні відомостей .....	5
1.1. Основні властивості нітрида галія .....	5
1.2. Оптичні властивості GaN .....	9
1.3. Методи отримання шарів нітрида галія .....	11
1.4. Отримання кристалів GaN.....	14
Розділ 2 ОТРИМАННЯ І ВЛАСТИВОСТІ GaN .....	15
2.1. Отримання нітриду галію .....	15
2.2. Методика проведення досліджень оптичного пропускання.....	16
2.3. Методика виміру спектрів оптичного відбивання .....	18
2.4. Визначення випромінюючих властивостей GaN.....	21
2.5. Оптичне пропускання та відбивання шарів нітриду галію.....	22
2.6. Випромінюючі властивості кристалів і шарів нітриду галію .....	24
Висновки.....	30
Література.....	31
Додаток .....	32

## Вступ

Серед матеріалів сучасної оптоелектроніки важливе місце посідає нітрид галію. Параметри його енергетичної структури, ширина забороненої зони  $E_g \approx 3,42$  eВ при 300 К, визначають можливості його використання у приладобудуванні. Особливо важливим для відповідних приладів є їх короткохвильова область випромінювання і фотодетектування. Зокрема, на основі *GaN* виготовляються потужні світлодіоди різноманітної структури. Так у випадку гетероструктур інтенсивне випромінювання отримане у широкій спектральній області. Важливим є ефективні процеси генерації і детектування випромінювання у мало опанованому синьо-фіолетовому діапазоні. Зокрема, інтенсивність випромінювання при 300 К може істотно змінюватися, що визначається технологічними особливостями отримання базового матеріалу та добором легуючих домішок. Перший з них визначається перехідними шарами між підкладкою та осадженим робочим шаром. Вони не тільки зменшують неузгодженість кристалічних ґраток матеріалів, але й суттєво вдосконалюють оптичні параметри і характеристики матеріалу. Зазначимо, що у нелегованому GaN можливо отримати люмінесценцію з високою квантовою ефективністю (приблизно 100%) в короткохвильовій області випромінювання. Разом з тим, проведені дослідження виявили значний внесок власних точкових дефектів (ВТД) кристалічної ґратки при формуванні випромінювання у епітаксійних шарах, що отримані молекулярно-променевою епітаксією. Тому важливим є дослідження кристалів GaN, оскільки вони не зазнають впливу підкладок.

Метою даної роботи є дослідження люмінесценції кристалів і епітаксійних шарів нітриду галію, співставлення їх властивостей та встановлення впливу технології отримання на можливості практичного використання.

## Розділ 1. Огляд літературні відомостей

### 1.1. Основні властивості нітрида галія

Нітрид галію є III-V сполукою і будова його кристалічної ґратки характеризується гексагональним розташуванням атомів. Ширина забороненої зони його становить  $E_g=3,42$  еВ при  $T=300\text{K}$ , а енергетична структура визначається прямими міжзонними переходами. GaN кристалізується в структурі в'юрциту, яка формується двома гексагональними щільно упакованими підґратками галію та азоту. Вони зміщені одна відносно другої на  $c/2$ , рис.1. Між складовими атомами галія та азота відбувається утворення тетраедричних зв'язків. Найменша відстань між катіоном та аніоном Ga-N становить  $1,94 \cdot 10^{-4}$  мкм.

Зонна структура нітриду галію характеризується прямими міжзонними переходами. Їх особливості досліджено за спектрами поглинання і відбивання, що дозволило провести їх теоретичні розрахунки. За ними встановлено, що головний мінімум зони провідності припадає на квазіімпульс  $k=0$  в центрі зони Бріллюена (точка  $\Gamma$ ). Кристалічне поле розщеплює валентну зону на однократно вироджену зону  $\Gamma_{1V}$  і двократно вироджену зону  $\Gamma_{6V}$ . Двократно вироджена зона  $\Gamma_{6V}$  розщеплюється на дві підзони  $\Gamma_{9V}$  і  $\Gamma_{7V}$  внаслідок спин-орбітальної взаємодії. До того ж, розташування зони  $\Gamma_{9V}$  відбувається вище за зону  $\Gamma_{7V}$ . Тому вершина валентної зони складається з трьох підзон.

Підтвердженням описаної вище структури є також залежність поглинання від поляризації фотонів, зокрема  $E \perp C$  для  $\Gamma_{9V} \rightarrow \Gamma_{7V}$  і  $E \parallel C$  для  $\Gamma_{1V} \rightarrow \Gamma_{1C}$ . При цьому за будь-якої поляризації можуть відбуватись що переходи  $\Gamma_{7V} \rightarrow \Gamma_{7C}$ . За таких умов оптичне поглинання залежить від поляризації падаючих фотонів. Вона визначає відповідну величину ширини забороненої зони з урахуванням зонної структури. За нею енергія спин-

орбітальної взаємодії  $\Delta_{so}$  становить 0,011eВ, а розщеплення кристалічним полем  $\Delta_{cr}$  –0,037eВ. У цілому на рис.1.2 наведено зонну структуру для нітриду галію.

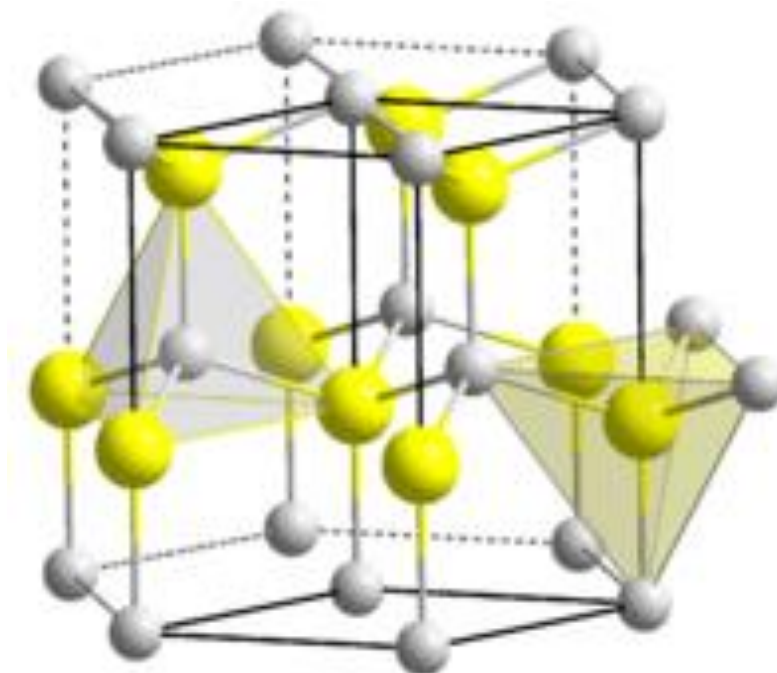


Рис.1.1 Кристалічна ґратка гексагональної модифікації нітриду галію

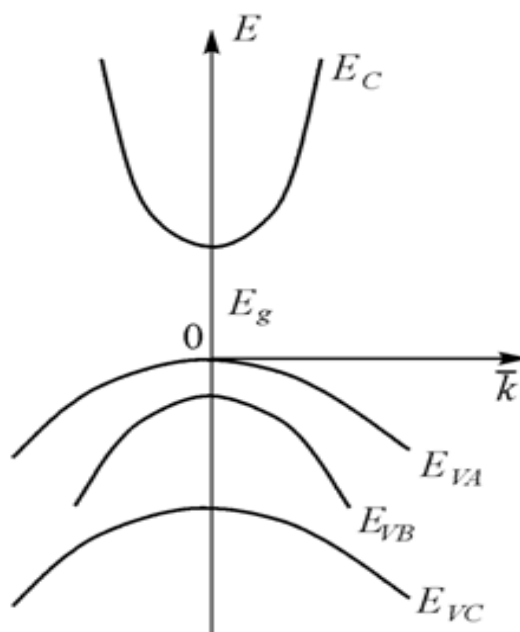


Рис. 1.2 Представлення структури зон провідності та валентної зони при  $k = 0$  у випадку кристалів гексагональної модифікації

Нітрид галію відрізняється від напівпровідникових III-V сполук арсенідів, фосфідів високою тугоплавкістю, більшою шириною забороненої зони і гексагональною будовою кристалічної ґратки ( на відміну від кубічної).

Вихідна сполука нітриду галію є білою, безколірною речовиною. Разом з тим, відповідно до типу легуючої домішки і технології отримання може набувати кольори жовтий, блакитний і навіть з сіруватим відтінком. GaN не зазнає хімічної взаємодії із соляною, азотною, сірчаною та плавиковою кислотами. Разом з тим, розчинення нітрид галію можна спостерігати в персульфаті калію, розчинах і розплавах лугів за температури 800К, а також при  $100 \div 170^\circ\text{C}$  в 85% розчині фосфорної кислоти. У випадку нагрівання на повітрі GaN залишається стійким до  $700^\circ\text{C}$ , а у вакуумі – до  $500^\circ\text{C}$ . Порошок GaN починає окислюватись на повітрі при  $T = 800^\circ\text{C}$ . При цьому повне завершення процесу окислення відбувається при  $1200^\circ\text{C}$  з одночасним утворенням  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ .

Електропровідність GaN становить *n*-тип. Типова концентрація вільних електронів складає  $10^{16}$ - $10^{17}$   $\text{cm}^{-3}$ . Показано, що така висока концентрація визначається наявністю вакансій азоту, оскільки енергія їх утворення є досить меншою в порівнянні з енергією утворення вакансій в підґратці галія. З літературних відомостей встановлено значення величини ефективних розмірів донору, акцептору та екситона, які становлять  $a_d=(20 \text{ } 5)\cdot 10^{-4}$  мкм,  $a_a=(4 \text{ } 1)\cdot 10^{-4}$  мкм,  $a_{ex}=(25 \text{ } 8)\cdot 10^{-4}$  мкм відповідно. Саме це визначається енергією зв'язку, а саме,  $E_d=40$  меВ,  $E_a=200$  меВ,  $E_{ex}=30$  меВ.

