

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є. О. Патона
Кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії**

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Юрій БОГОМОЛ
«__» _____ 2021 р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою
«Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів»
спеціальності 132 «Матеріалознавство»
на тему: «Технологія вирощування монокристалів в умовах високих
температур та тисків »**

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи ФК-71

Гладкий Ілля Олексійович _____

Керівник:

Професор, д. х. н., Директор ІНМ ім. В. М. Бакуля

Туркевич Володимир Зіновійович _____

Консультант з розділу охорони праці:

Професор, д. т. н., професор

Левченко Олег Григорович _____

Консультант з економічно-організаційного розділу:

Доцент, к. е. н., доцент,

Нараєвський Сергій Вікторович _____

Нормоконтроль:

Доцент, к. т. н., доцент,

Бірюкович Ліна Олегівна _____

Рецензент:

науковий співробітник відділу номер 1, доктор філософії,

Румянцева Юлія Юріївна _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є. О. Патона
Кафедра Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма «Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій БОГОМОЛ

«___» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Гладкому Ілле Олексійовичу

1. Тема роботи «Технологія вирощування монокристалів в умовах високих температур та тисків», керівник роботи Туркевич В.З., доктор хімічних наук, Професор, затверджені наказом по університету від «27» травня 2021 р. №1355-с
2. Термін подання студентом роботи 15 червня 2021р.
3. Вихідні дані до роботи: аналіз літературних джерел, результати досліджень
4. Зміст роботи: літературний огляд, матеріали та методи отримання монокристалів, результати дослідження та їх обговорення, організаційно-економічний розділ, охорона праці.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): Презентація.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Організаційно-економічна частина	Нараєвський С. В. доцент		
Охорона праці	Левченко О.Г. зав. каф., професор		

7. Дата видачі завдання 12 квітня 2021р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Літературний огляд	12.04.-20.04.2021р.	
2.	Аналіз та обробка даних експерименту з вирощування монокристалів GaN за умов високих температур та тисків. Досліджено вплив температур, тиску, часу кристалізації та складу сплаву розчинника на структурну досконалість отриманих кристалів.	26.04.2021р.	
3.	Написання тексту роботи	05.05.2021р.	
4.	Розрахунок економічної частини	25.05.2021р.	
5.	Написання розділу з охорони праці	28.05.2021р.	
6.	Оформлення роботи	01.06.2021р.	
7.	Підготовка презентації	04.06.2021р.	
8.	Захист дипломної роботи	15.06.2021р.	

Студент

Ілля ГЛАДКИЙ

Керівник

Володимир ТУРКЕВИЧ

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 63 сторінки, 21 рисунок, 6 таблиць, 57 джерел інформації.

ВИРОЩУВАННЯ, МОНОКРИСТАЛИ, НІТРІД ГАЛІЮ, СПЛАВ-РОЗЧИННИК, ТЕМПЕРАТУРА, ТИСК

Об'єкт дослідження: кристали GaN, сплави-розчинники на основі заліза для вирощування монокристалів.

Мета роботи: Отримання високоякісних монокристалів GaN у АВТ типу «тороїд» методом температурного градієнту.

Методи дослідження: SEM, XRD, ІЧ-спектроскопія, та раманівська спектроскопія.

В результаті роботи розглянуто сучасні методи отримання кристалів GaN, досліджено вплив параметрів вирощування монокристалів на структурну досконалість кристалів GaN. Виконано експерименти з вирощування кристалів GaN за температур 1200 °C, 1400 °C та 1600 °C на протязі 55 хв, 14 год. та 17 год. відповідно. Досліджено вплив температури, тиску, часу кристалізації та складу сплаву-розчинника на структурну досконалість отриманих кристалів за допомогою методів SEM, XRD, ІЧ-спектроскопії, оптичної та раманівської спектроскопії.

ABSTRACT

Thesis: 63 pages, 21 figures, 6 tables, 48 references.

GALIUM NITRIDE, GROWING, PRESSURE, SINGLE CRYSTALS,
SOLVENT ALLOY, TEMPERATURE.

Object of research: GaN crystals, solvent alloys based on iron for growing single crystals.

Purpose: Obtaining high-quality GaN single crystals in AVT type "toroid" by the temperature gradient method.

Research methods: SEM, XRD, IR spectroscopy, and Raman spectroscopy.

As a result, modern methods of obtaining GaN crystals are considered, the influence of single crystal growth parameters on the structural perfection of GaN crystals is investigated. Experiments on the cultivation of GaN crystals at temperatures of 1200 °C, 1400 °C and 1600 °C for 55 min, 14 h and 17 h were performed. in accordance. The influence of temperature, pressure, crystallization time and composition of the solvent alloy on the structural perfection of the obtained crystals was studied using the methods of SEM, XRD, IR spectroscopy, optical and Raman spectroscopy.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	9
1.1 Напівпровідникові матеріали (SiC, Si, AlN, InN, GaN). Класифікація, властивості та застосування.....	9
1.2 Проблеми та перспективність отримання монокристалів GaN.....	12
1.3 Вибір методу вирощування кристалів GaN.....	14
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	16
2.1 Обладнання для створення високих тисків.....	16
2.2 Закономірності росту кристалів в умовах високих тисків та температур. Вплив тиску та температури.....	17
2.3 Методи контролю хімічного складу та структурної досконалості монокристалів.....	18
2.3.1 ІЧ-спектроскопія	19
2.3.2 Раманівська спектроскопія	20
2.3.3 Сканувальна електронна мікроскопія.....	22
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....	25
3.1 Вирощування монокристалів GaN в АВТ типу «тороїд» за допомогою методу температурного градієнту.....	25
3.2 Контроль та дослідження властивостей отриманих кристалів.....	30
4 РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	34
4.1 Правові та організаційні основи охорони праці на підприємстві....	35
4.2 Аналіз параметрів приміщення.....	36
4.3 Аналіз освітленості приміщення.....	37
4.4 Аналіз впливу шуму та вібрації.....	38
4.5 Аналіз забрудненості повітря.....	38

4.6 Електробезпека.....	39
4.7 Пожежна безпека.....	40
5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	43
5.1 Науково-технічна актуальність НДР.....	43
5.2 Розрахунок витрат на проведення НДР.....	44
5.2.1 Витрати на оплату праці.....	44
5.2.2 Єдиний соціальний внесок.....	46
5.2.3 Матеріали, необхідні для проведення досліджень.....	46
5.2.4 Енергоносії для проведення досліджень.....	47
5.2.5 Витрати на спеціальне обладнання.....	48
5.2.6 Вартість послуг сторонніх організацій.....	48
5.2.7 Витрати на службові відрядження.....	48
5.2.8 Інші прямі невраховані витрати.....	48
5.2.9 Накладні витрати.....	49
5.2.10 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми	49
5.3 Науково-технічна ефективність НДР.....	50
ВИСНОВКИ.....	54
CONCLUSIONS.....	56
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	58

ВСТУП

Сучасний ринок напівпровідникових матеріалів в значній мірі належить кремнієвим та карбідокремнієвим елементам. Кремній найчастіше використовується в діодах, світлодіодах, транзисторах, випрямлячах і інтегральних схемах (чипах), сонячних елементах. Окрім кремнію широко використовуються арсенід галію, арсенід алюмінію, германій та багато інших елементів. В останні роки дедалі популярніші органічні напівпровідники, які застосовуються, наприклад, у копіювальній техніці.

Але у даній роботі ми розглянемо GaN, як найбільш перспективний варіант в області напівпровідників. Основними перевагами приладів на основі нітриду галію у порівнянні з традиційними приладами на основі кремнієвих елементів є:

- зменшення розмірів пристроїв та зменшення вартості обслуговування таких пристроїв за рахунок більшої ШЗ та менших тепловтрат провідників на основі GaN;
- більш високі частоти перемикання таких пристроїв та вищі робочі температури зумовлюють зниження необхідності охолодження таких пристроїв;
- прямопропорційне зменшення індуктивності та ємності конденсаторів у силових ланцюгах за рахунок підвищення частоти перемикання;
- зниження ваги, об'єму та вартості електронних пристроїв на основі GaN.

Отже, не дивлячись на більш високу вартість GaN у порівнянні з кремнієм, застосування кристалів GaN в перспективі повинно призвести до зменшення пристроїв на їх основі, зменшення рівня шуму, що дозволить зекономити приблизно (10-20) % на виробництво та обслуговування таких пристроїв. Внаслідок цього вирощування монокристалів GaN та дослідження їх властивостей постає актуальним питанням з точки зору фундаментальної науки.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Напівпровідникові матеріали (SiC, Si, AlN, InN, GaN). Класифікація, властивості та застосування

Напівпровідники – широкий клас речовин, що за величиною питомої провідності займають проміжне місце між провідниками і діелектриками: у металах провідність $\sigma > 10^5$ См/м, а для діелектриків $\sigma < 10^{-10}$ См/м (провідність зазначена при кімнатній температурі) [1]. На приведеному нижче фрагменті таблиці Менделєєва (рис. 1.1) [2] жирною лінією обведена область, в якій розташовані елементи, які володіють напівпровідниковими властивостями. Зліва та знизу від цієї області знаходяться метали, справа та зверху – діелектрики.

Група \ Період	...	III	IV	V	VI	VII
...						
II		5 B	6 C			
III		13 Al	14 Si	15 P	16 S	
IV		31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	
V		49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I
VI						

Рисунок 1.1 – Фрагмент таблиці Менделєєва

Характерною рисою напівпровідників, що відрізняє їх від металів, є зростання провідності (σ) з ростом температури (T). Як правило, зростання $\sigma(T)$ експонентне і спостерігається у широкому інтервалі температур [1]:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_g/2k_B T),$$

де E_g – енергія активації електронів,

k_B – постійна Больцмана

З формули видно, що поблизу абсолютного нуля температури ($T \approx 0$) напівпровідники мають властивості ізоляторів: $\sigma \approx 0$ внаслідок того, що з підвищенням температури тепловий рух розриває зв'язок електронів у кристалічній ґратці, так що частина електронів, пропорційна $\exp(-E_g/2k_B T)$, стає вільними носіями заряду.

Зв'язок електронів у кристалі напівпровідника може бути розірваним не тільки тепловим рухом, але і різними зовнішніми впливами: світлом, потоком швидких частинок, сильним електричним полем і т.д. Основна характеристика матеріалу, що відповідає за кількість енергії, яку необхідно прикласти, щоб перевести електрон з валентної зони до зони провідності, і, внаслідок цього, надати матеріалу електричні властивості – ширина забороненої зони (ШЗ) (рис.1.2).

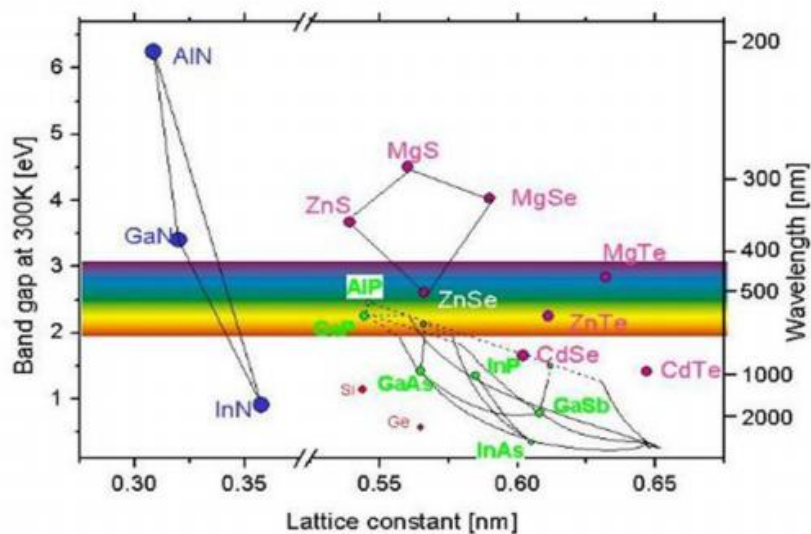


Рисунок 1.2 – Залежність ширини забороненої зони від параметрів ґратки напівпровідників

Отже, напівпровідники класифікують за наступними ознаками:

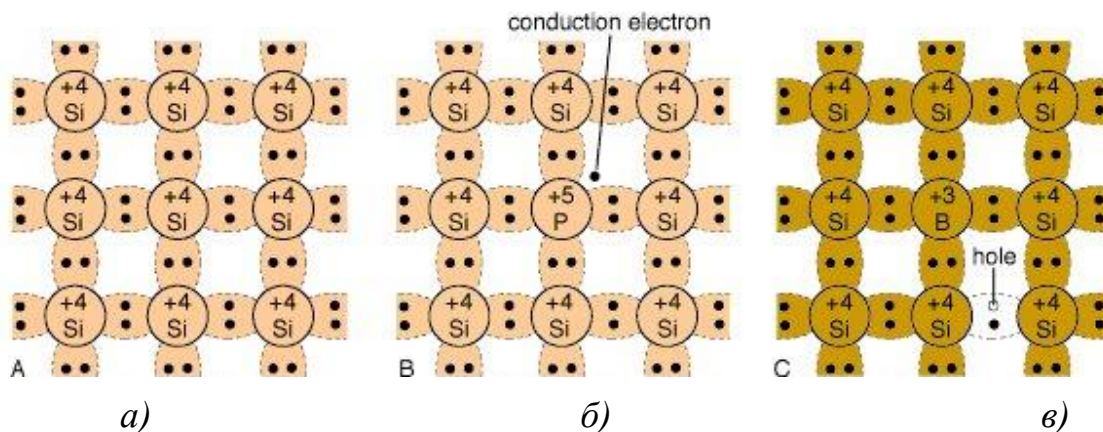
- за температурою, в якій матеріали виявляють напівпровідникові властивості – низькотемпературні, звичайні та високотемпературні;
- за шириною забороненої зони – безщолові (в яких ширина забороненої зони ШЗ = 0 – α -Sn, HgTe, HgSi), вузькозонні (з ШЗ ≤ 2 еВ – InN, GaAs, CdTe та

ін), широкозонні (з $\text{ШЗ} \geq 3 \text{ eV}$ – GaN, AlN, ZnS та ін.) та звичайні (з $\text{ШЗ} = 2\text{-}3 \text{ eV}$ – AlP, ZnSe, MgTe та ін.);

- за хімічним складом – органічні та неорганічні;
- за структурою – кристалічні, аморфні та рідинні;
- за хімічним складом – моноелементні та багатоелементні.

