

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри електронної техніки

_____ Олександр ВОВНА
(підпис) (ім'я та прізвище)

«__» _____ 2022 р.

Випускна кваліфікаційна робота

_____ бакалавра
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Розробка електронного пристрою моніторингу температури в
комірках високого тиску»

Виконав студент 3 курсу, групи ЕЛТзп-19
(шифр групи)

спеціальності _____ 171 Електроніка
(шифр і назва спеціальності)

_____ Копитько Владислав Сергійович
(Прізвище, ім'я та По-батькові) (підпис)

Керівник _____ зав. кафедри ЕТ, д.т.н., проф. _____ Олександр ВОВНА
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ім'я) (підпис)

Рецензент _____ зав. кафедри ЕЛІН, к.т.н., доц. _____ Олександр КОЛЛАРОВ
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ім'я) (підпис)

Нормоконтроль
зав. кафедри ЕТ, д.т.н., проф.

*Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.*

_____ Олександр ВОВНА
(підпис)

Студент _____
(підпис)

Луцьк – 2022 р.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки
(повна назва кафедри)

Захист відбувся _____
(дата)

з оцінкою _____

Секретар ЕК _____
(підпис)

Випускна кваліфікаційна робота
_____бакалавра_____

Тема: «Розробка електронного пристрою моніторингу температури в комірках високого тиску»

Спецчастина: _____

Виконавець, студент

гр. ЕЛТзп – 19

Владислав КОПИТЬКО

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник

Олександр ВОВНА

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Консультанти:

Олександр ВОВНА

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Іван ЛАКТИОНОВ

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Олександр ШТЕПА

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

**Державний вищий навчальний заклад
"Донецький національний технічний університет"**

Інститут, факультет Комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
Кафедра Електронна техніка
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 171 Електроніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри електронної техніки

Олександр ВОВНА

« _____ » 2022 року

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Копитько Владислав Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Розробка електронного пристрою моніторингу температури в комірках високого тиску

керівник проекту (роботи) Вовна Олександр Володимирович, д.т.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 29.04.2022 року № 163

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи)

Технічна документація та матеріали з переддипломної практики

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз та характеристика об'єкту; обґрунтування та розробка структурної схеми електронного пристрою; розробка принципової схеми електронного пристрою; оцінка метрологічних характеристик; синтез мікропроцесорної частини електронного пристрою; розробка конструкції та зовнішнього вигляду електронного пристрою.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	зав. каф. ЕТ, д.т.н., проф. Вовна О.В.		
2.1	зав. каф. ЕТ, д.т.н., проф. Вовна О.В.		
2.2	проф. каф. ЕТ, д.т.н., доц. Лактіонов І.С.		
3	доц. каф. ЕТ, к.т.н., доц. Штепа О.А.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз методів контролю параметрів речовини під час дії високої температури та тиску		
2	Розробка структури електронного пристрою моніторингу температури в комірках високого тиску		
3	Розробка схеми електронного пристрою нагрівання комірок високого тиску		
4	Додаток А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві		

Студент _____ Владислав КОПИТЬКО
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Олександр ВОВНА
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЛИСТ ЗАУВАЖЕНЬ

Посада, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ	Суть зауваження, оцінка та підпис

АНОТАЦІЯ

Копитько, В.С. Розробка електронного пристрою моніторингу температури в комірках високого тиску / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» зі спеціальності 171 Електроніка. – ДВНЗ «ДонНТУ», Луцьк, 2022.

Пояснювальна записка: 57 стор., 17 рис., 17 посилань.

Виконано розробку електронного пристрою нагрівання зразків у комірці з алмазним ковадлом, де блоки лазерного нагрівання та вимірювання параметрів спектру оптичного сигналу розділені. Електронний пристрій з розділеними блоками нагрівання та вимірювання параметрів спектру оптичного сигналу має такі переваги: юстирування оптичної частини електронного пристрою блоку вимірювання параметрів спектру здійснюється незалежно від юстирування параметрів інфрачервоного лазера; застосування лінзи, що переміщується в діапазоні фокусної відстані від 30 до 40 мм, дозволяє одержати оптимальну величину поперечного перетину оптичного потоку випромінювання від інфрачервоного лазера на зразку, що досліджується.

Розроблено електронний пристрій моніторингу температури в комірках високого тиску, який має такі особливості: дослідження здійснюється на двох довжинах хвиль оптичного випромінювання; виконується сканування об'єкта дослідження; застосування поляризатора для введення оптичного випромінювання від лазера, а також підвищення амплітудного значення вихідного сигналу на детекторі, що призводить до підвищення точності результату вимірювання.

Основною перевагою розробленого електронного пристрою є те, що він має розділення блоків нагрівання зразка та вимірювального блоку. Розроблено оптичну частину блоку нагрівання зразка в комірці високого тиску, де лазерне нагрівання та оптична схема вимірювання температури розділені між собою.