В таблиці 1.1 наведено основні параметри GaN

Таблиця 1.1

Основні параметри нітриду галію

Параметр	Значення
хімічна формула	GaN
молекулярна вага	83,728

Параметр	Значення
енергія утворення, ккал/моль	24,9
густина, г/см <sup>3</sup>	6,1
температура плавлення, °С	2000
кристалічна структура	<u>в'юрцит</u>
коефіцієнт лінійного розширення, 10 <sup>-6</sup> /К	
- 11а, 300 – 900К	5,59
- 11с, 300 – 700К	3,17
ширина забороненої зони $E_g$ , eВ	
- при 300К	3,42
- при 2К	3,5
- при 4,6К	3,5
$dE/dT$ , 10 <sup>-4</sup> eВ/град	2,7 – 4,5
енергія спин-орбітального розщеплення при 1,6К, <u>meВ</u>	11
оптичні переходи	прямі
ефективна маса, $m^*$	
- електронів:	0,10 – 0,25
- дірок:	0,6 – 0,7
максимальна рухливість, см <sup>2</sup> /В·с	380
мінімальний питомий опір, Ом·см	10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>-2</sup>
максимальний питомий опір, Ом·см	5·10 <sup>8</sup>
показник заломлення	2,1 – 2,4
діелектрична постійна:	
- $E_\infty$ високочастотна	5,8
- $E_0$ статична	12,2



Параметр	Значення
борівський ефективний заряд	3,2
коефіцієнт теплопровідності $k$ , Вт·см <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	1,7
молярна теплоємність $c$ , Дж·моль <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	30
температура Дебая $\theta$ , К	600
енергія утворення вільного екситону, меВ	28 – 31
акустичний деформаційний потенціал, еВ	7,5
швидкість звуку в с-напрямку, м/с	$5,75 \cdot 10^3$
термо е.р.с., мкВ/К	200
робота виходу при 10 Ом, еВ	4,1
енергія активації розкладу, ккал/моль/В	
- при 600 – 800°С	12,4
- при 400 – 600°С	17,7
енергія активації осадження на $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$ , ккал/моль	7,7 – 10,2

## 1.2. Оптичні властивості GaN

Для нітриду галію властиві прямі міжзонні переходи, що встановлено із досліджень оптичного поглинання. Коефіцієнт поглинання характеризується типовою залежністю від енергії фотонів, а саме  $\alpha = \alpha_0 (\hbar\omega - E_g)^{1/2}$ . Температурна залежність ширини забороненої зони узгоджується з відомим виразом Варшні -  $E_g = E_g(0) - 9.39 \cdot 10^{-4} T^2 / (T + 772)$ . Значення величини ширини забороненої зони при 0 К для нітриду галію 3,427 еВ.

Зонна структура нітриду галію дозволяє визначити характер процесів при формуванні випромінювальних переходів. Відповідно області фотолюмінесценції умовно поділяють на два спектральних діапазони –  $\hbar\omega \geq 3,0$  еВ та  $\hbar\omega < 3,0$  еВ. Вони формуються у нелегованих матеріалах. При легуючі домішки можуть здійснювати впливу на зазначені особливості. У випадку нелегованого нітриду галію можна спостерігати випромінювання в

ультрафіолетовій ділянці спектра. При проведенні легування різним типом домішок можна отримувати характерні спектри, для яких положення максимумі представлено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

## Положення максимумів спектрів випромінювання

Домішки	Положення максимуму	Температура дослідів
Li	2,23eV	77 К
<u>Be</u> , <u>V<sub>Ga</sub></u>	3,264 eV	4,2 К
<u>Be</u> , <u>Be<sub>Ga</sub></u>	2,36 eV	
<u>Mg</u> , <u>V<sub>Ga</sub></u>	3,264 eV	
<u>Dy</u>	3,15 eV	77 К
<u>Cd</u> , <u>V<sub>Ga</sub></u>	3,268eV	4,2 К
	3,263	1,6 К
<u>Cd</u> <u>Cd<sub>Ga</sub></u>	2,7 eV	
<u>V<sub>Ga</sub></u>	3,268eV	4,2 К
<u>Zn</u>	2,9 eV	
<u>Zn<sub>N</sub></u>	2,6 eV	
<u>Zn<sub>N</sub></u>	2,2 eV	

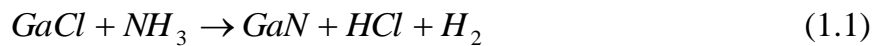
Варто відзначити, що в сучасній електроніці також відіграє важливу роль нітрид галія, оскільки на його основі розробляють і виготовляють

різноманітні типи джерела спонтанного та когерентного випромінювання, а також фотоприймачі в широкому діапазоні інфрачервоного і видимого спектрів.

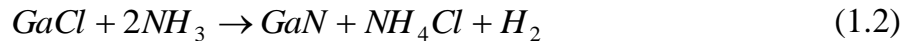
Дослідження відповідних процесів і розробка конструкцій приладів зумовило швидкий розвиток технології швидкодіючих інтегральних мікросхем, інтегральної оптики тощо. Для виготовлення у них відповідних приладів встановлено умови ефективного оптичного зв'язку. Показано, що використання для цього тільки III-V та II-VI сполук є недостатньою умовою. Відповідно постає актуальним опанування нових матеріалів і принципів взаємодії у приладах для ефективного перетворювання електричної енергії у світлову і навпаки. На даний час основними методами виготовлення III-V сполук і твердих розчинів являється епітаксія в газовій (ГФЕ) або рідкій (РФЕ) фазах, або ж комбінація епітаксії з дифузією. Подальші дослідження показали важливість молекулярно-променевої епітаксії. Відповідно постає необхідність розгляду особливостей вказаних процесів і можливих ускладнень.

### 1.3. Методи отримання шарів нітрида галію

Найбільш поширеним методом отримання GaN є епітаксія в газовій фазі. Зазначений процес забезпечує отримання монокристалічних шарів GaN. Найбільшого поширення набула епітаксія в хлоридно-гідридній системі. За нею отримання відбувається за схемою Ga-HCl-NH<sub>3</sub>-Ar(He). Отримання хлориду галію GaCl<sub>3</sub> хлоруванням галію проводиться при температурах 800-850 °C. Отримана сполука переноситься в зону осадження потоком інертного газу. Джерелом азоту є аміак, який подається в зону осадження по окремому ізольованому каналу. У визначеній області вирощування має місце гетерогенна реакція росту сполуки за температур 1050-1100°C згідно наступної реакції



За певних умов можливе часткове підтравлювання за оберненим процесом



З метою отримання однорідності необхідно проводити осадження методом епітаксії за великих швидкостей газових потоків, тобто "факельному режимі". Це зумовлено тим, що має місце сильна відмінність за густиною газів та парів, що приймають участь в реакціях. За таких умов не відбуватиметься гомогенізація газової суміші. Це являється принциповою відмінністю процес епітаксійного отримання нітриду галію від інших III-V сполук.

В якості вихідних пластин на які проводиться осадження GaN обирають лейкосапфір ( $\alpha-Al_2O_3$ ) з відповідною орієнтацією (0001),  $(11\bar{2}0)$  або ж  $(10\bar{1}2)$ , що проходили попереднє травлення у водні при високих температурах. Варто відзначити, що вже безпосередньо перед епітаксією, у реакторі, за високих температур додатково обробляють вихідні підкладки в суміші (HCl+Ar). Швидкість вирощування шару на лейкосапфірі становить  $\sim 1\text{мкм/хв}$ . Процес отримання випромінюючих світло структур на основі GaN проводиться за наступною послідовністю: 1) на початку нарощують шар нелегованого матеріалу; 2) в подальшому на цьому шарі зверху вирощують компенсований  $\bar{1}$ -шар, що леговано цинком. Нелегований шар володіє високою електронною провідністю. Зауважимо, що внаслідок ретроградної розчинності цинку можна в одному процесі проводити вирощування легованого шару за температури 900 С.

Зазначимо, що при виготовленні світлодіодів на основі нітриду галію спостерігаються певні обмеження у методі, зокрема, у інверсії вихідного n-типу електропровідності. Для її отримання необхідне легування цинком або магнієм в зачиненому об'ємі при величній тиску азота в околі  $10^9$  Па та температурах  $\sim 1500$  С. Варто відзначити, що отриманим на основі нітриду

галію світлодіоди можуть набувати різних спектральних діапазонів свічення та володіти великими значеннями величини квантового виходу.

Варіація області випромінювання також може здійснюватися на твердих розчинах на основі  $Al_xGa_{1-x}N$ . Вони також отримуються у потоках газу-носія в наступній системі  $Ga-Al-HCl-NH_3-Ar$ . Склад твердого розчину змінюється шляхом варіації площі поверхні розплавів галія та алюмінія, що взаємодіє з хлористим воднем. Для цього використовуються коміркові касети. Температура епітаксії становить  $\sim 1200^\circ C$ . Такі температури супроводжуються високою хімічною активністю сполук алюмінію. Тому проводиться додатковий захист кварцевого реактора шаром піровуглецю. Можливе також використання реакторів, виготовлених з корунда чи піролітичного нітриду бора.

Можливим є використання металоорганічних сполук при отриманні епітаксійних шарів нітриду галію і його твердих розчинів. Разом з тим, отримані в такий спосіб шари будуть поступатись отриманим у випадку використання хлоридно-гідридного процесу за своїми структурними характеристиками та рівнем неконтрольованих домішок. Схема зазначеного процесу наведена на рис. 1.3.