До моноелементних напівпровідників відносять бор (B) (III група періодичної системи Менделєєва); германій (Ge) та кремній (Si) (IV група періодичної системи Менделєєва); фосфор (P), арсен (As), сурму (Sb) (V група періодичної системи Менделєєва); сірку (S), селен (Se), телур (Te) (VI група періодичної системи Менделєєва); J (VII група).

Багатоелементні надпровідники в свою чергу поділяють на хімічні бінарні сполуки різних типів ($A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ (GaAs, GaN), $A^{\text{II}}B^{\text{VI}}$, $A^{\text{IV}}B^{\text{VI}}$, $A^{\text{IV}}B^{\text{IV}}$), потрійні сполуки та тверді розчини. За механізмом провідності напівпровідники поділяють на власні та домішкові. До власних (або нелегованих) напівпровідників відносять чисті напівпровідник, вміст домішок в яких не перевищує ($10^{-8}\text{-}10^{-9}$) %. Для таких напівпровідників концентрація дірок завжди дорівнює концентрації вільних електронів та визначається власними властивостями матеріалу (термічно збудженими носіями, випромінюванням та власними дефектами) [4]. Введення домішкових атомів зазвичай призводить до того, що в напівпровідниковому матеріалі виникає надлишок (тоді такий провідник називають напівпровідником донорного (або n)-типу) або нестача (тоді такий провідник називають напівпровідником акцепторного (p) типу) електронів (рис. 1.3).



a – власні напівпровідники з незначними домішками;

б – напівпровідники донорного типу (*n*-типу);

в – напівпровідники акцепторного типу (*p*-типу)

Рисунок 1.3 – Класифікація напівпровідників за механізмом провідності [5]

Вищезгадана вже здатність напівпровідників при прикладенні різних зовнішніх полів (електричних, магнітних, теплових, тощо) зумовлює їх широке використання в якості електронних пристроїв (термісторів, тиристорів, резисторів, тощо), а поєднання напівпровідників *p* та *n* типів, наприклад за допомогою гетероепітаксії, дозволяє здійснити *p-n* перехід та застосувати такі матеріали в оптоелектроніці (для виготовлення напівпровідникових лазерів, фотодіодів, фотоелементів, фототранзисторів, випромінювачів, тощо).

1.2 Проблеми та перспективність отримання монокристалів GaN

Сучасний ринок напівпровідникових матеріалів в більшій мірі належить кремнієвим та карбідокремнієвим елементам. Властивості традиційних напівпровідникових матеріалів (SiC та Si) [6] та напівпровідникових матеріалів нітрідів 3-ої групи (GaN, AlN, InN) за температури 300 K [7] наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Властивості напівпровідникових матеріалів SiC та Si та напівпровідникових матеріалів GaN, AlN, InN за температури 300 K

Властивості		Si	SiC	GaN	AlN	InN
$E_G(\text{eV})$		1,12	3.2	3.4	6.2	0.7
Густина, г/см^3		2,33	3,95	6,15	3,26	6,81
Параметри гратки	$a (\text{\AA})$	5,43	4,35	3.189	3.112	3.548
	$b (\text{\AA})$			5.185	4.982	5.760
КТР	$\Delta a/a (\text{K}^{-1})$	$2,6 \times 10^6$	$3,8 \times 10^6 - 5,12 \times 10^6$	3.17×10^{-6}	4.2×10^{-6}	3.8×10^{-6}
	$\Delta b/b (\text{K}^{-1})$			5.59×10^{-6}	5.3×10^{-6}	2.9×10^{-6}
Теплопровідність ($\text{Вт/см} \cdot \text{K}$)		1,3	25,5-41,0	1.3	2.85	0.45

Основні переваги приладів на основі GaN у порівнянні з традиційними приладами на основі кремнієвих елементів наступні:

1. Оскільки напівпровідники на основі GaN більш ефективні у порівнянні з кремнієвими напівпровідниками за рахунок більшої ШЗ, менших тепловтрат, що, в свою чергу, повинно призвести до зменшення розмірів пристроїв та зменшення вартості обслуговування таких пристроїв.

2. Більш високі частоти перемикання таких пристроїв та вищі робочі температури (у порівнянні з кремнієвими пристроями) зумовлюють зниження необхідності охолодження таких пристроїв та застосування вентиляторів та тепловідводів.

3. Підвищення частоти перемикання також дозволяє прямопорційно зменшити індуктивність та ємність конденсаторів у силових ланцюгах, що може призвести до значного зниження ваги, об'єму та вартості електронних пристроїв на основі GaN.

Отже, не дивлячись на більш високу вартість GaN у порівнянні з Si, застосування кристалів GaN в перспективі повинно призвести до зменшення пристроїв на їх основі, вартості їх обслуговування, підвищенню продуктивності роботи та зменшення рівню шуму, що дозволить зекономити приблизно (10 – 20) % на виробництво та обслуговування таких пристроїв. Внаслідок цього вирощування монокристалів GaN постає актуальним питанням. Крім того, відомо,

що існує велика кількість робіт, присвячених теоретичним передбаченням та дослідженню властивостей [8]–[17] отриманих кристалів (найчастіше це полікристали, отримані за допомогою CVD та HVPE методів), проте основні властивості GaN ще не визначені безперечним чином, що робить задачу одержання та дослідження властивостей GaN цікавою і з точки зору фундаментальної науки.

1.3 Вибір методу вирощування кристалів GaN

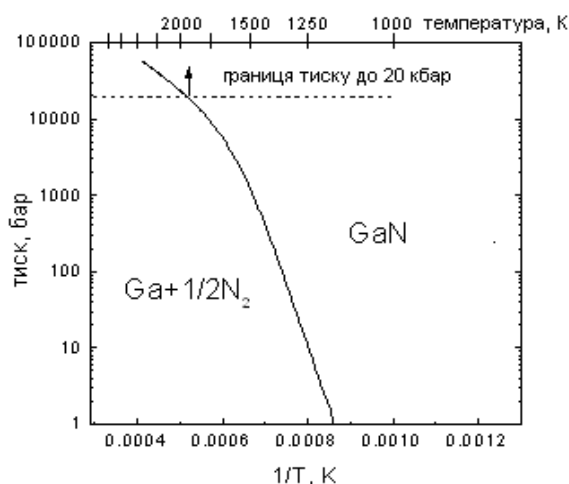
Внаслідок перспективності одержання монокристалів GaN сьогодні існує багато методів одержання цього матеріалу, основними з яких є [18]–[25]:

- кристалізація GaN з розчину атомарного азоту в галії (High Nitrogen Pressure Solution Growth - HNPS Growth) під високим тиском азоту, який має 2 модифікації: спонтанна кристалізація, кристалізація на підкладках в конфігурації «multi-feed-seed»;
- кристалізація з газової фази у відкритій хлоридній системі (HVPE);
- кристалізація методом Na-флюсу;
- кристалізація амонотермальним методом, тощо.

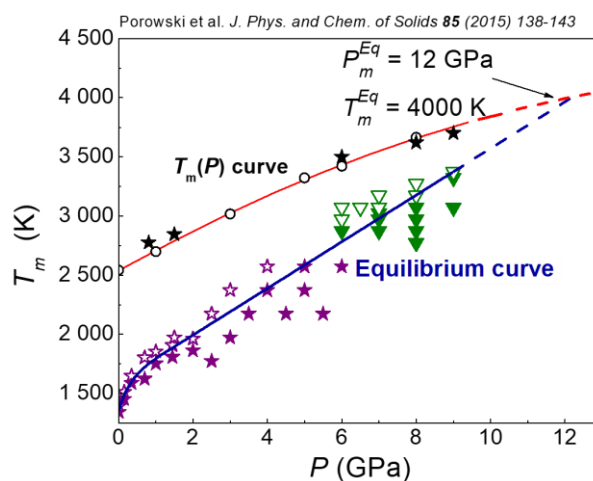
Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки. Так, методи спонтанної кристалізації досить швидкі, проте не дозволяють отримати монокристали GaN задовільного розміру. У випадку ж вирощування кристалів GaN на підкладках, стає можливим отримати досить великі зразки, проте виникає проблема дефектності кристалів GaN внаслідок різниці КТР, невідповідності параметрів ґратки підкладок та кристалів, відмінності у хімічному складі кристалу та підкладки, тощо.

Висока енергія зв'язку кристалу GaN (8,92 еВ/атом), яка обумовлює високу температуру плавлення (~2800 K) у поєднанні з високим рівноважним тиском азоту над поверхнею (6 ГПа) сильно ускладнюють кристалізацію об'ємних кристалів GaN методами Чохральського чи Бріджмена. Крім того, отримання кристалів GaN ускладнюється близькими значеннями вільної енергії Гіббса

монокристалу GaN та його складових ($\text{Ga} + \text{N}_2$) [26], що як відомо, призводить до дестабілізації GaN та його подальшого розкладання на складові: галій (Ga) та молекулярний азот (N_2) (рис. 1.4). Теоретично можливі параметри вирощування зі стехіометричних сплавів показані в роботі [27] та відповідають екстремально високим значенням – 12 ГПа за температури 4000 К.



a)



б)

Рисунок 1.4 – Експериментальна крива рівноваги системи GaN – ($\text{Ga} + 1/2\text{N}_2$) (а), а також область можливого плавлення чистого GaN (б) [27].

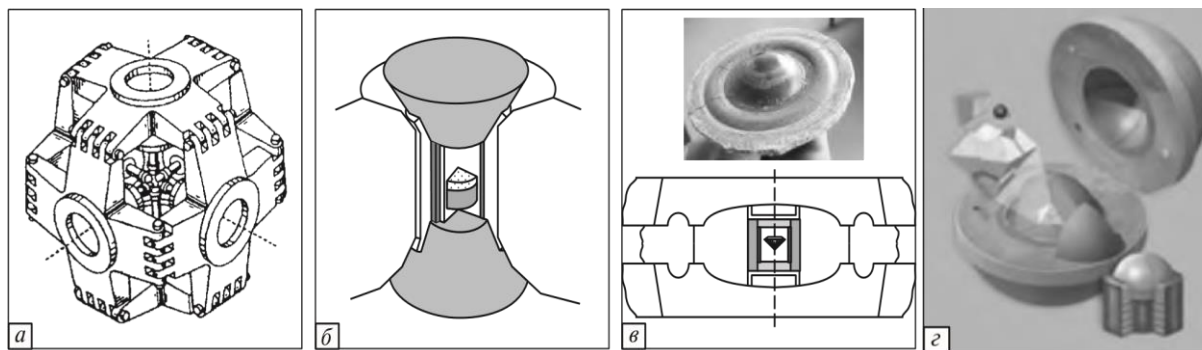
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Отримання матеріалів в умовах високих температур та тисків - технологічно складна, проте важлива фундаментальна наукова задача, яка досить широко висвітлена для таких алмазу та кубічного нітриду бору, проте недостатньо висвітлена для нітриду галію. Отже, цей розділ присвячений питанням вибору технології та параметрів вирощування нітриду галію в умовах високих температур та тисків.

2.1 Обладнання для створення високих тисків

Апарати даного типу прості і зручні в роботі, дозволяють легко досягати тиск у 8 ГПа і більше. Є багато різних модифікацій цього апарату.

Конструкції основних типи апаратів для створення високого тиску (АВТ) зображені рисунку 2.1.



a – багато-пуансонний апарат; *б* – апарат типу «белт»; *в* – апарат типу «тороїд»; *г* – апарат типу «барс»

Рисунок 2.1 – Основні типи АВТ для вирощування монокристалів в умовах високих температур та тисків

В рамках даної дипломної роботи було обрано АВТ типу «тороїд», оскільки такий апарат поєднує можливість отримання високих тисків (більш ніж у китайських багатопуансонних апаратах), підводу термопар та датчиків всередину

комірки (що дозволяє вимірювати температуру та тиск під час проведення експериментів) з відносною простотою збірки внутрішньої комірки високого тиску, що робить цей апарат ідеальним для проведення науково-дослідних робіт.

2.2 Закономірності росту кристалів в умовах високих тисків та температур. Вплив тиску та температури

Велике наукове і практичне значення мають монокристали. Метали в монокристалічному стані відрізняються високим ступенем чистоти і мінімальних структурних недосконалостей. Одержання монокристалів дозволяє вивчати справжні властивості металів, виключити вплив меж зерен. Вирощування монокристалів може відбуватися як з використанням затравок, так і спонтанно.

Процеси росту кристалів супроводжуються серією цікавих явищ внаслідок взаємодії кристалу з навколишньою середою: захват та виштовхування домішок, концентраційне переохолодження, тиск кристалізації, виділення прихованої теплоти кристалізації, конвекція, тощо. Саме ці чинники будуть впливати на габітус, розмір та чистоту утворюваних кристалів [33], [34].

Кристалізація розплавленого матеріалу складається з двох елементарних процесів, які відбуваються одночасно [35]:

- зародження центрів кристалізації;
- ріст кристалів з цих центрів.

На протікання першої стадії впливають наявність домішкових атомів, нерівність поверхні та ступінь переохолодження розплаву. Швидкість росту та ступінь досконалості вирощуваних кристалів же визначається такими чинниками, як величина температурного градієнту, кристалографічна орієнтація затравок та щільність упаковки, тощо. Рухаючою силою кристалізації будь-якого типу є різний характер зміни вільної енергії у рідкому та твердому стані [36]. При температурі, що вища за деяку критичну ($T_o = T_{nl}$), меншою вільною енергією володіє речовина у рідкому стані, а при температурі, що нижча ніж T_o , більш стабільний твердий стан матеріалу. Кристалізація речовини

можлива лише при $T < T_o$, тобто при деякому переохолодженні. Ріст кристалів же можливий лише тоді, коли біля поверхні кристалу підтримується градієнт температури, який, власне і забезпечує масопереніс (у випадку кристалізації з розплаву) до поверхні розділу «кристал-рідка фаза». При цьому в загальному випадку збільшення градієнту температури призводить, з одного боку – до збільшення швидкості росту кристалів, з іншого – до більш активного захвату домішкових атомів та зменшення структурної досконалості вирощуваних кристалів. Отже, у випадку вирощування монокристалів речовин, що є термодинамічно стабільними за нормальних умов, контролю саме цього термодинамічного параметру (температури) є необхідною та достатньою умовою вирощування монокристалів необхідної чистоти, розміру та форми. Проте, деякі речовини (такі як алмаз, нітрид галію, боразон та ін.) є термодинамічно нестабільними за нормальних умов (алмаз), або стають термодинамічно нестабільними при підвищенні температури (як було показано вище, до таких речовин відноситься і нітрид галію). Тому, з метою стабілізації таких речовин, необхідно застосувати не тільки високі температури (які дозволять створити рідку фазу та активізують процеси тепломасопереносу, необхідні для початку росту кристалів), але й тиски, з метою стабілізації речовини, що кристалізується. Проте, вплив тиску на поведінку систем не є однозначним, оскільки в умовах високого тиску можна спостерігати низьку фундаментальних, проте складних та погано досліджених явищ.

2.3 Методи контролю хімічного складу та структурної досконалості монокристалів

Після витравлювання монокристалів з матриці за допомогою розчинів кислот, поверхню та властивості кристалів GaN необхідно дослідити. Отже, розглянемо кожен з цих методів більш детально.

2.3.1 ІЧ-спектроскопія

Інфрачервоне випромінювання – електромагнітне випромінювання, що займає спектральну область між червоним кінцем видимого випромінювання (з довжиною хвилі $\lambda \approx 0,74$ мкм) і короткохвильовим радіовипромінюванням ($\lambda \sim 1-2$ мм). При проходженні ІЧ-випромінювання через речовину відбувається його поглинання на частотах, що збігаються з деякими коливальними і обертальними частотами молекул або з частотами коливань кристалічної решітки. В результаті інтенсивність ІЧ-випромінювання на цих частотах падає – утворюються смуги поглинання (рис.1.6) [46].

Це поглинання має селективний характер і відбувається, як уже говорилося раніше, на тих частотах, які збігаються з деякими власними частотами коливань атомів в молекулах речовини і з частотами обертання молекул як цілого, а в разі кристалічної речовини – з частотами коливань кристалічної ґратки. Інфрачервоні спектри поглинання виникають в результаті переходів між коливальними рівнями молекули, які є в основному електронному стані. Коливальні спектри проявляються в ІЧ-діапазоні електромагнітного випромінювання, яку поділяють на три ділянки: близька: (0,750-2,5 мкм, 13000-4000 см^{-1}), середня (основна): (2,5-50 мкм, 4000-200 см^{-1}) далека: (50-1000 мкм, 200-10 см^{-1}). В середньому ІЧ-діапазоні розташовані довжини хвиль більшості нормальних коливань (групові частоти та «відбитки пальців»). В ближньому ІЧ-діапазоні розташовані обертони нормальних коливань, які використовуються для рутинного аналізу харчових продуктів та технологічних сумішей. В дальньому ІЧ-діапазоні розташовані частоти, які відповідають коливанням кристалічної решітки та нормальним коливанням слабких зв'язків і зв'язків з важкими атомами. В цю область ІЧ-випромінювання потрапляють практично тільки коливання зв'язків метал-карбон. Реально чисто коливальні спектри проявляються в області від 10000-100 см^{-1} . Молекула може поглинати квант ІЧ-випромінювання лише в тому випадку, якщо це приводить до зміни її дипольного моменту. Не можуть поглинати ІЧ спектри молекули з ковалентним

зв'язком, це H_2 , N_2 , галогени, молекула CO_2 з симетрично валентними коливаннями атомів. ІЧ-спектри здебільшого представляють в координатах $T(\%) - \nu, \text{см}^{-1}$, хвильове число зменшується зліва направо, або в координатах $T(\%) - \lambda, \text{нм}$, довжина хвилі збільшується зліва направо (рис. 2.2).

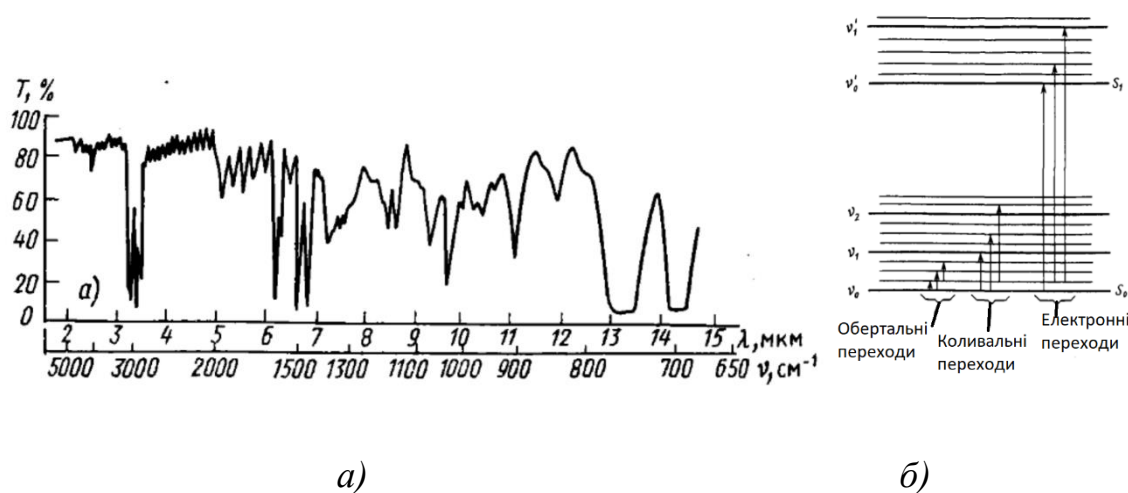


Рисунок 2.2 – Приклад-ІЧ спектру(а) та схема енергетичних рівнів в молекулі, яка демонструє поглинання випромінювання (б)

2.3.2 Раманівська спектроскопія

В рамках цієї роботи раманівська спектроскопія буде використовуватися з метою вивчення структурної досконалості вирощених кристалів в АВТ типу «тороїд». Основою раманівської спектроскопії є вимірювання змін у довжині хвиль (частот) джерела монохроматичного збудження – лазера. Методика відрізняється високою чутливістю та є стандартною для дослідження монокристалів. Метод не потребує спеціальної підготовки зразків, оскільки раманівський ефект спостерігається в розсіяному світлі від зразка, а не в спектрі поглинання зразком світла.

При розгляданні раманівського розсіювання можна скористатися 2-ма методами:

- 1) Хвильовою (класичною) теорією світла

У цій інтерпретації світло розглядають як електромагнітне випромінювання, що взаємодіє з молекулами завдяки ефекту поляризації. Здатність до поляризації визначається властивістю електронної хмари взаємодіяти з електронним полем: легкі молекули (наприклад, бензин) гарно розсіюють раманівське світло, а важкі (наприклад, вода) – гірше.

2) Квантовою теорією

У цій інтерпретації світло розглядають як набір фотонів, які розсіюються при зіткненні з молекулою. Отже, кількість розсіяних фотонів пропорційна силі зв'язку: молекули з сильними зв'язками (наприклад, бензин) розсіюють більше фотонів, а молекули зі слабкими зв'язками (наприклад, вода) погано розсіюють раманівське випромінювання. При взаємодії фотону з речовиною відбувається збудження молекули та її перехід у віртуальний стан. При цьому взаємодія може відбутися 3-ма основними шляхами, що зображені на діаграмі Яблонського (рис. 2.3):

1) молекула може повернутися до основного стану та випромінити фотон з енергією, яка дорівнює енергії фотона падаючого світла (Релеєвське розсіювання);

2) молекула може перейти до фононного стану та випустити фотон з енергією, яка менше за енергію фотона падаючого світла (стоксове розсіювання);

3) молекула знаходиться у фононному стані, збуджується та випромінює фотон з енергією, яка більше за енергію фотона падаючого світла (антистоксове розсіювання).

Крім того раманівські спектрометри оснащуються детекторами, фільтрами, оптоволоконними датчиками з метою підвищення чутливості, точності, зменшення похибок [47].

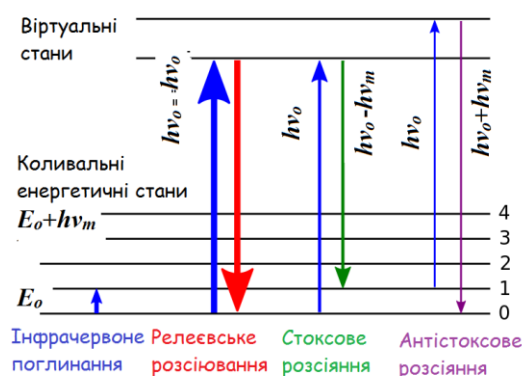


Рисунок 2.3 – Діаграма Яблонського, на якій представлені процеси зміни енергетичного стану при розсіюваннях Релея та Рамана (стоксове та антистоксове розсіювання).

2.3.3 Сканувальна електронна мікроскопія

Основними перевагами сканувальної електронної мікроскопії є: отримання детальної тривимірної картини, топографічна візуалізація та універсальність інформації, отриманої з різних детекторів, простота в роботі з використанням відповідного програмного забезпечення робить роботу зручною для користувачів, швидкість аналізу. Надзвичайно висока роздільна здатність (порівняно з роздільною здатністю оптичного мікроскопа) пояснюється тим, що принцип роботи мікроскопа ґрунтується на взаємодії електронного пучка, а не пучка світла з матеріалом (довжина хвилі електрона значно менший, ніж у фотона). Коротше кажучи, процес можна описати так: електрони генеруються у верхній частині колони, прискорюються вниз і пропускаються через комбінацію лінз і отворів для отримання сфокусованого пучка електронів, що потрапляє на поверхню зразків (рис. 2.4 а)

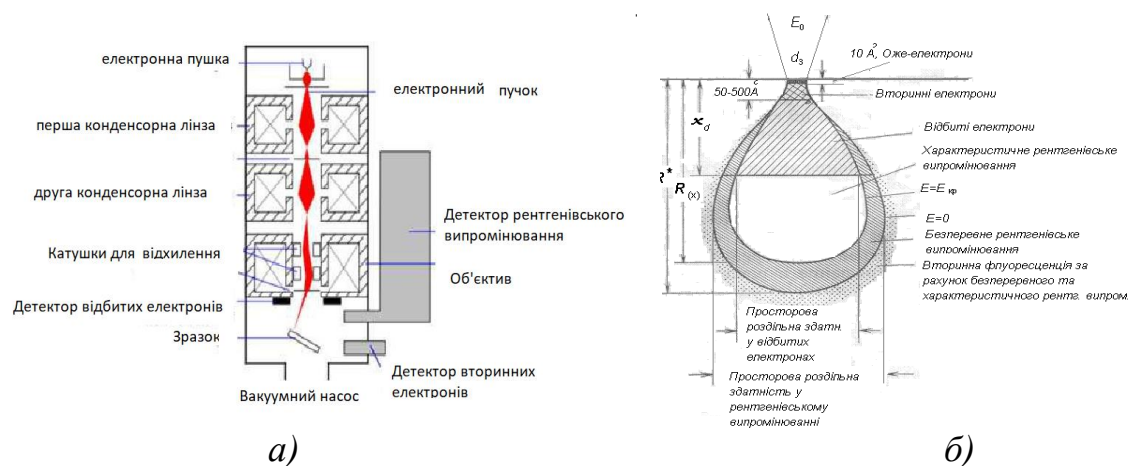


Рисунок 2.4 – Будова сканувального електронного мікроскопу (SEM) (а) та схематичне зображення області генерації та просторової роздільної здатності у відбитих, вторинних електронах, рентгенівському випромінюванні та оже-електронах (б).