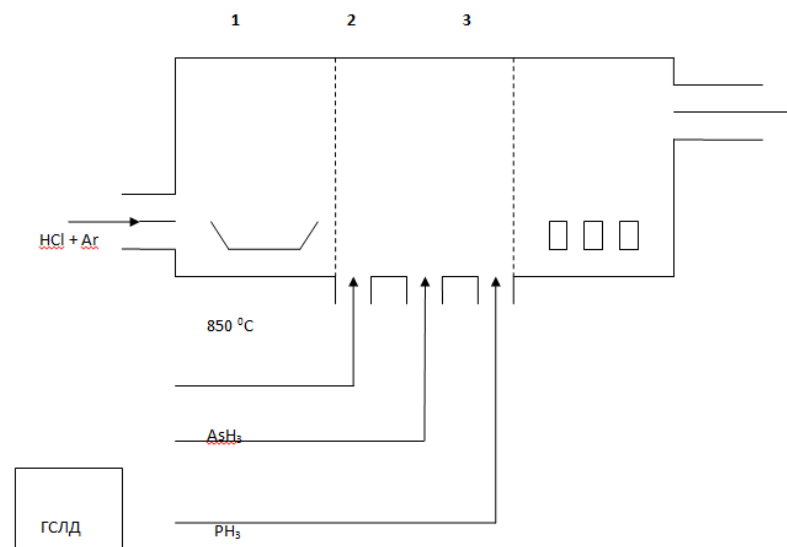


Рис. 1.3. Схематичне представлення технологічного процесу хлоридно-гідридним методом отримання епітаксійних шарів нітрида галія

#### 1.4. Отримання кристалів GaN

Отримання кристалів нітриду набагато менше вивчений процес на відміну від епітаксійних шарів. Разом з тим, узагальнення технологічних процесів дозволяє виділити наступні їх особливості :

- сполуки із галієм і азотом розташовуються за певних умов;
- попередньо отриманий порошок нітриду галію ре кристалізують в аміаку;
- металічний галій чи його сполуки нітрують аміаком.

Найбільші прозорі кристали гексагональної симетрії отримано у проточних герметичних системах. Їх довжина до 5мм і можуть легуватися, зокрема цинком. Із проточних методів найчастіше отримується нітрид галію нітруванням металічного галію аміаком. Для цього режими становлять  $T=1150\text{ }^{\circ}\text{C}$  при витратах аміаку  $\approx 70\text{-}80\text{ см}^3/\text{хв}$ . Відповідно в горизонтальному кварцовому реакторі через 1 – 2 годин в зоні галію відбувається утворення кристалів шириною до 40 мкм та довжиною 1 мм.

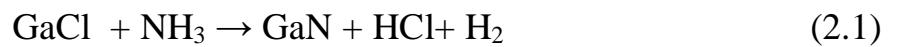
Прозорі з чіткою огранкою кристали шириною до 600 мкм отримуються нітруванням окису галію  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  аміаком за температур 1150-1200  $^{\circ}\text{C}$  та витратах аміака  $\sim 80\text{-}120\text{ см}^3/\text{хв}$ . Їх електричний опір становить  $0,1\text{-}10^{-15}\text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Важливим у даному методі є попереднє вакуумування до  $10^{-5}$  Торр при одночасному розігріві початкових продуктів після загрузки. Час синтезу становить 1 – 2 години.

Конструкція використовуваної установки спрощується при використанні порошку нітриду галію для отримання кристалів. Проте необхідні додаткові затрати задля попереднього синтезу порошку та його обов'язкової очистки шляхом спеціальної обробки. До того ж, тривалість синтезу зростає до 24-72 годин, а його скорочення на 5 год призводить до зменшення розмірів кристалів. Відмітимо, що відомості про можливість легування (Zn, Cd, Mg) під час вирощування кристалів шляхом нітрування аміаком порошку нітриду галію поки відсутні.

## Розділ 2 ОТРИМАННЯ І ВЛАСТИВОСТІ GaN

### 2.1. Отримання нітриду галію

Нітрид галію отримувався осадженням з газової фази за хлоридно-гідридним способом. За цим методом виготовлялися епітаксійні шари і монокристали. Вказаний процес проводилося у кварцевому реакторі за відповідною основною реакцією



Джерело металічного галію і підкладки лейкосапфіру (чи графіту у випадку кристалів) розташовувалися в області температурного плато відповідно до кривої його розподілу. Визначено оптимальні температурні режими отримання досліджуваних зразків. Встановлено, що при отриманні епітаксійних шарів і кристалів GaN температури їх росту різняться на 150-200°C. Зокрема, при  $T=1150-1200^\circ\text{C}$  отримуються прозорі, безкольорові кристали гексагональної форми довжиною до 5 мм і товщиною 1мм, рис.2.1.

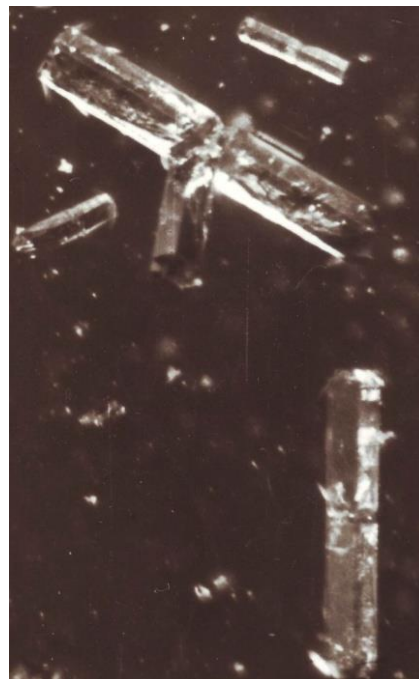


Рис. 2.1. Фотографія кристалів нітриду галію отримана при збільшенні  $\times 20$ .

Епітаксійні шари отримувалися на підкладках лейкосапфіру, орієнтованих у площині  $[10\bar{1}\bar{2}]$  і підготовлених за відповідною технологією. Це дозволяло отримувати структурно досконалий матеріал. Встановлено оптимальне розташування джерел і підкладок у реакторі для отримання оптично прозорих безкольорових епішарів товщиною до 20 мкм.

Структурна досконалість отриманих експериментально зразків досліджувалася на стандартній рентгено-дифракційній установці за відомою методикою. За їх результатами проводилося дослідження оптичних властивостей отриманих епітаксійних шарів і кристалів. Такий комплексний аналіз дозволяв вдосконалювати процес отримання і визначити оптимальні режими вирощування структурно досконалого матеріалу.

## **2.2. Методика проведення досліджень оптичного пропускання**

Дослідження оптичного пропускання проводилось на установці, схематичне представлення якої наведено на рис. 2.2.

Для коректності досліджень використовувалася галогенна лампа ELC/C (1) якій притаманний монотонний гладкий спектр. Зразки для досліджень (3) розміщувалися перед входом у монохроматор МДР-23 (4). Спектральний розклад здійснювався дифракційною ґраткою 1200 шт/мм (з оберненою лінійною дисперсією  $13 \text{ \AA}/\text{мм}$ ). На виході з спектрального приладу МДР-23 спектральний розподіл інтенсивності сигналу реєструвався за допомогою фотоелектронного помножувача ФЕП-79. Його живлення проводилося за допомогою блока ВС-23(6).

При дослідженні сигналів в області довгохвильового краю поглинання проводилося його переривання обтюратором (7) із подальшим вимірюванням його величини за допомогою стандартної системи синхронного детектування. Вона являє собою з'єднані послідовно селективний підсилювач У2-6 (8) і синхродетектор КЗ-2 (9). Для обробки сигналу додатково використовується підсилювач (10) з фотодіодом (11),



тому на другий вхід синхродетектора подається опорний сигнал. Відповідно сигнал на виході системи синхродетектування записувався за допомогою самописця КСП-2 (12). Точність отриманих даних на оптичній установці становить 3 %.

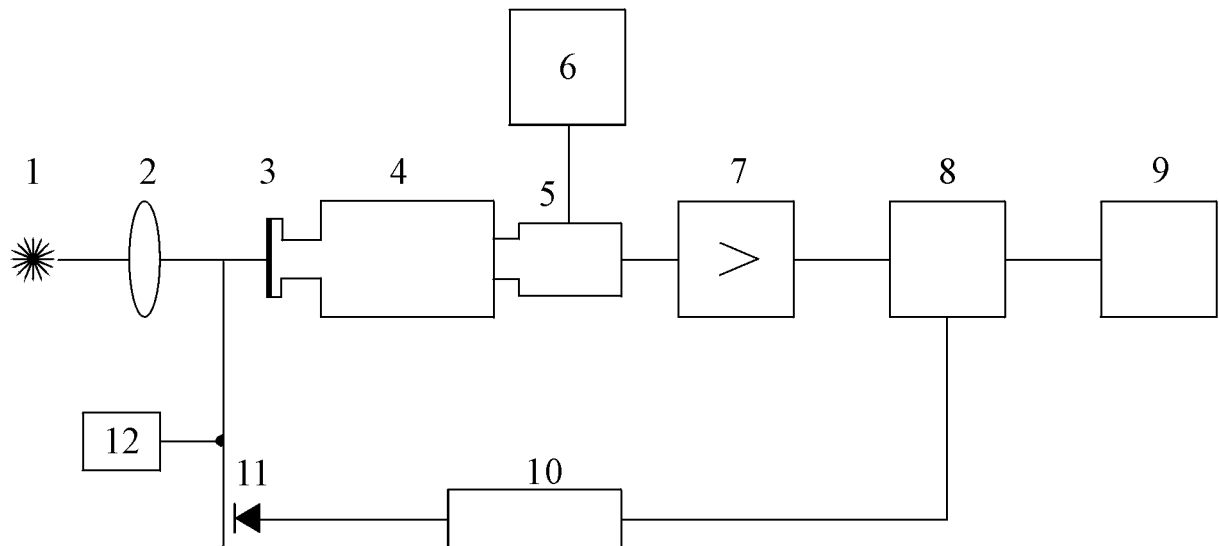


Рис. 2.2. Схема експериментальної установки для дослідження спектрів оптичного пропускання

- |                                 |                                   |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1 – джерело світла;             | 7 – селективний підсилювач У2-6;  |
| 2 – кварцовий конденсатор;      | 8 – синхродетектор КЗ-2;          |
| 3 – досліджуваний зразок;       | 9 – самописець КСП-2;             |
| 4 – спектральний прилад МДР-23; | 10 – підсилювач опорного сигналу; |
| 5 – фотоприймач;                | 11 – фотодіод;                    |
| 6 – блок живлення фотоприймача; | 12 – обтюратор.                   |

Отримані результати вимірювань поглинання на довгохвильовому краї узагальнюються за відомим законом Бугера

$$I = I_0 \exp(-\alpha d), \quad (2.2)$$

У подальшому отримані експериментальні значення будуються в координатах  $\alpha^2 \sim \hbar\omega$ . За ними визначається тип енергетичної структури.

За результатами досліджень власного поглинання та обробки за відповідною методикою можливо визначити тип оптичних переходів та ширину забороненої зони  $E_g$ . Зокрема, для прямих міжзонних переходів залежність  $\alpha(\hbar\omega)$  апроксимується відомим виразом

$$\alpha(\hbar\omega) = \alpha_0(E_g - \hbar\omega)^{1/2} \quad (2.3)$$

де  $\alpha_0$  це параметр, який не залежить від енергії ( $\hbar\omega$ ). Проведення екстраполяції лінійної ділянки залежності  $\alpha^2(\hbar\omega)$  на вісь енергій фотонів дозволяє визначити значення  $E_g$ .

### 2.3. Методика виміру спектрів оптичного відбивання

Дослідження оптичного відбивання дозволяє визначити параметри енергетичної структури досліджуваного матеріалу. Для їх здійснення проводилися дослідження з використанням установки, блок-схему якої наведено на рис. 2.3. Спектральним приладом слугував дифракційний монохроматор МДР-23, роздільна здатність якого забезпечувала можливість виявлення тонкої структури в енергетичному розподілі. Джерелом оптичного випромінювання слугувала галогенна лампа ELC/C. Оптичний сигнал вимірювався фотоелектронним помножувачем ФЭП-79, чутливість якого охоплює спектральний діапазон 0,30-0,82 мкм. Живлення фотоприймача здійснювалось за допомогою спеціального блоку живлення ВС-22.

При дослідженні оптичного відбивання сигнал від зразка фокусувався за допомогою оптичної системи з спеціальною кварцовою лінзою на вхідну щілину спектрального приладу. Для цього забезпечення досліджувані зразки розташовувалися у тримачі спеціальної конструкції.

Проведення вимірювань передбачає можливість отримання даних за класичною методикою. Також з метою виявлення особливостей у оптичних спектрах і для підвищення точності вимірювань використовувався метод  $\lambda$ -модуляції. Зазначений метод дозволяє визначити величину ширини забороненої зони  $E_g$  та енергетичну структуру досліджуваного матеріалу.

Остання визначається оптичними переходами у центрі зони Бріллюена через підзони, відщепені внаслідок дії кристалічного поля  $\Delta_{cr}$  та спин-орбітальної взаємодії  $\Delta_{so}$  у досліджуваному напівпровіднику. Вказані особливості при використанні класичних методик не виявляються.

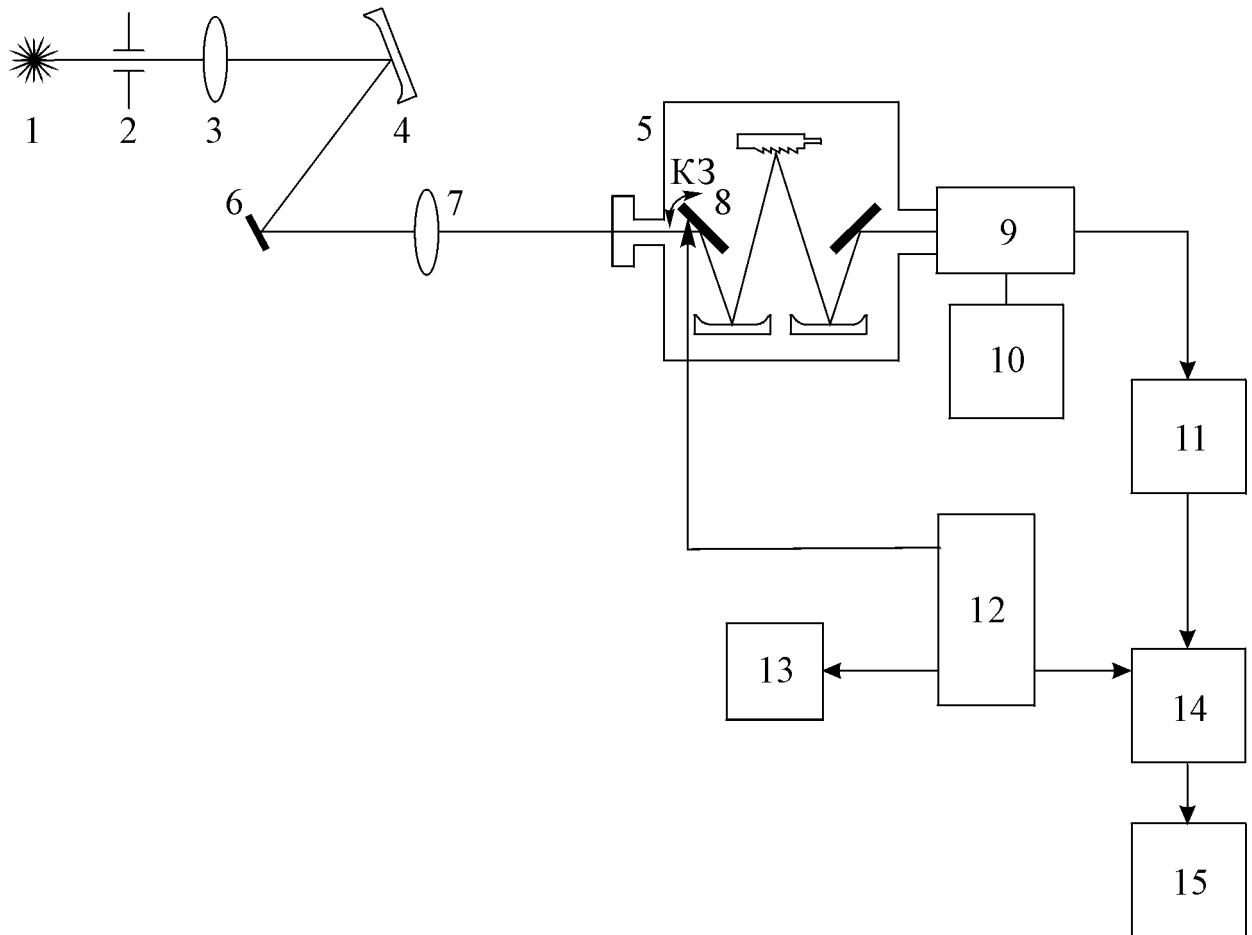


Рис. 2.3 Принципова схема експериментальної установки для проведення досліджень спектрального розподілу оптичного відбивання

1 – галогенна лампа ELC/C;  
 2 – обмежуюча діафрагма;  
 3, 7 – лінзи з кварцу;  
 4 – обертальне увігнуте дзеркало;  
 5 – монохроматор МДР-23;  
 6 – досліджувані зразки;  
 8 – модулятор (коливне дзеркало);

9 – фотоприймач;  
 10 – блок живлення фотоприймача;  
 11 – селективний підсилювач В6-9;  
 12 – генератор низьких сигналів ГЗ-112;  
 13 – вольтметр ВЗ-39;  
 14 – синхродетектор КЗ-2;  
 15 – самописець КСП-4.

При проведенні  $\lambda$ -модуляції вимірюється не звичайний оптичний спектр напівпровідника, а відповідні до особливостей структури зміни в спектрі, які проявляються внаслідок використання модулятора. За таких умов має місце зміна довжини хвилі світла на виході з монохроматора згідно наступного рівняння

$$\lambda = \lambda_o + \Delta\lambda \cos \Omega t \quad (2.4)$$

де  $\Omega$  це частота модуляції,  $\Delta\lambda$  являється амплітудою (глибиною) модуляції. Таким чином на виході з фотоприймача матиме місце зміна сигналу у відповідності до закону:

$$I(\lambda) = I(\lambda_o + \Delta\lambda \cos \Omega t) \quad (2.5)$$

Сигнал набуває наступного складного виразу і при малих  $\Delta\lambda$  має вигляд

$$\begin{aligned} I(\lambda) = & I(\lambda_o) + \left(\frac{dI}{d\lambda}\right)_{\lambda_o} \Delta\lambda \cos \Omega t + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2 I}{d\lambda^2}\right)_{\lambda_o} (\Delta\lambda)^2 \cos^2 \Omega t + \\ & + \frac{1}{6} \left(\frac{d^3 I}{d\lambda^3}\right)_{\lambda_o} (\Delta\lambda)^3 \cos^3 \Omega t + \dots = I(\lambda_o) + \frac{1}{4} \left(\frac{d^2 I}{d\lambda^2}\right)_{\lambda_o} (\Delta\lambda)^2 + \\ & + \left[ \left(\frac{dI}{d\lambda}\right)_{\lambda_o} + \frac{1}{8} \left(\frac{d^3 I}{d\lambda^3}\right)_{\lambda_o} (\Delta\lambda)^2 \right] \Delta\lambda \cos \Omega t + \frac{1}{4} \left(\frac{d^2 I}{d\lambda^2}\right)_{\lambda_o} (\Delta\lambda)^2 \cos 2\Omega t + \\ & + \frac{1}{24} \left(\frac{d^3 I}{d\lambda^3}\right)_{\lambda_o} (\Delta\lambda)^3 \cos^3 \Omega t + \dots \end{aligned} \quad (2.6)$$

У наведеному виразі доданки з множниками  $\cos \Omega t$ ,  $\cos 2\Omega t$ ,  $\cos 3\Omega t$  відповідають першій, другій чи третій похідній. Налаштовуючи систему синхродетектування на відповідну частоту  $\Omega$ ,  $2\Omega$  і т.д. можна проводити добір складових, що відповідатимуть виключно одній з частот. Саме це забезпечуватиме експериментальне вимірювання спектральних залежностей першої, другої і т.д. похідних від вихідних оптичних спектрів.