Отже, розглянемо кожний крок більш детально.

I. У верхній частині камери є джерело електронів, яке генерує потік електронів завдяки нагріву (термоелектронна емісія). Потім ці згенеровані електрони прискорюються за напруги 1-40 кВ та фокусуються у вузький пучок. Існує 3 часто використовуваних типу джерела електронів:

- 1) вольфрамова нитка (найбільш розповсюджено);
- 2) твердотільний кристал (CeB_6 або LaB_6) (мають набагато довший термін експлуатації);
- 3) випромінююча електронна пушка.

Дуже важливим є створення вакууму всередині камери мікроскопа для безперешкодного проходження електронного пучка. З цієї причини скануючі електронні мікроскопи обладнані системами для створення вакууму (найчастіше вакуум всередині камери створюється за допомогою одного або декілька насосів).

II. Серія конденсаторних лінз фокусує електронний промінь, коли він рухається від джерела вниз по колонці.

III. У нижній частині мікроскопу існує набір котушок для відхилення електронного променя від початкового положення.

Після потрапляння на поверхню досліджуваного зразка починається взаємодія електронного пучка із матеріалом зразка [48].

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Результати вирощування монокристалів GaN в АВТ типу «тороїд» за допомогою методу температурного градієнту в інтервалі тисків 3-5 ГПа

Отже, відповідно до отриманих теоретичних передбачень, що викладені в першому розділі цієї роботи, в ІНМ ім. В.М. Бакуля було здійснено три експерименти в АВТ типу «тороїд» з вирощування монокристалів GaN.

При пропусканні електричного струму температура всередині комірки підвищується, що призводить до активації дифузійних процесів та сприяє транспорту атомів галію та азоту через розплав Fe-Ga-N при досягненні температури плавлення. Отже, оскільки дифузійні процеси найбільш активно відбуваються у рідкій фазі, а можливість отримання рідкої фази обмежена експлуатаційними характеристиками АВТ (верхня межа робочої температури всередині комірки – 2000 °C), то очевидною стає задача мінімізації температури плавлення сплаву Fe-Ga-N. З іншої сторони для ефективної кристалізації GaN необхідно збільшити концентрацію атомів Ga та N, які є «будівельним матеріалом» для росту кристалів GaN. Виходячи з цих міркувань на основі діаграми стану Fe-Ga (рис. 3.1) [48], було обрано литий сплав складу 80 ат. % Fe – 20 ат. % Ga, який додатково насичувався 2 ат. % N.

Структуру та хімічний склад сплаву було досліджено за допомогою сканувального електронного мікроскопу. Дослідження показали структуру, характерну для литих сплавів, гомогенність структури та відсутність домішкових атомів (аналіз атомного вмісту показав, що вміст заліза складав 79 %, галію – 19 %, азоту – 2 %) (рис. 3.2).

Тиск в камері при виконанні усіх експериментів становив 4,5 ГПа, та відповідно до теоретичних передбачень, викладених в попередніх розділів, є мінімально необхідним для стабільного росту кристалів GaN. З одного боку сплаву Fe-Ga-N були розміщені затравочні кристали GaN неправильної форми з розмірами 500 мкм, з іншого – порошок (джерело) GaN. Після чого сплав Fe-Ga-N

конвекційними процесами, що відбуваються у комірці високого тиску під час проведення експериментів.

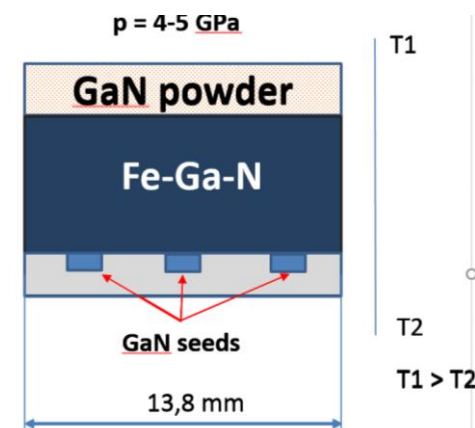


Рисунок 3.3– Схема внутрішньої частини збірки в АВТ типу «тороїд»

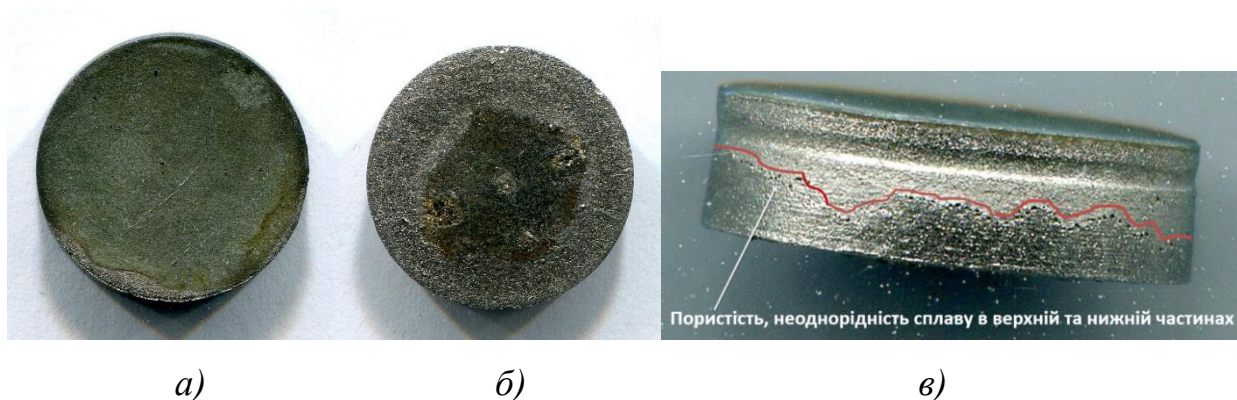


Рисунок 3.4 – Загальний вид зразків після проведення експериментів

Попередні дослідження поверхні частини зразку, де були встановлені монокристали (рис. 3.5) показали відсутність розчинення монокристалів GaN, що вказує на те, що експерименти відбувалися в області термодинамічної стабільності GaN та вказує на коректність теоретичних передбачень дослідників у роботах [26], [27].

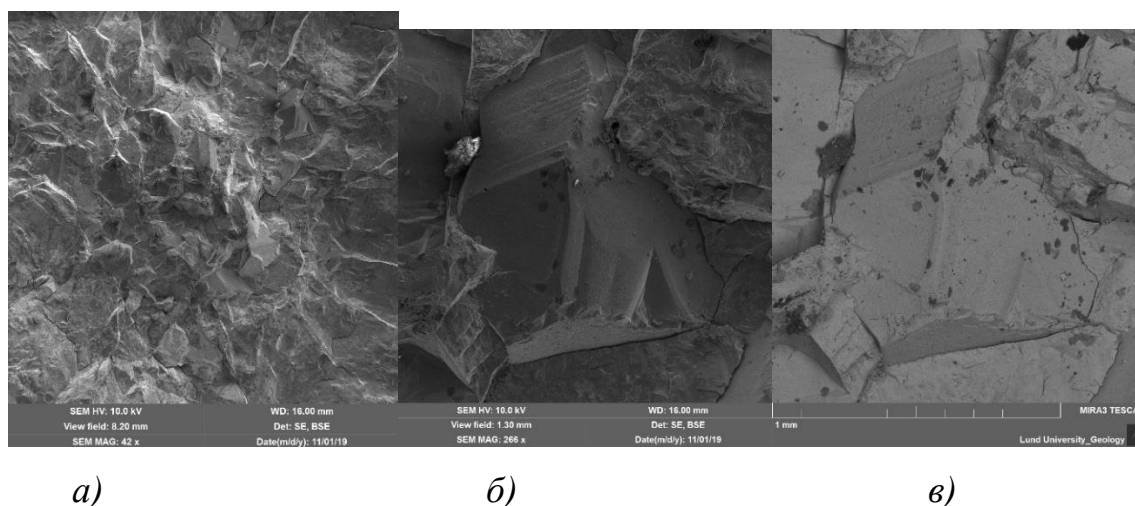
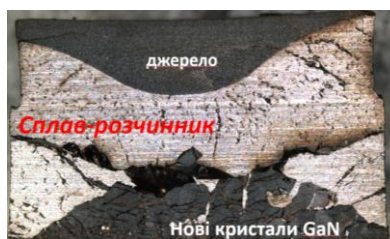
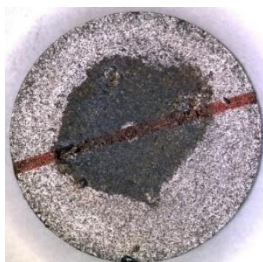


Рисунок 3.5 – SEM-зображення поверхні нижньої частини зразку (а), а також монокристалів GaN в матриці сплаву Fe-Ga-N (б, в)

При виконанні першого дослідження температура всередині комірки складала 1200 °С, час вирощування становив 1 годину. Попередні дослідження цього зразку показали відсутність росту кристалів GaN, проте дослідження ВАХ апарату «тороїд» показав незначний стрибок напруги на 55 хвилині вирощування експерименту, що може вказувати на початок процесів росту кристалів GaN. Виходячи з цих міркувань, а також з досвіду вирощування монокристалів алмазу, було прийнято рішення про підвищення температури та часу вирощування. Час вирощування монокристалів GaN у другому експерименті становив 14 годин, температура всередині комірки – 1400 °С. Після виконання експерименту, отриманий зразок був розрізаний вздовж червоної лінії (рис. 3.6 б), а отриманий профіль був досліджений методами оптичної мікроскопії. При цьому спостерігалось утворення кристалів GaN не тільки на затравочних кристалах, але й біля джерела, що може вказувати на недостатню величину градієнту температури та переважання процесів кристалізації над процесами дифузії у зоні джерела GaN. Отже, це вказувало на необхідність подальшого збільшення часу та температури вирощування кристалів. Останній експеримент з вирощування GaN проводили впродовж 17 годин за температури 1600 °С. Після чого зразок було досліджено аналогічним чином (рис. 3.6 в).



а)



б)



в)

Рисунок 3.6 – Загальний вигляд зразку експерименту з вирощування GaN ($P=4,5$ ГПа, $T=1400$ °C, $t=14$ год) (а) та його діаметрального перерізу (б) та загальний вигляд діаметрального перерізу зразку з експерименту з вирощування GaN ($P=4,5$ ГПа, $T=1600$ °C, $t=17$ год) (в)

Аналіз перерізу отриманого зразку дійсно показав відсутність спонтанного зародкоутворення біля джерела GaN (рис. 3.7), проте аналіз вигляду затравочної частини зразку показав, що збільшення температури та часу вирощування призвело до більш активної спонтанної полікристалізації GaN. Аналіз мікроструктури та хімічного сплаву-розчинника Fe-Ga-N після проведення експериментів показав зміну мікроструктури, а також збільшення вмісту галію та азоту, пов'язане з дифузійними процесами атомів Ga та N з джерела GaN крізь метал-розчинник, що призвело до зміну хімічного складу з Fe – 78 ат.%, Ga – 20 ат.% і N – 2 ат.% на Fe – 68 ат.%, Ga – 17,5 ат.% і N – 14,5 ат.%. Крім того, збільшення вмісту азоту призвело до підвищення пористості, яке і спостерігалось на фотографії (рис. 3.7, в).