У даному випадку  $\lambda$ -модуляція здійснювалася внаслідок періодичних механічних коливань відбиваючого дзеркала, розташованого усередині монохроматора. Експериментально встановлено, що оптимальний робочий діапазон частот модуляції становить 10-200 Гц. Його можливо отримати

живленням модулятора за допомогою звукового генератора ЗГ112-2. Також з нього подавався сигнал на синхронізуючий вхід детектора.

## 2.4. Визначення випромінюючих властивостей GaN

Важливим для практичного використання є випромінюючі властивості, як передумови виготовлення на їх основі джерел випромінювання. В його основі проявляє себе явище люмінесценції, як надлишка випромінювання світла над тепловим, його тривалість набагато перевищує період звичайних оптичних коливань. Відповідно до енергії, що поповнюється, важливим різновидом люмінесценції є фотолюмінесценція, як світіння під дією світлових променів оптичного діапазону частот.

Отримані шари і кристали GaN характеризуються інтенсивним випромінюванням при його збудженні опроміненням ультрафіолетового діапазону, а саме  $\lambda = 337$  нм. Для цього використовувався лазер ЛГІ-21 (1). У цілому дослідження спектрів фотолюмінесценції здійснювалися на експериментальній установці, схема якої наведена на рис. 2.4.

Довжина хвилі збуджуючого лазера становить 337 нм відповідає енергії збудження 3,68 еВ. Така величина перевищує ширину забороненої зони GaN –  $E_g = 3,42$  еВ. Це є передумовою коректних досліджень фотолюмінесцентних властивостей даного широкозонного напівпровідника. Його випромінювання фокусується лінзою (2) на вхідну щілину спектрального приладу (3). Розподіл інтенсивності за спектром реєструється фотопомножувачем (4) і вимірюється відповідною системою (6-8). Спектри записуються самописцем КСП-2 (9). Будуються спектри фотолюмінесценції відповідно до залежності енергії фотона  $\hbar\omega$  від його енергії  $N\omega$ . При дослідженні за методом  $\lambda$ -модуляції вимірюється диференціальний спектр першої та другої похідних. Практично метод  $\lambda$ -модуляції реалізується при коливаннях вхідного дзеркала спектрального приладу (3) з частотами, що відповідають першій, другій і т.д. похідним. Для здійснення цього

використовується звуковий генератор ГЗ-112. Налаштування відповідної частоти дозволяє експериментально фіксувати диференційні спектри похідних. За ними можливо виявити складові смуги в загальному спектрі, який визначає фотолюмінесценцію досліджуваного GaN.

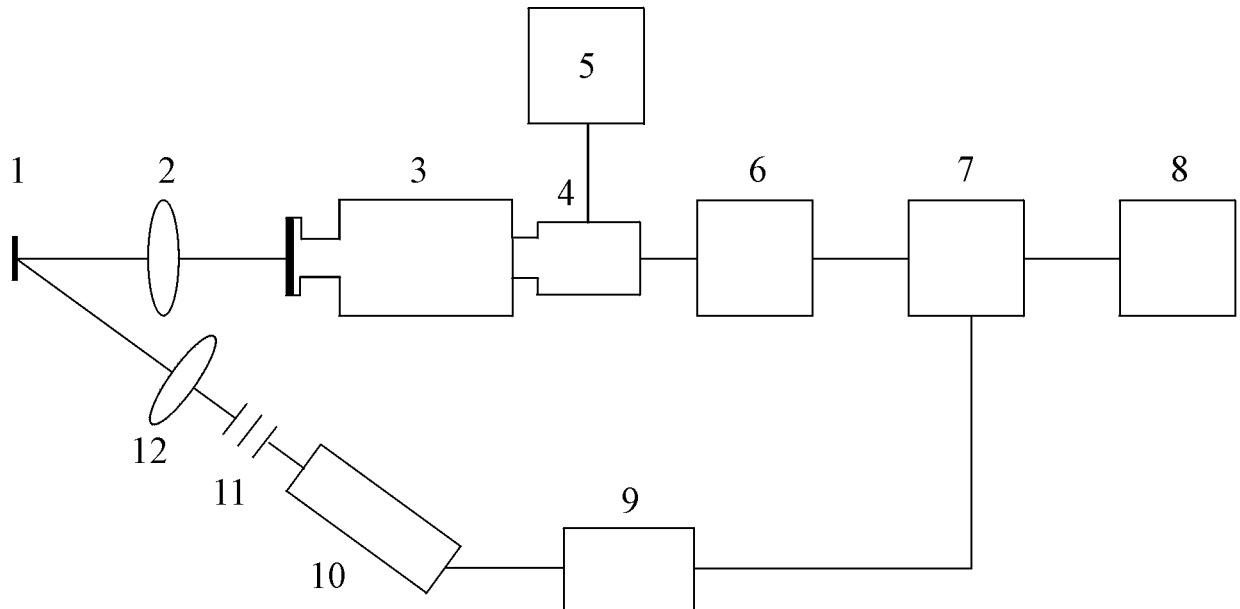


Рис. 2.4. Схематичне представлення установки для проведення експериментальних досліджень спектрального розподілу випромінювання

- |                                  |   |
|----------------------------------|---|
| 1 – об’єкт досліджень;           | 7 – синхродетектор В9-2;                |
| 2 – лінзи з кварцу;              | 8 – самописець КСП-2;                   |
| 3 – спектральний прилад МДР-23;  | 9 – блок живлення лазера;               |
| 4 – фотодетектор;                | 10 – лазер ЛГИ-21;                      |
| 5 – блок живлення фотодетектора; | 11 – набір послаблюючих світлофільтрів; |
| 6 – селективний підсилювач У2-6; | 12 – кварцова лінза.                    |

## 2.5. Оптичне пропускання та відбивання шарів нітриду галію

Отримані хлоридно-гідридним методом епітаксійні шари і кристали GaN характеризуються інтенсивною фотолюмінесценцією у короткохвильовій області  $\Delta\lambda=0,42\div 0,35$  мкм. Висока її ефективність

випромінювання свідчить про оптимальність режимів вирощування, які забезпечують формування досконалої кристалічної структури. Це підтверджується проведеними дослідженнями параметрів їх зонної структури за методами оптичного довгохвильового поглинання  $T_\omega$  та відбивання  $R_\omega$ . Використання методу  $\lambda$ -модуляції істотно збільшило чутливість досліджень, рис. 2.5. За отриманими результатами вимірювань їх ширина забороненої зони становить  $E_g=3.42$  еВ при 300К.

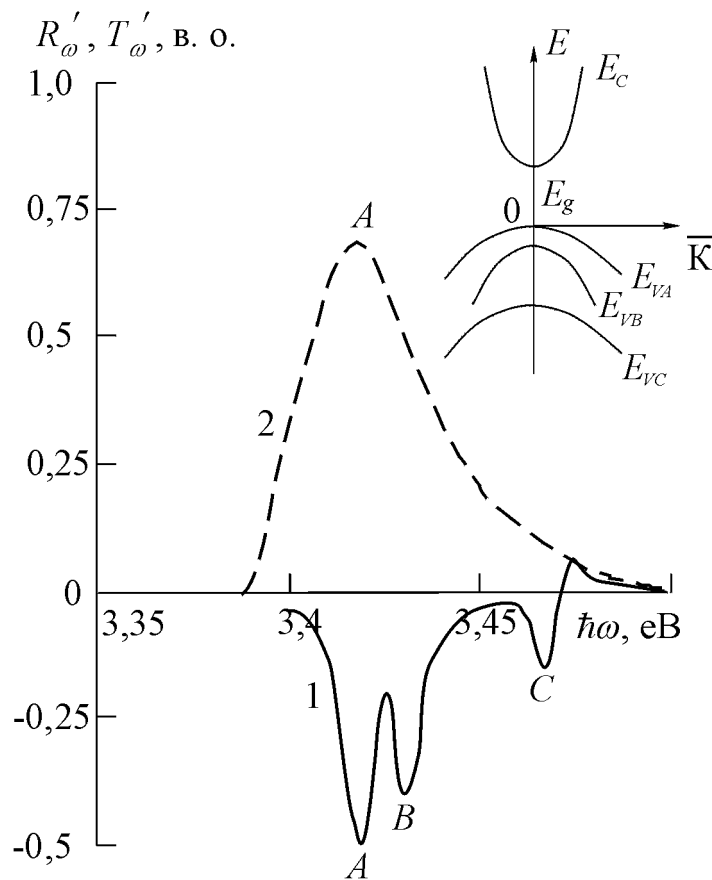


Рис. 2.5. Диференційні спектри оптичного відбивання (1) і пропускання (2) нелегованого  $GaN$ .  $T = 300$  К. На вставці – зонна структура нітриду галію у  $\Gamma$ -точки.

Визначено базові параметри їх зонної структури, а саме енергію розщеплення на підзони валентної зони внаслідок дії кристалічного поля  $\Delta_{CR}$ , а також спін-орбітальної взаємодії  $\Delta_{SO}$ . За отриманими диференціальними кривими встановлено їх величини –  $\Delta_{SO} \approx 48$  меВ і  $\Delta_{CR} \approx 10$  меВ. Встановлені параметри

зонної структури свідчать про гексагональну кристалічну ґратку отриманого *GaN*.

## 2.6. Випромінюючі властивості кристалів і шарів нітриду галію

Встановлені умови росту дозволили отримати на нелегованих плівках і кристалах *GaN* інтенсивну фотолюмінесценцією у короткохвильовій області. Випромінювання нелегованих кристалів охоплює крайовому діапазоні із спектром при  $\Delta\lambda=0,35\div 0,36$  мкм, який при 300К описується двома складовими, рис. 2.6.

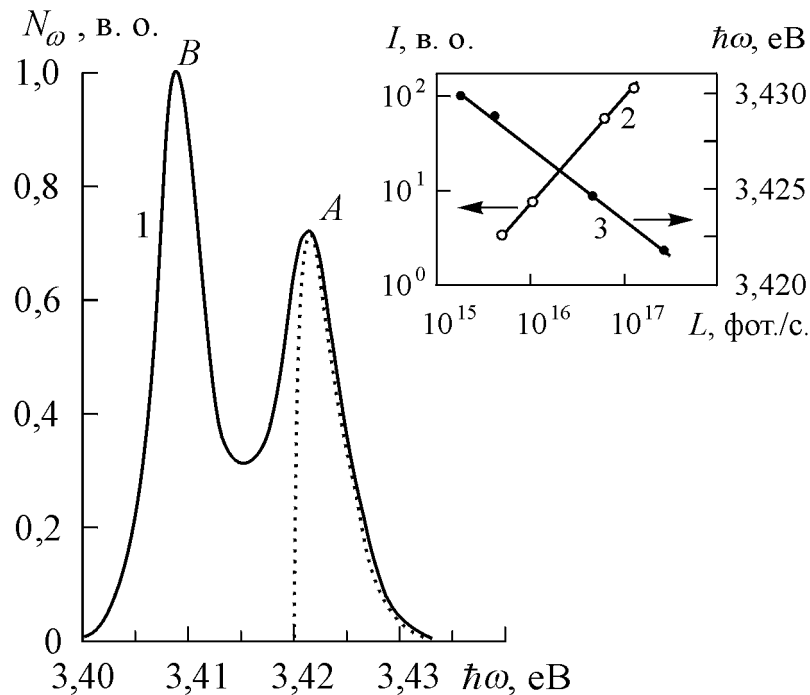


Рис. 2.6 Спектр випромінювання кристалів *GaN* при міжзонних (А) та екситонних (В) переходах. На вставці: залежність інтенсивності (2) смуги В та положення її максимуму (3) від рівня фотозбудження  $L$ .  $T = 300$  К.

Максимум смуги А припадає на енергію фотонів  $\hbar\omega = 3.425$  еВ при 300 К. Його положення не залежить від рівня фотозбудження  $L$  при зміні його величини на 3 порядки. Температурна залежність його положення



аналогічна до температурної залежності ширини забороненої зони. Характер спектрального розподілу добре апроксимується теоретичним виразом для міжзонних випромінювальних переходів

$$N_{\omega} = (\hbar\omega)^2 (\hbar\omega - E_g)^{1/2} \exp\left[-\frac{\hbar\omega - E_g}{kT}\right] \quad (2.7)$$

де  $k$ - стала Больцмана,  $T$ -температура. Таким чином, за отриманими відомостями для теоретичного представлення і встановлені властивості вказують на міжзонну випромінювальну рекомбінацію, яка визначає формування випромінювання кристалів  $GaN$  в області енергій фотонів  $\hbar\omega \geq E_g$ .

Друга смуга їх випромінювання з максимумом при  $\hbar\omega \leq E_g$  (3.642 eV) характеризується наступними властивостями: 1) інтенсивність випромінювання  $I$  змінюється при збільшенні рівня збудження  $L$  за законом  $I \sim L^{1.5}$ ; 2) максимум  $\hbar\omega_m$  зсувається при зростанні  $L$  в область менших енергій квантів. Такі властивості притаманні екситонній фотолюмінесценції. Дана природа випромінювання характерна для структурно досконалих матеріалів. Відповідно, її спостереження, а також наявність саме міжзонної рекомбінації, свідчать про вдало визначені умови отримання структурно досконалих кристалів. У цілому отриманий матеріал може бути використаний при виготовленні на його основі ефективних випромінювачів на фіолетовий і ультрафіолетовий діапазони.

Зазначимо, що квантова ефективність випромінювання кристалів  $GaN$  становить  $\eta \approx 6-8\%$ . Відповідний аналіз і вимірювання проводилися за відомою методикою. Для типових кристалів  $ZnS$   $\eta \approx 1-3\%$ , а для  $ZnSe$  –  $\eta \approx 0,5-0,8\%$ .

Встановлено, що люмінесценція нелегованих шарів  $GaN$  припадає на діапазон енергій фотонів  $\hbar\omega = 3,1 \div 3,5 \text{ eV}$ , рис. 2.7. Випромінювання охоплює як крайову область  $\hbar\omega \geq E_g$ , так і фіолетовий діапазон при  $\hbar\omega < E_g$ . У першому з них властивості випромінювання і кореляція експериментального спектра із

розрахованою за виразом (2.7) кривою при  $E_g = 3,42$  еВ свідчать про міжзонну випромінювальну рекомбінацію, смуга  $A$  на рис. 2.7.

В області  $\hbar\omega < E_g$  інтенсивність випромінювання і його спектр вказує на переходи носіїв заряду за участю енергетичних станів. Зважаючи на відсутність легування шарів  $GaN$  їх утворення обумовлено власними точковими дефектами (ВТД) кристалічної ґратки. Це підтверджується проведеним наступним аналізом їх природи і відповідних властивостей.

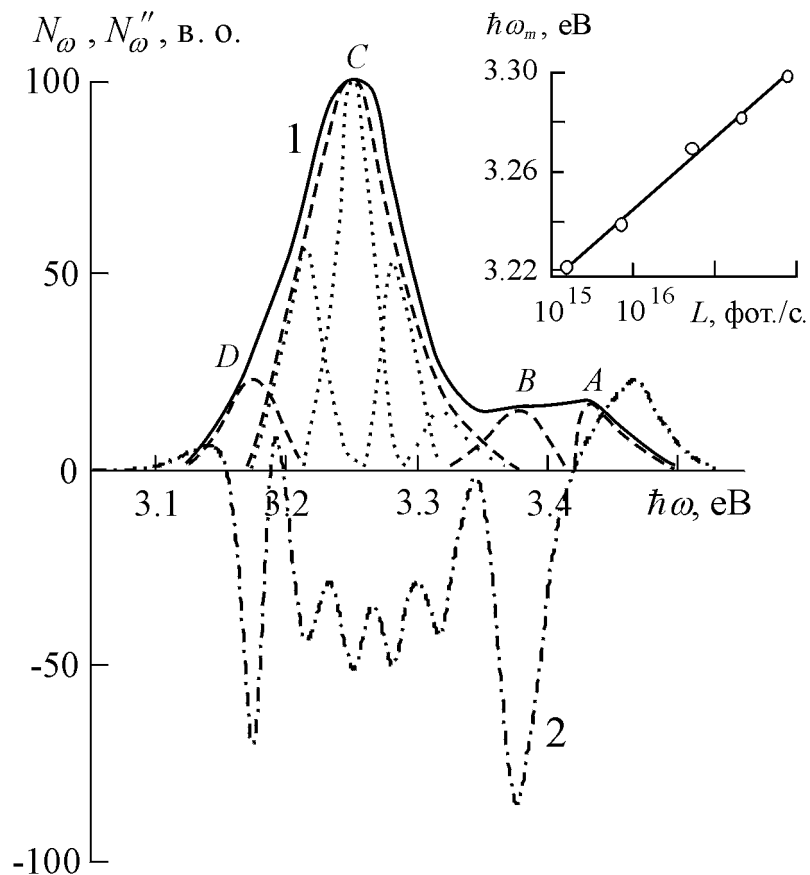


Рис. 2.7. Звичайні  $N_\omega$  (1) та диференційні  $N'_\omega$  (2) спектри фотолюмінесценції нелегованих епітаксійних плівок нітриду галію та розраховані методом Алєнцева-Фока складові смуги, що зумовлені міжзонною рекомбінацією ( $A$ ), за участю донорних ( $B$ ) та акцепторних ( $D$ ) станів утворених  $V_N^\bullet$  і  $V'_{Ga}$  відповідно, а також їх асоціатів  $V_N^\bullet V'_{Ga}$  (смуга  $C$ ). На вставці наведено залежність положення максимуму смуги  $C$  від рівня фотозбудження

Встановлено, що випромінювання досліджуваного нелегованого  $GaN$  при  $\hbar\omega < E_g$  формується за участю складових  $B$ ,  $C$  і  $D$ , рис.2.7. Смути  $B$  та  $D$  у спектрі характеризуються наступними властивостями: по-перше, їх контур симетричний і півширина складає  $\sim 1,5kT$ ; по-друге, положення максимумів смуг  $\hbar\omega_m$  не залежить від  $L$  в межах трьох порядків його зміни; по-третє, різниця енергій  $E_g - \hbar\omega_m + kT/2$  і складає 0,045 еВ і 0,24 еВ для смуг  $B$  з  $\hbar\omega_m = 3,375$  еВ і  $D$  з  $\hbar\omega_m = 3,18$  еВ відповідно. Температурні залежності інтенсивності випромінювання  $I(T)$  в області максимумів спектрів і побудовані в координатах  $\ln I$  від  $1/T$  відповідно до відомого класичного апроксимуються прямими у діапазоні 80-300 К. Визначені з їх нахилу значення  $E_T$  складають 0,042 еВ і 0,23 еВ для  $\hbar\omega_m = 3,375$  еВ і  $\hbar\omega_m = 3,18$  еВ та добре корелюють з отриманими за  $E_g - \hbar\omega_m + kT/2$ . Визначені властивості та аналіз їх природи вказує на донорні і акцепторні центри, які утворюються зарядженою додатньою вакансією азоту  $V_N^\bullet$  (смути  $B$ ) і від'ємною однозарядною вакансією галію  $V'_{Ga}$  (смути  $D$ ). Відповідно характер випромінювання визначається переходами за моделями Ламбе-Кліка і Шена-Клазенса відповідно. До того ж, для них зміна рівня збудження  $L$  не впливає на положення максимумів, що є однією з найважливіших ознак рекомбінаційних процесів за участю окремих центрів. Зазначені складові  $B$  і  $D$  у оптичних спектрах явно виявляють себе при дослідженнях за  $\lambda$ -модуляційною спектроскопією.