Рисунок 3.7 – Загальний вигляд затравочної частини зразків, отриманих під час другого ($P=4,5$ ГПа, $T=1400$ °C, $t=14$ год.) (а) та третього ($P=4,5$ ГПа, $T=1600$ °C, $t=17$ год.) (б) експериментів з вирощування GaN (а). Структура литого сплаву, який використовувався в експериментах з вирощування монокристалів GaN, після виконання експериментів (в)

3.2 Контроль та дослідження властивостей отриманих кристалів

Оскільки GaN – хімічно інертний матеріал до дії кислот та лугів, то отримані на попередньому етапі кристали GaN, були витравлені з металевої матриці за допомогою «царської водки» з метою проведення подальших досліджень. Зразки нітриду галію, отримані під час виконання останнього експерименту ($P=4,5$ ГПа, $T=1600$ °C, $t=17$ год) були досліджені за допомогою раманівської спектроскопії. Отримані кристали характеризуються неправильною формою в (рис. 3.8), що пов'язано з неправильною формою затравочних кристалів, а також з нерівноважними умовами кристалізації.

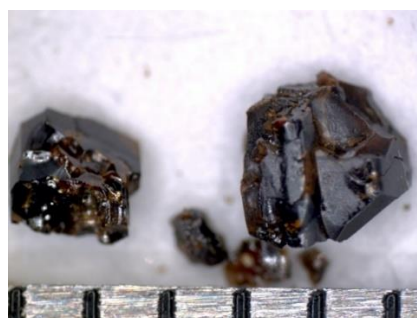


Рисунок 3.8 – Морфологія кристалів GaN після проведення експериментів

Дослідження зразків за допомогою раманівської спектроскопії показало, що усі отримані нові кристали GaN демонструють спектри Рамана, типові для вюрцитного типу GaN (рис. 3.9).

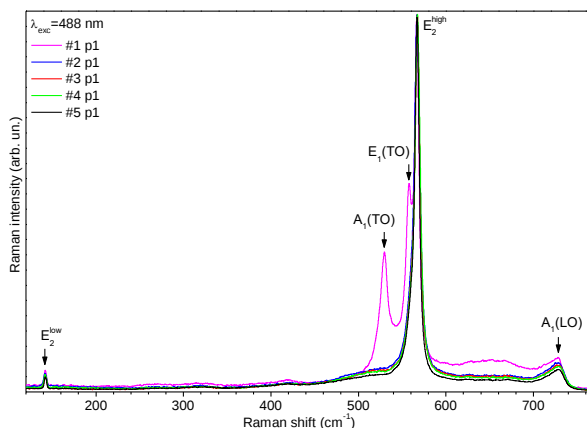


Рисунок 3.9 – Раманівські спектри отриманих монокристалів GaN ($P=4,5$ ГПа, $T=1600$ °C, $t=17$ год.)

Дослідження фононної густини (рис. 3.10) зразків показало, що для усіх отриманих кристалів GaN реєструються певні слабкі фонові смуги, що певно є результатом прояву фононної густини станів внаслідок розупорядкування кристалічної ґратки GaN. Проте ширина фононних смуг отриманих зразків була більшою порівняно з кристалами GaN отриманими за допомогою методів HNPS, HVPE (інформація про спектри таких монокристалів взята з баз даних раманівських спектрів). Уширення фононної смуги відбувалося внаслідок дефектності отриманих монокристалів, зокрема, можливо через формування комплексів заліза через його велику концентрацію. Крім того, спостерігалось уширення смуги фотолюмінісценції, що швидше за все, пов'язано з рекомбінаційними явищами, пов'язані з проникненням атомів заліза у ґратку GaN.

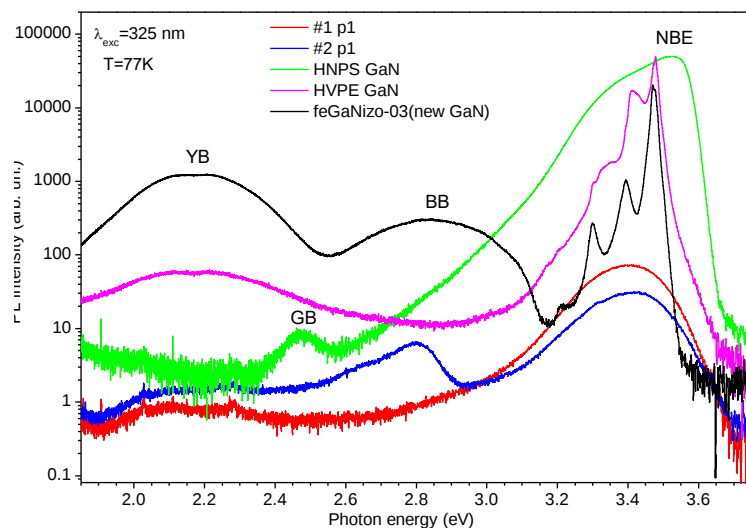


Рисунок 3.10 – Порівняння типового раманівського спектру нового монокристалу GaN з типовими раманівськими спектрами монокристалів GaN, отриманими за допомогою інших методів

Дослідження за допомогою ІЧ внутрішньоцентрової фотолюмінесценції (рис. 3.11), показало відсутність виражених піків (на відміну від структурно досконалих монокристалів, що ймовірно пов'язано з великою концентрацією заліза та дефектністю зразків.

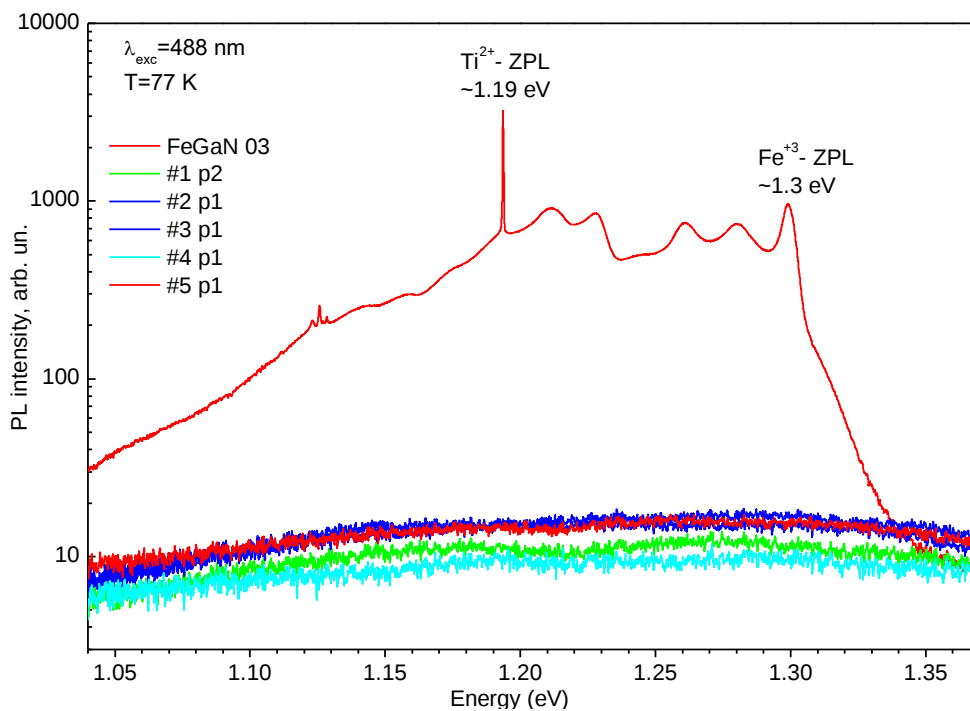


Рисунок 3.11 – Спектри зразків, отриманих за допомогою ІЧ фотолюмінесценції

Приблизна оцінка швидкості росту монокристалів нітриду галію за допомогою обрахування зміни маси затравочних кристалів показала, що кристали нітриду галію росли зі швидкістю 80 мкм/год, що робить метод вирощування GaN у АВТ конкурентноздатним.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

В більшості випадків проведення дослідів з надтвердими матеріалами можна частково прирівняти до малосерійного виробництва надтвердих матеріалів.

При проведенні експерименту важливо дотримуватись вимог та правил охорони праці, адже виробництво виробів з надтвердих матеріалів несе багатогранну небезпеку, на кожному етапі є окремі фактори ризику, а саме: подразнення слизових оболонок носу, горла та захворювання легеневих тканин; можливість бути ураженим електричним струмом у разі відсутності заземлення при роботі з пічним та пресовим обладнанням; можливість отримати пошкодження різної ступені важкості в разі неакуратної роботи з шліфувальним обладнанням та інше.

Наразі діє наказ від 28.12.2017р. № 2072 Про затвердження Вимог безпеки та захисту здоров'я під час використання виробничого обладнання працівниками.

Використання виробничого обладнання – діяльність, пов'язана з виробничим обладнанням, зокрема запуск або зупинка обладнання, його використання за призначенням, транспортування, ремонт, модифікація (реконструкція, модернізація), нагляд і технічне обслуговування, у тому числі очищення.

Виробниче обладнання – будь-яка машина, апарат, інструмент, пристрій або устаткування, що використовуються під час виконання робіт, виготовлення продукції, надання послуг, у тому числі машини, механізми, устаткування підвищеної небезпеки.

Небезпечна зона – будь-яка зона всередині або навколо виробничого обладнання, в якій працівник, відкритий для зовнішнього впливу, наражається на ризик для здоров'я, безпеки життя.

Оператор – працівник, який за завданням використовує виробниче обладнання.

Працівник, відкритий для зовнішнього впливу – будь-який працівник, який перебуває частково або повністю у небезпечній зоні.

Призначений строк служби (ресурс) – календарна тривалість експлуатації (сумарний наробіток), у разі досягнення якої(-го) машини, механізми, устаткування підвищеної небезпеки виводяться з експлуатації, здійснюється їх експертне обстеження, за результатами якого приймається рішення щодо встановлення нового строку експлуатації зазначеного виробничого обладнання з проведенням або без проведення ремонту, модифікації (реконструкції, модернізації), або здійснюється його списання.

4.1 Правові та організаційні основи охорони праці на підприємстві

За статтею 13, Закону України «Про охорону праці», роботодавець зобов'язаний створити на робочому місці в кожному структурному підрозділі умови праці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечити додержання вимог законодавства щодо прав працівників у галузі охорони праці.

Відповідно до статті 14, Закону України «Про охорону праці», працівник зобов'язаний дбати про особисту безпеку та здоров'я, а також про здоров'я та безпеку оточуючих людей в процесі виконання будь-яких робіт чи під час перебування на території підприємства.

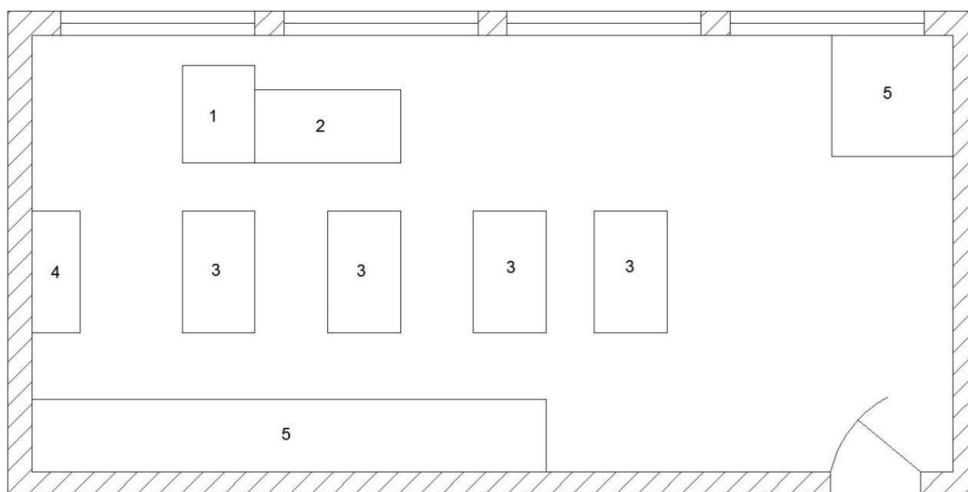
Згідно з статтею 15, Закону України «Про охорону праці», на підприємстві з кількістю працюючих 50 і більше осіб роботодавець створює службу охорони праці відповідно до типового положення, що затверджується центральним органом виконавчої влади з питань нагляду за охороною праці [50].

Служба охорони праці підпорядковується безпосередньо роботодавцю. Роботодавцем в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля вважається директор інституту, а отже керує відділом охорони праці безпосередньо директор ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, професор В.З. Туркевич, академік НАН України.

Відповідальних за охорону праці в лабораторіях призначає роботодавець. У Відділі № 1 ІНМ відповідальним за ОП є Гажа Г.П., який в свою чергу назначає керівників ОП по робочих секціях.

4.2 Аналіз параметрів приміщення

Дослідження отриманих зразків проводилося в дослідницькій лабораторії інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля (рис. 4.1).



1 – робоче місце з ПК; 2 – робоче місце зі сканувальним електронним мікроскопом; 3 – робочий стіл; 4 – сушильна шафа; 5 – робоче місце з ПК
Рисунок 4.1 – Схематичне зображення дослідницької лабораторії в інституті надтвердих матеріалів.

Дослідницька лабораторія займає площу 48м² на якій працюють 2 людини. На кожного робітника припадає 24 м².