Разом з тим, домінуючою складовою у спектрі при  $\hbar\omega < E_g$  є широка смуга  $C$  з  $\hbar\omega_m = 3,26$  еВ. Дослідження виявили зміну положення максимуму складової  $C$  при зміні  $L$ , вставка на рис.2.7. Така властивість випромінювання є головною ознакою рекомбінації на донорно-акцепторних парах (ДАП). Найбільш ймовірно, що вони утворюються протилежно зарядженими центрами  $V_N^\bullet$  і  $V'_{Ga}$ , розташованими на відповідних відстанях  $r$  у кристалічній ґратці. Її можливі значення встановлено за дослідженнями методом  $\lambda$ -модуляції, які виявили у диференціальному спектрі  $N''_\omega$  за його осцилюючим

характером наявності щонайменше чотирьох смуг, рис. 2.7. Їх максимуми розташовані при 3,33, 3,28, 3,24 і 3,21 еВ, що відповідає відстаням між партнерами ДАП  $V_N^\bullet$  і  $V_{Ga}'$  6,6, 8,1, 10,7 і 16,2 Å згідно обчисленням за моделлю Еппла-Віл'ямса-Пренера. Наявність цих смуг підтверджується аналітичними розрахунками за методом Алєнцева-Фока.

Ефективне випромінювання у синьо-фіолетовій області спектра отримується при легуванні *GaN* домішкою *Zn*. Спостерігається істотне (4 порядки) збільшення його інтенсивності і максимум спектра при енергії фотонів у  $\hbar\omega=2,95\text{eV}$ , рис. 2.8. Квантова ефективність набуває значення  $\eta\approx 9-12\%$ . Одним із пояснень такого збільшення можуть бути зміни у спектральному розподілі їх випромінювання.

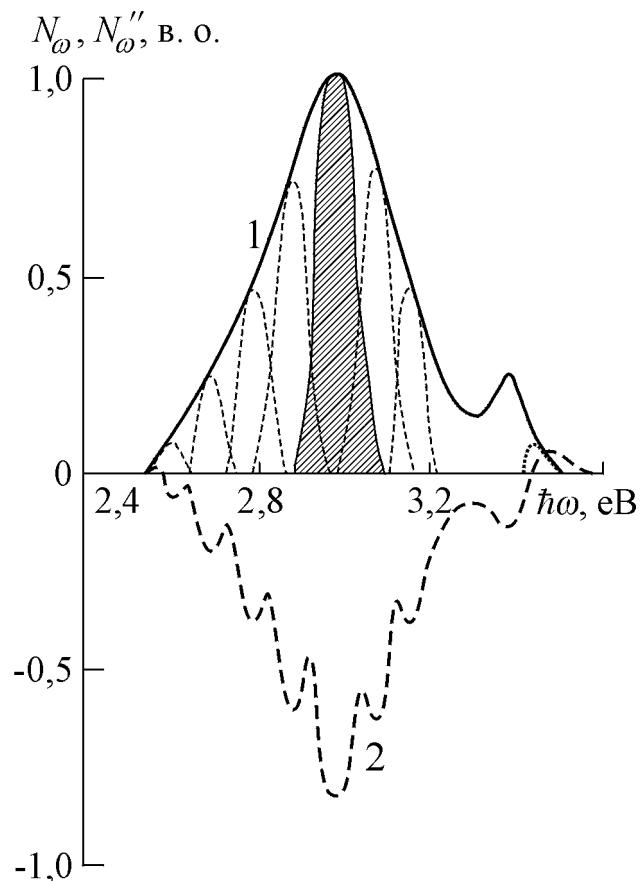


Рис. 2.8. Звичайні (1) та диференційні (2) спектри фотолумінесценції шарів нітриду галію легуваного *Zn* в концентрації  $10^{18}\text{cm}^{-3}$  отримані при 300К.

Властивості випромінювання відповідають процесам рекомбінації за участю одного локального центра. Зокрема,  $\hbar\omega_m$  залежить лінійно від  $L$  при його зміні в межах  $10^{14}$ - $10^{18}$  фот/с. Різниця енергій  $E_g - \hbar\omega_m + kT/2$  становить 0,483 еВ, що узгоджується з енергією термічної активації центра –  $E_T = 0,46$  еВ. Дослідження порога інфрачервоного оптичного гасіння ФЛ внаслідок переходів носіїв заряду типу валентна зона – акцептор дає значення (0,48 еВ). Показано, що такий центр є акцептором і утворюється при заміщенні галію цинком  $Zn_{Ga}$ . Відповідно, випромінювання формується внаслідок рекомбінації вільних електронів з локалізованими на акцепторах дірками. Півширина спектра випромінювання  $\hbar\omega_{1/2} \sim 0,7$  еВ набагато перевищує  $2kT$  при 300 К. Вона істотно збільшується при зростанні концентрації легуючої домішки  $Zn$  і  $L$ . Також зазначимо, що глибина залягання центрів  $Zn_{Ga}$  відповідає критерію  $E_a > 3\hbar\omega_0$ . Отримане вказує на електрон-фононну взаємодію глибоких рівнів. Як відомо, у цьому випадку крім основної смуги формуються складові її фононних повторень. У даному випадку вони явно спостерігаються при дослідженнях методом  $\lambda$ -модуляції. В спектрі другої похідної  $N''_{\omega}$  їм відповідають еквідістантні з  $\hbar\omega_0 \approx 89$  меВ смуги, крива 2 на рис. 2.8. Відстань між ними відповідає енергії  $LO$ -фонону ( $\sim 90$  меВ) в  $GaN$ . Таким чином, спектр люмінесценції шарів  $GaN <Zn>$  формується при випромінюванні чотирьох і поглинанні двох  $LO$ -фононів. Це пояснює широку смугу їх випромінювання.

Збільшення температури (до 380-410°C) незначно зменшує інтенсивність і не впливає на спектральний склад. Проведення температурних і часових вимірювань дозволили встановити стійкість та повторюваність властивостей, характеристик і параметрів шарів і кристалів  $GaN$  до дії теплового опромінення до 420°C.

## Висновки

1. Показано, що епітаксійні плівки і кристали  $GaN$  з стабільними параметрами і характеристиками можуть бути отримані хлоридно-гідридним методом. За ним формується досконала гексагональна гратка, зонна структура якої характеризується параметрами  $E_g=3,42$  еВ,  $\Delta_{CR} \approx 10$  меВ і  $\Delta_{SO} \approx 48$  мев.

2. Встановлено, що люмінесценція базових нелегованих матеріалів визначається ефективною міжзонною рекомбінацією. Висока структурна досконалість отриманого матеріалу у випадку кристалів також підтверджується випромінюванням екситонів.

3. Досліджено фотолюмінесценцію нелегованих шарів і визначено широкий спектр з максимумом  $\hbar\omega_m=3,26$  еВ при  $\hbar\omega < E_g$ . Він формується відповідними складовими, що визначаються процесами рекомбінації через локальні донорні і акцепторні центри, а також на донорно-акцепторних парах.

4. Показано, що донорно-акцепторні пари утворюються зарядженими додатньо вакансіями азоту  $V_N^\bullet$  і від'ємно однозарядними вакансіями галію  $V'_{Ga}$ . Відповідний спектр формується щонайменше чотирма смугами з максимумами при 3,33 еВ, 3,28 еВ, 3,24 еВ і 3,21 еВ. Вони утворюються партнерами ДАП  $V_N^\bullet$  і  $V'_{Ga}$ , які розташовані на відповідних відстанях 6,6, 8,1, 10,7 і 16,2 Å відповідно. Їх енергетичне положення відповідає проведеним обрахункам за моделлю Еппла-Віл'ямса-Пренера.

5. Встановлено, що випромінювання нелегованих плівок  $GaN$  характеризується високою квантовою ефективністю  $\eta=6-8\%$ . При легуванні Zn отримується  $\eta \approx 9-12\%$  внаслідок утворення глибоких акцепторів при заміщенні галію цинком  $Zn_{Ga}$ . Відповідно, випромінювання обумовлено рекомбінацією вільних електронів з локалізованими на акцепторах дірками. При цьому рекомбінація носіїв супроводжується електрон-фононою взаємодією утворених глибоких рівнів. Випромінювальні процеси характеризуються стійкістю і повторюваністю властивостей, параметрів і характеристик до дії теплового опромінення до 420 °С.