Категорія важкості робіт які виконуються в цехах є Іб – легка, тому, що робота виконується сидячи і не потребує фізичного напруження згідно з [51]. Параметри мікроклімату у лабораторіях і цехах підтримується за таких значень: температура – (10-20) °С в холодний період та (19-25) °С – в теплий період року; вологість – (40-60) %; швидкість руху повітря не більше 0,2 м/с.

Значення показників температури, відносної вологості та швидкості руху повітря для легкої Іб категорії робіт у лабораторіях і цехах не відповідають оптимальним вимогам, але знаходяться в області допустимих для непостійного робочого місця в холодний та теплий період року, окрім, звісно, значень

температури у холодний період року, що є недопустимо низькими. Пропонується використання індивідуальних нагрівачів повітря у безпосередній зоні найчастішого робочого місця працівника аж до досягнення допустимих значень [51].

4.3 Аналіз освітленості приміщення

Освітлення поділяється на 3 види: природне, штучне, суміщене.

Природне освітлення – освітлення приміщень світлом що потрапляє через світлові прорізи в зовнішніх огорожувальних конструкціях. За своїм спектральним складом воно є найбільш сприятливим. Природне освітлення може бути: бічним, верхнім і комбінованим. Природне освітлення характеризується коефіцієнтом природної освітленості КПО.

Штучне освітлення буває: загальне і комбіноване. Загальне освітлення – це освітлення, при якому світильники розміщуються у верхній зоні приміщення рівномірно, або за розташуванням устаткування. Комбіноване освітлення – це освітлення, при якому до загального освітлення додається місцеве. Місьцеве – це додаткове до загального освітлення що створюється світильниками і концентрує світловий потік безпосередньо на робочих місцях.

Суміщене освітлення – це освітлення, при якому недостатнє за нормами природне освітлення доповнюється штучним.

Недостатнє освітлення робочих місць є однією з причин низької продуктивності праці. У цьому випадку очі працівника сильно напружені, важко розрізняють оброблювані предмети, у людини знижується темп і якість роботи, погіршується загальний стан. Надмірна освітленість призводить до засліплюваності, яка характеризується різкою подразнювальною дією і різкою в очах, при цьому очі працівника швидко втомлюються і зорове сприймання погіршується.

Для створення сприятливих умов зорової роботи рівень освітленості робочих поверхонь має відповідати гігієнічним нормам для даного виду роботи згідно [52], а саме:

- освітленість на робочій поверхні і в межах навколишнього простору повинна розподілятися по можливості рівномірно;
- на робочій поверхні не повинно бути різких тіней;
- блиск повинен бути відсутнім в полі зору;
- освітленість повинна забезпечувати необхідний спектральний склад світла для правильної кольоропередачі.

В лабораторії проводяться зорові роботи середньої точності (розряд зорової роботи IV), підрозряд зорової роботи «в».

У лабораторії проведення НДР освітлення є суміщеним. Кількість світильників в приміщенні становить 8 шт., в кожному світильнику знаходиться по 2 лампи. У лабораторії є 2 вікна загальною площею 12 м². Забезпечується нормоване значення освітленості.

4.4 Аналіз впливу шуму та вібрації

Головним шумовим агрегатом є робота сушильна шафа.

Характер шуму тональний. Сушильна шафа працює цілодобово.

Фактичний шум складає 30 ДБА. Згідно цих норм загальний рівень шуму в приміщенні лабораторії не повинен перевищувати 75 ДБА. Оскільки шум в лабораторії не перевищує встановлені норми, то шкідливого впливу на людину не відбувається.

4.5 Аналіз забрудненості повітря

Вплив пилу на організм людини залежить від складу пилу та його походження. Нетоксичний пил може викликати подразнення шкіри, при цьому

може виникнути захворювання шкіри – дерматит. Якщо пил проникає в легені, то він може викликати таке професійне захворювання, як пневмоконіоз.

Чистота повітря в лабораторії визначається вмістом пилу і шкідливих речовин. В повітрі робочої зони періодично контролюється вміст шкідливих речовин в повітрі лабораторії.

Для захисту органів дихання від попадання в них пилу в даній роботі слід використовувати протипилові респіратори [56]. Для локалізації шкідливих речовин також встановлена механічна витяжна вентиляція марки С4.70-3.2.

4.6 Електробезпека

Живлення всього обладнання в лабораторії здійснюється від мережі з напругою 220 В. Мікроскоп має підсилену ізоляцію, комп'ютери для обробки інформації також мають підвищену ізоляцію, а також закриті корпуси, що захищають їх від потрапляння пилу. Лабораторія в інституті надтвердих матеріалів відноситься до категорії приміщень без підвищеної небезпеки.

Електробезпека людей значною мірою залежить від вологості і температури повітря у приміщенні, ступеня електропровідності підлоги і стін, наявності в повітрі хімічних речовин й електропровідного пилу тощо.

Безпека експлуатації роботи електроустаткування забезпечується наступними захисними заходами: періодичною перевіркою стану ізоляції та недоступністю струмоведучих частин [57]. На дію електричного ураження впливає ряд факторів: величина струму (1 мА), рід струму (струм перемінний), частота струму (50 Гц), шлях струму в організмі, тривалість дії струму, стан організму, виробниче середовище.

Величина струму, що протікає через будь-яку ділянку тіла. При розробці захисних заходів, вважають небезпечним струм у 25 мА, при якому важко самотійно відірватись від провідника, а струм величиною 100 мА може призвести до смертельного наслідку.

У лабораторії, де проводилися дослідження, правильно виконане захисне заземлення корпусів, електроустаткування і приладів. Розташування робочих місць таке, що виключається можливість одночасного доторкання до корпусів, електроустаткування і приладів.

Можливими випадками ураження електричним струмом у даній лабораторії є ураження при пошкодженні ізоляції і заземлення мікроскопу та електричного обладнання або при пошкодженні розетки.

4.7 Пожежна безпека

Вимоги щодо конструктивних та планувальних рішень промислових об'єктів, а також інших питань забезпечення їхньої пожежо- та вибухобезпеки значною мірою визначаються категорією приміщень та будівель за вибухопожежною та пожежною небезпекою. Визначення категорії приміщення проводиться з урахуванням показників пожежовибухонебезпечності речовин та матеріалів, що там знаходяться (використовуються) та їх кількості. Відповідно до ОНТП 24-86 приміщення за вибухопожежною та пожежною небезпекою поділяються на п'ять категорій (А, Б, В, Г, Д).

Згідно з категоріями приміщень і будівель по вибухопожежній небезпеці лабораторії належать до таких категорій:

Д – лабораторія для приготування порошкових сумішей, лабораторія для проведення досліджень. Тому що в приміщенні знаходяться негорючі матеріали, такі як порошки GaN.

В – лабораторія, де знаходиться апарати високого тиску, вакуумні печі та дробарки. Тому що в приміщенні знаходяться негорючі порошки у розжареному стані, процес обробки яких супроводжується виділенням тепла; горючий газ, такий як водень, що спалюють і утилізують, як паливо.

Система пожежної сигналізації – сукупність технічних засобів, призначених для виявлення пожежі, обробки, передачі в заданому вигляді повідомлення про пожежу, спеціальної інформації та видачі команд на включення автоматичних

установок пожежогасіння і включення виконавчих установок систем протидимного захисту, технологічного та інженерного обладнання, а також інших пристроїв протипожежного захисту.

Пожежна сигналізація та приміщення, в яких вона розташовується, приведені в інструкції ВПСН-61-78, де залежно від схеми включення сповіщувачів сигналізаційні пожежні системи ділять на променеві та кільцеві. Вони складаються з однотипних елементів: приймальної станції, провідників, оповіщувачів.

Позитивна якість променевої системи – надійність, недолік – велика кількість проводів.

Позитивна якість кінцевої системи – менша кількість проводів, а недолік – менша надійність.

Дія сповіщувачів ґрунтується на впливі диму, тепла і світла на чутливі елементи сповіщувачів. Їх поділяють на теплові, димові, світлові, комбіновані. В якості чутливого елемента в них використовують біметали, термопари, напівпровідники та ін. [49], [56].

Кожна лабораторія має схему евакуації людей під час пожежі (рис 4.2).

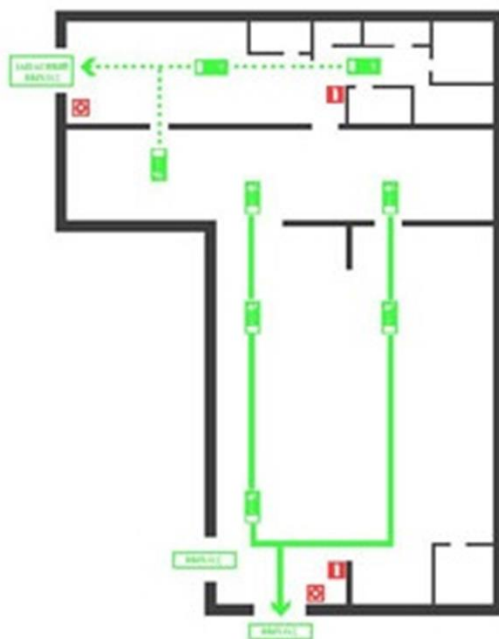


Рисунок 4.2 – План евакуації

У зв'язку з тим, що в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАНУ України більша частина обладнання є електричним, основним засобом гасіння пожежі є вогнегасник ОУ-2. Для виявлення пожеж у лабораторіях застосовується автоматична пожежна сигналізація. Тип автоматичного датчика плавкий.

5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

5.1 Науково-технічна актуальність НДР

Сучасний ринок напівпровідникових матеріалів в значній мірі належить кремнієвим та карбідокремнієвим елементам. Кремній найчастіше використовується в діодах, світлодіодах, транзисторах, випрямлячах і інтегральних схемах (чипах), сонячних елементах. Окрім кремнію широко використовуються арсенід галію, арсенід алюмінію, германій та багато інших елементів. В останні роки дедалі популярніші органічні напівпровідники, які застосовуються, наприклад, у копіювальній техніці.

Але у даній роботі ми розглянемо GaN, як найбільш перспективний варіант в області напівпровідників. Основними перевагами приладів на основі GaN у порівнянні з традиційними приладами на основі кремнієвих елементів є:

- зменшення розмірів пристроїв та зменшення вартості обслуговування таких пристроїв за рахунок більшої ШЗ та менших тепловтрат провідників на основі GaN;
- більш високі частоти перемикання таких пристроїв та вищі робочі температури зумовлюють зниження необхідності охолодження таких пристроїв;
- прямопропорційне зменшення індуктивності та ємності конденсаторів у силових ланцюгах за рахунок підвищення частоти перемикання;
- зниження ваги, об'єму та вартості електронних пристроїв на основі GaN.

Отже, не дивлячись на більш високу вартість GaN у порівнянні з кремнієм, застосування кристалів GaN в перспективі повинно призвести до зменшення пристроїв на їх основі, зменшення рівня шуму, що дозволить зекономити приблизно (10-20) % на виробництво та обслуговування таких пристроїв. Внаслідок цього вирощування монокристалів GaN та дослідження їх властивостей постає актуальним питанням з точки зору фундаментальної науки.

5.2 Розрахунок витрат на проведення НДР

Розрахунок усіх витрат організації-виконавця НДР, пов'язаних з виконанням теми, дає можливість встановити її собівартість або кошторисну вартість. Кошторис розробляє виконавець робіт на основі календарного плану проведення досліджень і затверджує замовник або орган, що забезпечує фінансування робіт. Як правило, кошторис складається до початку виконання робіт і тому називається плановим.

Методичні поради щодо встановлення величини витрат на проведення робіт по темі в розрізі типових статей кошторисної вартості (калькуляції собівартості) НДР наводяться нижче.

5.2.1. Витрати на оплату праці

Витрати за цією статтею включають заробітну плату безпосередніх виконавців теми, а заробітна плата адміністративно-управлінського персоналу, працівників дослідних виробництв включаються в кошторисну вартість теми через статтю «Накладні витрати». Крім цього, слід враховувати, що для тем, які фінансуються за рахунок держбюджету прибуток не планується і тому в дану статтю витрат включається тільки основна заробітна плата (без премій та інших виплат, що здійснюються із прибутку).

Витрати на оплату праці розраховують на основі даних про трудомісткість окремих робіт по темі (табл. 5.1) та посадових окладів безпосередніх їх виконавців (табл. 5.2).

Загальна трудомісткість робіт, що виконуються безпосередньо студентом (інженером-дослідником), визначається навчальним планом відповідного напрямку підготовки.

Таблиця 5.1 – Трудомісткість робіт по темі (умовний приклад)

Найменування робіт по темі дослідження	Трудомісткість за виконавцями, людино-днів			
	Провідний науковий співробітник	Старший науковий співробітник	Інженер-дослідник	Аспірант
1	2	3	5	7
1. Уточнення та конкретизація завдань по темі дослідження	1	2	3	–
2. Аналіз науково-технічних публікацій з теми	–	4	12	–
3. Виконання дослідницької роботи	7	30	65	65
Разом за виконавцями теми	8	36	80	65

Подальші розрахунки витрат на оплату праці проводяться за алгоритмом, зрозумілим із табл. 5.2.