## Література

1. Shibata M., Furuya T., Sakaguchi H., Kuma S. Synthesis of gallium nitride by ammonia injection into gallium melt // *J. of Crystal Growth*. – 1999. 196 (1). – P.47–52.
2. V. F. Agyekyan\*, E. V. Borisov, A. Yu. Serov, and N. G. Filosofov Optical Properties of Bulk Gallium Nitride Single Crystals Grown by Chloride–Hydride Vapor-Phase Epitaxy // *Physics of the Solid State*, 2017. – Vol. 59, No. 12. – pp. 2418–2422.
3. Y. Yu Peter, Manuel Cardona. *Fundamentals of Semiconductors. Physics and Materials Properties. Fourth Edition.* - New York: Springer, 2014. - 793 p.
4. Sadao Adachi. *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors.* – New Jersey: Wiley, 2009. – 422 P.
5. Прокопів В.В. *Матеріали електронної техніки: Навч. посібник.* – Івано-Франківськ: Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2009. – 288 с.
6. Швець Є.Я., Червоний І.Ф., Головка Ю.В. *Матеріали і компоненти електроніки: навчальний посібник.* – Запоріжжя: ЗДІА, 2011. – 278 с.
7. Safa Kasap, Peter Capper *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials 2nd Edition.* - Springer International Publishing, 2017. - 1421 p.
8. Брайловський В.В., Махній В.П., Сльотов М.М., Собіщанський Б.М., Стец О.В., Ткаченко І.В. Використання модуляційної спектроскопії для визначення параметрів рекомбінаційних центрів. // *Вимір. і обчисл. техніка в технолог. процесах.* – Дрогобич, 2002. – 1, №9. – С. 71-73.
9. *Принципи та методи модуляційної спектроскопії : Навч. посіб. / уклад.: В. П. Махній; Чернів. нац. ун-т ім. Ю.Федьковича.* – Чернівці : Рута, 2001. - 101 с.
10. Klingshirn C. *Semiconductor Optics.* - Springer-Verlag: Berlin, 2005. - 797p.
11. Сльотов М.М., Сльотов О.М. *Люмінесценція у приладах і системах оптоелектроніки.* – Чернівці: Чернівець. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2019. – 136 с.

## Додаток

### Охорона праці

#### Загальні правила заходів дотримання безпеки робіт у лабораторії

До роботи у лабораторії допускаються особи, які пройшли:

- вступний інструктаж з охорони праці;
- інструктаж з пожежної безпеки;
- навчання безпечним методам і прийомам праці за відповідною програмою;
- стажування на робочому місці;
- перевірку знань вимог охорони праці.

До роботи в лабораторії не допускаються особи молодше 18 років та які мають медичні протипоказання.

Працівник лабораторії повинен:

- дотримуватися інструкції про заходи пожежної безпеки, інструкції з електробезпеки, інструкції по наданню першої допомоги;
- дотримуватися вимог експлуатації лабораторного обладнання;
- використовувати за призначенням і дбайливо ставитися до виданих засобів індивідуального захисту;
- вміти надавати першу допомогу потерпілому при нещасному випадку;
- знати місця розташування засобів надання долікарської допомоги, первинних засобів пожежогасіння, головних і запасних виходів, шляхів евакуації в разі аварії і пожежі;
- виконувати тільки поставлену йому роботу;
- не допускати на робоче місце осіб, які не мають відношення до роботи;
- тримати робоче місце в чистоті і порядку.

Працівнику лабораторії забороняється:



- вживати їжу та напої;
- курити і вживати алкогольні напої на робочому місці;
- перебувати на робочому місці в стані алкогольного або іншого сп'яніння;
- відволікатися від виконання посадових обов'язків.

При нещасному випадку необхідно надати потерпілому першу допомогу і негайно повідомити про те, що трапилося керівнику.

### **Правила безпеки при роботі з електровимірювальними приладами і на вимірювальних установках**

При роботі з електровимірювальними приладами кожен працівник повинен пройти інструктаж з техніки безпеки з вимірювальними приладами і при монтажі обладнання.

При роботі з електровимірювальними приладами необхідно дотримуватися таких правил:

- Перед використанням електровимірювальних приладів слід переконатися у відсутності оголених струмоведучих частин.
- При поломках, невірних показниках приладу після включення необхідно зупинити роботу і перевірити його за допомогою спеціального обладнання. Заборонено працювати з несправними приладами.
- Під час роботи необхідно стежити за відсутністю контакту з небезпечними частинами обладнання. Навіть саме мінімальна напруга 12-36 В при силі струмі в 100 А може привести до травми.

У разі травматизму під час використання електровимірювальних приладів необхідно надати долікарську допомогу. При грамотному використанні електровимірювального обладнання та дотриманні правил техніки безпеки виключається ризик травматизму в процесі роботи.

### **Робота з кислотами та їдкими речовинами і відповідні заходи безпеки**

При виконанні робіт з кислотами, лугами та іншими їдкими речовинами можливий несприятливий вплив на працівників наступних небезпечних і шкідливих виробничих факторів:

- підвищений рівень токсичних, сильнодіючих і отруйних речовин в повітрі робочої зони, що утворюються в процесі роботи;
- вміст шкідливих хімічних речовин в повітрі робочої зони;
- небезпека травмування осколками посуду, використовуваного в роботі;
- підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якої може статися через тіло людини;
- підвищена напруга органів зору.

При роботі з кислотами, лугами та іншими їдкими речовинами повинен бути забезпечений доступ працівників до первинних засобів пожежогашіння, аптечок першої медичної допомоги. Працівник повинен знати перелік медикаментів, що входять в аптечку першої медичної допомоги, знати її місцезнаходження, вміти користуватися засобами пожежогашіння.

При виконанні роботи з кислотами, лугами та іншими їдкими речовинами працівник зобов'язаний працювати тільки в спеціальному одязі, суворо дотримуватися правил особистої гігієни, після виконання кожного виду робіт мити руки теплою водою з милом. Для миття рук забороняється застосовувати легкозаймісті речовини та інші рідини.

### ***Вимоги щодо охорони праці перед початком роботи***

Перевірити справність засобів індивідуального захисту, необхідних для виконання роботи, одягти спеціальний одяг, спеціальне взуття та інші засоби індивідуального захисту.

Перевірити відсутність видимих пошкоджень обладнання, пристосувань та інструментів, їх справність і комплектність.

Перевірити роботу вентиляційних систем, огорожувальних і запобіжних пристроїв, пристроїв автоматичного контролю і сигналізації.

### ***Вимоги з охорони праці під час роботи***

На протязі усього часу виконання відповідного роду робіт слід утримувати в порядку і чистоті робоче місце, відходи збирати в спеціальні ємності; тримати відкритими вентиляційні отвори, стежити за чистотою повітря робочої зони, при провітрюванні не допускати протягів.

При роботі з кислотами, лугами та іншими їдкими речовинами працюючий повинен перевіряти маркування на бутлях, цілісність бутлів та інших скляних предметів, використовуваних у роботі. Посуд для зберігання лугів і кислот повинна мати чіткі написи.

Концентровані розчини кислот повинні зберігатися в спеціальних посудинах з притертими пробками, поверх яких повинен бути надітий скляний притертий ковпачок.

Зберігання лугів повинно проводитися в банках з широкими горлами оранжевого скла, закритих корковими пробками і залитих шаром парафіну. Закупорювати луги притертими пробками забороняється.

Наповнювати посудини концентрованими кислотами і лугами та їх переливання необхідно проводити за допомогою сифона або спеціальної піпетки з гумовою грушею.

Забороняється використовувати в роботі хімічні речовини, властивості яких невідомі і не вказані в умовах їх застосування.

Не допускається зберігання на робочому місці харчових продуктів, домашньої одягу та інших предметів, що не відносяться до виконання робіт.

### ***Вимоги з охорони праці після закінчення роботи***

По закінченню роботи працюючий повинен оглянути і привести в порядок робоче місце, прибрати інструменти, пристосування і матеріали в місця їх зберігання.

Зняти і прибрати в місця зберігання засоби індивідуального захисту; разові засоби захисту здати в утилізацію.

Вимкнути освітлення і вентиляцію.

Повідомити керівника робіт про недоліки, виявлені при роботі обладнання та інші фактори, що впливають на безпеку праці.

Вимити руки теплою водою з милом, при необхідності застосовувати знешкоджуючі та інші змиваючі засоби і креми.

### ***Вимоги щодо охорони праці в аварійних ситуаціях***

Працівник повинен припинити виконання робіт і знеструмити електрообладнання, апарати, прилади при виявленні обриву проводів живлення, несправності заземлення та інших пошкоджень обладнання; у разі розливу кислот, лугів та інших агресивних реагентів; у разі короткого замикання електрообладнання і його займання; при виникненні пожежі або нещасного випадку.

У випадках, коли пролитою луг, місце необхідно засипати піском або тирсою, потім видалити просочені пісок або тирсу, залити це місце соляною або оцтовою кислотою, сильно розведеною водою. Після цього видалити кислоту ганчіркою і вимити водою.

При несправності систем вентиляції, водопостачання, каналізації, що перешкоджають виконанню технологічних операцій, припинити роботу і повідомити про це керівнику робіт.

## **Правила безпеки при роботі з лазерами**

До роботи на лазерних установках допускаються особи, які опанували методику експлуатації лазерних установок. Усі перемикання (крім аварійних ситуацій) і зміни в оптичних системах лазерних установок дозволяється здійснювати тільки з дозволу викладача.

### ***Вимоги безпеки перед початком роботи***

Перед початком роботи потрібно провести огляд робочого місця, прибрати все зайве, що заважає нормальній роботі.

Перевірити цілісність заземлення, справність кнопок вмикання та вимикання, наявність протоку води в системі охолодження випромінювача, наявність і справність запобіжників.

Перевірити наявність способів індивідуального захисту від лазерного випромінювання: окулярів, фільтрів, екранів, а також засобів колективного захисту.

### ***Вимоги техніки безпеки під час роботи***

Сторонні особи під час роботи в приміщення лазерної лабораторії не допускаються.

Забороняється залишати без нагляду працюючі лазери.

Забороняється направляти лазерне випромінювання на легко займисті предмети.

При включеній генерації вносити в оптичний тракт і прибирати з нього будь-які предмети, особливо з гладкою блискучою поверхнею, забороняється.

Забороняється: виконувати такі операції, які можуть призвести до потрапляння прямого або дзеркально відбитого променя в очі або на шкіру працюючих осіб, а саме:

- відкривати випромінювачі і блоки живлення, виконувати наладку, ремонт і огляд при включеній напрузі живлення;
- знімати технологічні способи захисту, які передбачені інструкцією, і порушувати лінії автоблокування.

Під час роботи потрібно постійно контролювати систему охолодження випромінювачів лазерів, наявність і надійність роботи блокувань.

Забороняється класти на установки портфелі, сумки та інші сторонні предмети.