Середньоденна заробітна плата за категоріями виконавців розраховується шляхом ділення їх посадового місячного окладу на 21,2 (де 21,2 – усереднене число робочих днів за місяць).

Таблиця 5.2 – Розрахунок витрат на оплату праці

Посада виконавців теми	Планова трудомісткість, люд.-днів	Заробітна плата, грн		
		Посадовий місячний оклад	Середньоденна зарплата	Усього за виконавцями
1	2	3	4	5
1.Провідний науковий співробітник	16	9000	424,52	6792,32
2.Старший науковий співробітник	72	8500	400,94	28867,68

Продовження таблиці 5.2

1	2	3	4	5
3. Інженер-дослідник	160	6000	283,01	45281,6
4. Аспірант	130	6705	316,27	41155,5
Разом оплата праці з теми				122097,1

5.2.2. Єдиний соціальний внесок

Єдиний соціальний внесок (ЄСВ) – це обов’язкове відрахування на загальнодержавне соціальне страхування. З 1 січня 2016 р. ставка ЄСВ складає 22 %. Базою для нарахування ЄСВ слугують загальні витрати на оплату праці по темі (підсумок по табл.4.2).

$$\text{ЄСВ} = \text{ЗП} \cdot 0,22 \quad (5.1)$$

де ЗП – загальні витрати на оплату праці по темі.

Наразі ЄСВ буде становити:

$$\text{ЄСВ} = 122097,1 \cdot 0,22 = 26861,36 \text{ грн.}$$

5.2.3. Матеріали, необхідні для проведення досліджень

В даній статті враховують вартість усіх видів матеріалів, необхідних для проведення НДР, з вирахуванням вартості зворотних відходів.

Тематика дослідницьких робіт, які виконуються на інженерно-фізичному факультеті, передбачає використання, перш за все, шихтових матеріалів, технологічних матеріалів для термічної, хіміко-термічної обробки та нанесення

спеціальних покриттів, хімічних реактивів, витратних матеріалів для офісної техніки тощо.

Розрахунки зводять за формою у табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Розрахунки витрат на матеріали

Найменування матеріалу	Стандарт, технічні умови	Одиниця виміру	Кількість	Ринкова ціна за одиницю, грн.	Сума, грн.
1. Порошок GaN		гр	4	1200	4800
2. Сплави - розчинники		шт	10	12250	12250
3. Платинова фольга		гр	1	32000	32000
Загальні витрати на матеріали					49050

Транспортно-заготівельні витрати приймаємо на рівні 10 % від планової вартості загальних витрат на матеріали:

$$T_v = 49050 \cdot 0,1 = 4905 \text{ грн.}$$

У такому разі загальна сума витрат на закупівлю матеріалів та їх транспортування буде становити:

$$B_m = 49050 + 4905 = 53955 \text{ грн.}$$

5.2.4. Енергоносії для проведення досліджень

Всі роботи проводились безпосередньо в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, тому витрати на енергоносії не передбачені.

5.2.5. Витрати на спеціальне обладнання

В роботі використовується вже існуюче обладнання: АВТ типу «тороїд», сканувальний мікроскоп. Все обладнання належить інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, тому витрати на оренду обладнання не передбачені.

5.2.6. Вартість послуг сторонніх організацій

Дана робота не потребувала оренди дослідницьких установок, адже всі вони були в наявності. Зразки вивчались безпосередньо в лабораторіях Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, тому витрати на послуги сторонніх організацій не передбачені.

5.2.7. Витрати на службові відрядження

Всі роботи проводились безпосередньо в лабораторіях Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, тому витрати на відрядження не передбачені.

5.2.8. Інші прямі невраховані витрати

У цій статті поєднуються всі витрати на проведення НДР, що не увійшли до попередніх статей. При проведенні роботи інші прямі витрати приймаємо на рівні 10 % від суми врахованих витрати на виконання НДР.

$$I_{\text{в}} = (ЗП + \text{ЄСВ} + B_{\text{м}}) \cdot 0,1.$$

Наразі $I_{\text{в}}$ буде становити:

$$I_{\text{в}} = (122097.1 + 26861.36 + 53955) \cdot 0,1 = 20291,34 \text{ грн.}$$

5.2.9. Накладні витрати

Накладні витрати включаються до калькуляції кошторисної вартості теми пропорційно обсягам витрат на оплату праці основних виконавців або пропорційно сумі прямих витрат на виконання теми досліджень по нормативам організації-виконавця цього дослідження.

Ця стаття включає витрати, пов'язані з управлінням організацією-виконавцем теми, витрати на винахідництво і раціоналізацію; витрати на амортизацію основних засобів; витрати на науково-технічну інформацію; витрати на забезпечення нормальних умов праці і техніки безпеки; витрати на оплату послуг банків; податки, збори та інші обов'язкові платежі і витрати тощо.

Розглянемо варіант розрахунку накладних витрат пропорційно сумі прямих витрат на рівні 20 %.

$$H_{\text{в}} = (ЗП + \text{€CB} + V_{\text{м}} + I_{\text{в}}) \cdot 0,2. \quad (5.3)$$

Наразі $H_{\text{в}}$ буде становити:

$$H_{\text{в}} = (122097.1 + 26861.36 + 53955 + 20291,34) \cdot 0,2 = 44640,96 \text{ грн.}$$

5.2.10. Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

Планова калькуляція вартості проведення досліджень по темі складається на підставі виконаних розрахунків та нормативних даних (табл.5.4).

Таблиця 5.4 – Планова калькуляція кошторисної вартості НДР

Найменування статей витрат	Сума, грн	Обґрунтування
1	2	3
1.Витрати на оплату праці	122097,1	Відповідно до розрахунків

Продовження таблиці 5.4

1	2	3
2.Єдиний соціальний внесок	26861,36	22,0 % від загальних витрат на оплату праці
3.Матеріали для проведення досліджень	49050,0	Відповідно до розрахунків
4.Енергоносії для проведення досліджень	—	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
5.Спецобладнання для наукових цілей	—	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
6.Вартість послуг сторонніх організацій	—	За договором із сторонніми організаціями (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
7.Витрати на службові відрядження	—	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку не передбачено)
8.Інші невраховані прямі витрати по темі	20291,34	10 % від суми прямих розрахованих витрат по темі
9.Накладні витрати	44640,96	Відповідно до нормативів організації-виконавця теми (у нашому випадку 20 % від суми прямих витрат)
10.Усього витрат по темі	262940,76	Сума попередніх статей

5.3. Науково-технічна ефективність НДР

Розрахунок очікуваного економічного ефекту НДР необхідно для визначення доцільності проведення даної роботи. Проте він може бути розрахований лише по НДР, які безпосередньо спрямовані на створення нових матеріалів, покращення параметрів якості продукції, а також створення нових конструкцій.

Для визначення річного економічного ефекту скористаємося бальною системою оцінювання економічної ефективності за наступними показниками:

- важливість розробки (K_1);
- можливість використання результатів розробки (K_2);

- теоретичне значення та рівень новизни (K_3);
- складність дослідження (K_4).

Коефіцієнт K_1 може приймати наступні значення:

- а) ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів – 1 бал;
- б) робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво – 3 бали;
- в) робота являє собою частину відомчої програми – 5 балів;
- г) робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів – 7 балів;
- д) робота є частиною міжнародної комплексної програми – 8 балів.

Коефіцієнт K_2 може приймати такі значення:

- а) результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі – 1 бал;
- б) результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією – 3 бали;
- в) результати розробки можуть бути використані декількома організаціями – 5 балів.
- г) результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі – 8 балів;
- д) результатами розробки можуть користуватися у різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт K_3 може приймати такі значення:

- а) робота являє собою аналіз, узагальнення або класифікацію відомої інформації, подібні результати раніше були відомі в досліджуваній галузі – 2 бали;
- б) під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів – 3 бали;
- в) внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів – 5 балів;
- г) внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики тощо – 6 балів;

д) отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше – 8 балів.

Коефіцієнт K_4 може приймати такі значення:

- а) роботу виконує один підрозділ, витрати до 10 000 гривень – 1 бал;
- б) роботу виконує один підрозділ, витрати від 10 000 до 50 000 гривень – 3 бали;
- в) роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень – 5 балів;
- г) робота виконується декількома підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень – 7 балів;
- д) робота виконується декількома організаціями, витрати понад 200 000 гривень – 9 балів.

Загальна бальна оцінка (Б) вираховується перемноженням коефіцієнтів.

$$Б = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4.$$

В нашому випадку бальна оцінка ефективності згідно табл. 5.5 становить:

$$Б = 3 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 9 = 405$$

Таблиця 5.5 – Бальна оцінка ефективності НДР

Показник оцінки ефективності НДР	Умове позначення показника	Характеристики даної роботи	Кількість балів
1	2	3	4
1. Важливість розробки	K_1	Робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво	3
2. Можливість використання результатів розробки	K_2	Результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі	5

1	2	3	4
3.Теоретична значимість та рівень новизни розробки	K_3	Під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів	5
4.Складність дослідження	K_4	Робота виконується декількома підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень	9

Умовний ефект НДР розраховується за формулою:

$$E_{\text{НДР}}^y = 500 \cdot B - E_n \cdot V_{\text{НДР}},$$

де 500 – умовна вартість одного балу;

E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності (може бути в межах 0,1-0,3);

$V_{\text{НДР}}$ – сумарні витрати на виконання НДР (підсумок табл. 1.4);

У нашому прикладі умовний ефект виконання НДР буде становити:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot 675 - 0,2 \cdot 262940,76 = 284911,848 \text{ грн.}$$

Економічна ефективність НДР визначається коефіцієнтом умовної економічної ефективності E_e . Він є відношенням умовного ефекту виконання НДР до сумарних витрат на виконання НДР та розраховується за формулою:

$$E_e = \frac{E_{\text{НДР}}}{V_{\text{НДР}}}. \quad (5.5)$$

У нашому прикладі E_e буде становити:

$$E_e = \frac{284911,848}{262940,76} = 1,083$$

Коефіцієнт умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи становить 1,083 (перевищує одиницю), що свідчить про доцільність її виконання.

ВИСНОВКИ

1. В результаті виконання дипломної роботи було отримано кристали нітриду галію в інтервалі тисків 3-5 ГПа. Ми ознайомились з методикою проведення експериментів при високих тисках та методами дослідження кристалів нітриду галію (сканувальна електронна мікроскопія, енергодисперсійна рентгенівська мікроскопія, рентгенофазовий аналіз, ІЧ- та УФ спектроскопія). Експеримент з вирощування кристалів нітриду галію проводився за високих тисків $P=4-5$ ГПа та температурах (1200-1600) °С методом температурного градієнту.

2. В роботі розглянуто закономірності вирощування кристалів нітриду галію в заданих умовах. Обрано матеріали сплави-розчинника та термодинамічні параметри (тиск, температура) для вирощування кристалів нітриду галію. Досліджено склад, структуру та властивості отриманих кристалів нітриду галію та сплавів-розчинників. Досліджено кінетику процесів кристалізації затравочного росту GaN.

3. Проведені дослідження показали, що тиск у 4,4 ГПа є достатнім для кристалізації GaN, а температурний інтервал вирощування кристалів GaN за цього тиску знаходиться в межах (1200-1600) °С.

4. Температура вирощування 1400 °С є недостатньо високою для ефективного транспорту атомів Ga та N з джерела, що призводить до росту кристалів на самому джерелі, а за температури вирощування кристалів 1600 °С активно відбуваються дифузійні процеси, що призводить до структурної недосконалості отриманих монокристалів, що вказує на те, що ця температура вирощування є зависокою. Отже, це вказує на те, що температурний інтервал можливого отримання структурно досконалих монокристалів складає (1400-1600) °С. Крім того, відкритим питанням залишається зниження тенденції GaN до полікристалізації. Все це вказує, з одного боку – на можливість та перспективність отримання монокристалів GaN, з іншого – на необхідність

подальшої оптимізації параметрів (зокрема температури та градієнту) отримання та пошук більш ефективних сплавів-розчинників.

5. Коефіцієнт економічної доцільності виконання даної науково-дослідної роботи становить $E_e=1,083$, тобто виконання цієї роботи є економічно вигідним.

6. Приміщення, в якому виконувалась дана НДР є безпечним для роботи за всіма розглянутими параметрами.

CONCLUSIONS

1. As a result of thesis, we obtained crystals of gallium nitride in the pressure range of 3-5 GPa. We got acquainted with the method of conducting experiments at high pressures and methods of studying gallium nitride crystals (scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray microscopy, X-ray phase analysis, IR and UV spectroscopy). The experiment on the cultivation of gallium nitride crystals was performed at high pressures $P = 4-5$ GPa and temperatures of (1200-1600) °C by the temperature gradient method.

2. The regularities of growing gallium nitride crystals under given conditions are considered in the work. Solvent alloy materials and thermodynamic parameters (pressure, temperature) for growing gallium nitride crystals were selected. The composition, structure and properties of the obtained crystals of gallium nitride and solvent alloys were studied. The kinetics of GaN seed growth crystallization processes has been studied.

3. Studies have shown that a pressure of 4.4 GPa is sufficient for the crystallization of GaN, and the temperature range of growth of GaN crystals at this pressure is in the range of (1200-1600) oC.

4. The growing temperature of 1400 oC is not high enough for efficient transport of Ga and N atoms from the source, which leads to the growth of crystals at the source, and at the growing temperature of 1600 oC diffusion processes are active, which leads to structural imperfection of the obtained single crystals. that this growing temperature is too high. Thus, this indicates that the temperature range of possible production of structurally perfect single crystals is (1400-1600) oC. In addition, the reduction of the GaN tendency to polycrystallization remains an open question. All this indicates, on the one hand - the possibility and prospects of obtaining GaN single crystals, on the other - the need to further optimize the parameters (including temperature and gradient) of obtaining and finding more efficient solvent alloys.

5. The coefficient of economic feasibility of this research work is $E_e = 1,083$, i.e. the implementation of this work is economically viable.

6. The room in which this research was performed is safe to work on all the considered parameters.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Поплавко Ю. М. Фізичне матеріалознавство [Текст] / Ю. М. Поплавко. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 838 с.
2. Morkoç H. Handbook of nitride semiconductors and devices: [3 v.] [Text] / H. Morkoç. – v. 1. – USA : Wiley, 2009. – 1311 p.
3. Kittel Ch. Introduction to Solid State Physics [Text] / Ch. Kittel. – USA : Wiley, 2004. – 686 p.
4. Chao T. S. Introduction to semiconductor manufacturing technology [Text] / T. S. Chao. – USA : SPIE PRESS, 2001. – 756 p.
5. Kazimierczuk M. K. Laboratory manual for pulse-width modulated DC-DC power converters [Text] / M. K. Kazimierczuk, A. Ayachit. – New York : Wiley, 2015. – 272p.
6. Hao Y. Nitride Wide Bandgap Semiconductor Material and Electronic Devices [Text] / Y. Hao, J. F. Zhang, J. C. Zhang. – China : CRC Press, 2016. – 392 p.
7. Акчурин Р. Х. Нитрид галлия – перспективный материал электронной техники [Текст] / Р. Х. Акчурин, А. А. Мармалюк // Материаловедение. – 1999. – № 9. – С. 950 – 962.
8. Karpinski J. Equilibrium pressure of N_2 over GaN and high pressure solution growth of GaN [Text] / J. Karpinski, J. Jun, S. Porowski // J. Cryst. Growth. – 1984. – V. 66. – P. 1 – 10.
9. Karpinski J. Equilibrium pressure of N_2 over GaN and high pressure solution growth of GaN [Text] / J. Karpinski, J. Jun, S. Porowski // J. Cryst. Growth. – 1984. – V. 66. – P. 11 – 20.
10. Ammano H. High-power InGaN single-quantum-well-structure blue and violet light-emitting diodes [Text] / H. Ammano, M. Kito Jpn // J. Appl. Phys. – 1989. – V. 28. – P. 39.
11. Nakamura S. Room-temperature continuous-wave operation of InGaN multi-quantum-well structure laser diodes with a lifetime of 27 hours [Text] / S. Nakamura, T. Mukai // J. of Appl. Physics. Lett. – 1992. – V. 31. – P. 39 – 42.

12. Minsky M. S. High performance thin-film flip-chip InGaN–GaN light-emitting diodes [Text] / M. S. Minsky, M. White, E. L. Ilu // Appl. Phys. Lett. – 1996. – V. 68. – P. 1531 – 1543.
13. Harrison W. A. Electronic Structure and Properties of Solids Freeman [Text] / W. A. Harrison. – San Francisco: CA, 1980. – 390 p.
14. Christensen N. E. Optical phonon modes in GaN and AlN [Text] / N. E. Christensen, I. Gorczyca // Phys. Rev. B. – 1994. – V. 49. – P. 4397 – 4408.
15. Ueno M. Stability of the wurtzite-type structure under high pressure: GaN and InN [Text] / M. Ueno, M. Yoshida, A. Onodera [et al] // Phys. Rev. B. – 1994. – V. 49. – P. 14 – 27.
16. Edgar J. H. Properties of Group III Nitrides [Text] / J. H. Edgar. – London : INSPEC, 1994. – 302 p.
17. Davis R. F. III-V nitrides for electronic and optoelectronic applications [Text] / R. F. Davis // Proc. IEEE. – 1991. – V. 79. – P. 702 – 710.
18. Strite S. GaN, AlN, and InN: a review [Text] / S. Strite, H. Morkoc // J. Vac. Sci. Technol. B. – 1991. – V. 10. – P. 1237 – 1245.
19. Vurgaftman I. Band parameters for nitrogen-containing semiconductors [Text] / I. Vurgaftman, J.R. Meyer // J. Appl. Phys. – 2003. – V. 2003. – P. 3675 – 3682.
20. Bernardini F. Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides [Text] / F. Bernardini, V. Fiorentini, D. Vanderbilt // Phys. Rev. B. – 1997. – V. 56. – P. 10024 – 10036.
21. Morko H. GaN FETs for microwave and high-temperature applicationsc [Text] / H. Morko // J. Appl. Phys. – 1994. – V. 76. – P. 1363 – 1375.
22. Jayasinghe S. N. Electric-field driven jetting from dielectric liquids [Text] / S. N. Jayasinghe, M. J. Edirisinghe // Appl. Phys. – 1999. – V. 85. – P. 8502 – 8514.
23. Grolier V. Thermodynamic analysis of the Pt–Sn system [Text] / V. Grolier, R. Schmid-Fetzer // Journal of Alloys and Compounds. – 2008. – V. 4. – P. 402 – 411.
24. Lambrecht W. R. UV reflectivity of GaN: Theory and experiment [Text] / W. R. Lambrecht, B. Segal // Phys. Rev. B. – 1995. – V. 51. – P. 13516.

25. Porowski S. High pressure growth of GaN – new prospects for blue lasers [Text] / S. Porowski // Journal of crystal growth. – 1996. – V. 4. – P. 583 – 589.
26. The challenge of decomposition and melting of gallium nitride under high pressure and high temperature [Text] / S. Porowski, B. Sadovyi, S. Gierlotka [et al] // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2015. – V. 85. – P. 138 – 143.
27. Бакуль В. Н. Устройство для создания высокого давления и температуры [Текст] / В. Н. Бакуль, А. И. Прихна, А. А. Шульженко. – Москва : Наука, 1984. – 59 с.
28. Пат. 1342369 Англия, МКИ В 01 3/00. Устройство для создания высокого давления [Текст] / Колчин А.В., Вепринцев В.И., Глачко М.И. – № 271/2711; заявл. 10.03.70; опубл. 03.01.74.
29. Тонков Е. Ю. Фазовые диаграммы соединений при высоком давлении [Текст] / Е. Ю. Тонков. – Москва : Наука, 1983. – 280 с.
30. Hanneman R. E. Pressure dependence of emf of thermocouples [Text] / R. E. Hanneman, H. M. Strong. – New York : GERL, 1965. – 76 p.
31. Особенности методов измерения давления и температур в аппаратах высокого давления [Текст] / А. И. Прихна, Ю. С. Масленко, И. С. Белоусов [и др.] – Москва : Наука, 1978. – 192 с.
32. Андреев В. Д. Многообразие и единые фундаментальные основы механизмов образования алмаза [Текст] / В. Д. Андреев – Киев : ИСМ АН УССР, 1989. – 32 с.
33. Современная кристаллография [Текст] / А. А. Чернов, Е. И. Гиваргизов, Х.С. Багдасаров [и др.] – Москва : Наука, 1980. – 407 с.
34. Тимофеева В. А. Рост кристаллов из раствор-расплавов [Текст] / В. А. Тимофеева. – Москва : Наука, 1978. – 268 с.
35. Kondepudi D. Introduction to modern thermodynamics [Text] / D. Kondepudi. USA : Wiley, 2008. – 80 p.
36. Drickamer, H. G. Electronic transitions and the high pressure chemistry and physics of solids [Text] / H. G. Drickamer, C. W. Frank. Germany : Springer Science, 2003. – 675 p.

37. Badding J. V. High-pressure chemistry of hydrogen in metals: In situ study of iron hydride [Text] / J. V. Badding, R. J. Hemley, H. K. Mao // Science. – 1991. – V. 258. – P. 421 – 424.

38. Hemley R. J. Effects of high pressure on molecules [Text] / R. J. Hemley // Annual Review of Physical Chemistry. – 2000. – V. 1. – P. 763 – 800.

39. Strong H. M. Further Studies on Diamond Growth Rates and Physical Properties of Laboratory-Made Diamond [Text] / H. M. Strong, R. M. Chrenko // The Journal of Physical Chemistry. – 1971. V. 28. – P. 28 – 37.

40. Бланк В. Д. Фазовые превращения в твердых телах при высоком давлении: учебное пособие [Текст] / В. Д. Бланк, Э. И. Эстрин. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 412 с.

41. Ивахненко С. А. Закономерности направленного роста монокристаллов алмаза в области термодинамической стабильности: дис. ... доктора техн. наук: 10.05.98 [Текст] / С. А. Ивахненко. – Киев, 1998. – 191 с.

42. Spivak, A. V. Diamond syntheses in multicomponent carbonate–carbon melts of natural chemistry: elementary processes and properties [Text] / A. V. Spivak, Y. A. Litvin // Diamond and related materials. – 2005. – V. 3. – P. 482 – 487.

43. +HPHT synthesis of diamond with high nitrogen content from an Fe_3N –C system [Text] / Y. Borzdov, Y. Pal'Yanov, I. Kupriyanov [et al] // Diamond and related materials. – 2001. – V. 11. – P. 1863 – 1870.

44. Satir-Kolorz A. H. On the Solubility of Nitrogen in Liquid Iron and Steel Alloys Using Elevated Pressure [Text] / A. H. Satir-Kolorz, H. K. Feichtinger // Z. Metallkde Bd. – 1991. – V. 82. – P.9 – 21.

45. Подуст С. В. Методичні рекомендації з теми: «Інфрачервона спектроскопія» курсу «Фізико-хімічні методи аналізу» з використанням програми IR Tutor [Текст] / С. В. Подуст. – Кривий Ріг : КДПУ, 2018. – 41 с.

46. Long D. A. Raman spectroscopy [Text] / D. A. Long. – New York : McGraw – Hill, 1997. – 268 p.

47. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis [Text] / J. I. Goldstein, D. E. Newbury, J. R. Michael [et al]. – Germany : Springer, 2015. –

548 p.

48. Massalski T. B. Fe-Ga phase diagram from Binary Alloy Phase Diagrams [Text] / T. B. Massalski. – USA : ASM International, 1992. – 1852 с.

49. Ткачук К.Н., Халімовський М.О., Зацарний В.В. та ін. Основи охорони праці: підручник [Текст]. – Київ : Основа, 2011. – 474 с.

50. Про охорону праці [Електронний ресурс] : Закон України від 14.10.1992 р. № 2695-ХІІ. – Електронні текстові дані. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>, вільний. – (дата звернення: 04.06.2021). – Назва з екрану.

51. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Текст] : ДСН 3.3.6.042-99. – Чинний з 1999-12-01. – Київ : Міністерство охорони здоров'я, 1999. – 10 с.

52. Державні будівельні норми України. Природне і штучне освітлення [Текст] : ДБН В.2.5-28-2006. – Чинний з 2006-05-15. – Київ : Мінбуд України, 2006. – 76 с.

53. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку [Текст] : ДСН 3.3.6.037-99. – Чинний з 1999-12-01. – Київ : Міністерство охорони здоров'я, 1999. – 34 с.

54. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації [Текст] : ДСН 3.3.6.039-99. – Чинний з 1999-12-01. – Київ : Міністерство охорони здоров'я, 1999. – 30 с.

55. ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – Введ. 1989-01-01. – Москва : ИПК издательство стандартов, 1988. – 50 с.

56. Про пожежну безпеку [Електронний ресурс] : Закон України від 17.12.1993 № 3745-ХІІ. – Електронні текстові дані. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3745-12#Text>, вільний. – (дата звернення: 04.06.2021). – Назва з екрану.

57. Методичні рекомендації до розробки економічної частини дипломних проектів і робіт освітньо-кваліфікаційного рівня «спеціаліст» та «бакалавр» для

студентів інженерно-фізичного факультету спеціальності 7.090102 «Фізичне матеріалознавство», 7.090103 «Композиційні та порошкові матеріали та покриття», 7.090104 «Металознавство», 7.090403 «Ливарне виробництво чорних і кольорових металів» та 7.090405 «Спеціальна металургія» денної та заочно-дистанційної форм навчання [Текст] / Уклад.: В. І. Кривда, С. В. Нараєвський, Н. О. Черненко. – Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – 52 с.