Ключові слова: моніторинг, температура, високий тиск, комірка, алмазне ковадло, лазер, блок нагрівання, вимірювання, оптичний потік, спектр.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИНИ ПІД ЧАС ДІЇ ВИСОКОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ТИСКУ.....	9
1.1 Аналіз методів отримання високого тиску та температури.....	9
1.2 Підходи щодо моніторингу температури в комірках високого тиску.	19
1.2.1 Яскрава пірометрія.....	20
1.2.2 Пірометрія спектрального відношення.....	21
1.2.3 Спектральна пірометрія.....	22
2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ МОНІТОРИНГУ ТЕМПЕРАТУРИ В КОМІРКАХ ВИСОКОГО ТИСКУ....	24
2.1 Розробка методика калібрування оптичної частини електронного пристрою.....	26
2.2 Розрахунок статичної характеристики перетворення вимірювального каналу температури комірок високого тиску.....	30
3 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ НАГРІВАННЯ КОМІРОК ВИСОКОГО ТИСКУ.....	35
ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	49
ДОДАТОК А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві.....	51

ВСТУП

Зміна характеристик і параметрів речовин в екстремальних умовах експлуатації має велике значення як в теоретичних, так і прикладних сферах науки. Як змінюються властивості мінералів під час дії високої температури та тиску дозволяє деталізувати процеси, що мають місце у внутрішній структурі Землі [1]. Такі експериментальні дослідження надали змогу до розробки технології створення штучних алмазів [2, 3]. Використання результатів експериментальних досліджень у хімії та фізиці високих тисків доволі великі: отримання нових надпровідникових матеріалів, дорогоцінних каменів, полімерних матеріалів, магнетиків і металів, а також матеріалів з надтвердими властивостями. Використання результатів експериментальних досліджень фазових переходів, які мають місце в твердих тілах, дозволило створити нові типи матеріалів, що мають надтверді властивості, це такі матеріали як нітрид бору, штучні алмази та ін.

Завдання науки про вивчення речовин на Землі, а також інших планет мають глибинну спрямованість, а також міждисциплінарний та міжнародний характер, що поєдную між собою такі фундаментальні науки як сейсмологію, геодинаміку, мінералогію, геохімію та петрологію. Одним перспективних методів розв'язання наукових завдань про вивчення складу речовину нашої планети є здійснення експериментального моделювання процесів, що мають місце в ядрі планети Земля.

Тільки зі застосуванням лазерного нагрівання в комірках високого тиску можна експериментально отримати екстремальні величини тиску до 500 ГПа та температури до 6000 К у статичному режимі. Доволі високі значення зазначених параметрів необхідно створювати для дослідження структури нашої планети для вивченні фазових переходів під час дії високого тиску, а також для отримання нових типів надтвердих матеріалів.

Для проведення досліджень властивостей речовини під час дії високих температур і тисків у статичному режимі застосовуються комірки з алмазними ковадлами DAC – Diamond Anvil Cell [4]. До комірки з алмазними ковадлами зразок, що досліджується, розташовується до отвору, який виготовлено з тонкої пластини заліза. Тиск утворюється завдяки стисканню алмазів зі застосуванням трьох або чотирьох гвинтів. Комірка з алмазним ковадлом є базовим інструментом для здійснення експериментальних досліджень з вивчення властивостей мінералів і матеріалів під час дії високих тисків. У цій комірці можна отримати тиск понад 500 ГПа, що в півтора рази більше ніж тиск внутрішньому ядрі планети.

Комірки з алмазними ковадлами практично дуже слабо поглинають електромагнітне випромінювання в широкому діапазоні довжин хвиль від видимої до інфрачервоної області спектри, а є практично прозорими рентгенівського випромінювання.

У випускній кваліфікаційній роботі необхідно розробити електронний вимірювальний пристрій для контролю розподілення температури та оптичного випромінювання від лазера на поверхні зразка, що досліджується, під час дії високих температур і тисків.

Розроблений пристрій повинен мати високу роздільну спектральну здатність, а також широкий діапазон перенастроювання центральної довжини хвилі оптичного випромінювання, високу якість отриманого зображення, відсутність елементів, що рухаються, доволі високу швидкодію.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИНИ ПІД ЧАС ДІЇ ВИСОКОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ТИСКУ

1.1 Аналіз методів отримання високого тиску та температури

У теперішній час розроблено доволі велику кількість методів для впливу на тверду речовину, що здатні змінити її структуру. Статичне стиснення є одним з дієвих і простих методів, за допомогою якого можна одержати зменшення величини відстаней до мінімального значення між атомами, під час дії цього стиснення має місце фазовий перехід. Такий самий ефект проте зі зворотним знаком, що має місце під час збільшення значення відстані між атомами, досягається завдяки збільшенню температури. Значення температури змінюється від 0 до точки плавлення твердого тіла або початку процесу випаровування. Вплив температури та тиску мають протилежні знаки, тому температура руйнування збільшується зі зростанням величини тиску. Отже, для отримання умов фазових змін у твердій речовині зазначені методи сумісно застосовуються.

Під час реалізації сучасних методів наукових досліджень з отримання новітніх матеріалів у геологічній хімії або геологічній фізиці необхідно, щоб на зразки, що досліджуються, які мають геометричні розміри менше ніж 0,01 мм, сумісно впливає високий тиск, значення якого становить до 500 ГПа, та висока температура до 6000 К [5]. Значення стиснення в статичному режимі до такої високої величини тиску можна отримати тільки комірці з алмазними ковадлами. Нагрівання в комірці високого тиску відбувається зі застосуванням оптичного випромінювання від лазера, що є єдиною експериментальною технологією отримання екстремальних значень тиску до 600 ГПа та температури до 6000 К в статичному режимі. Зазначені значення температури та тиску застосовується під час досліджень внутрішньої структури планети щодо вивчення фазових переходів речовин і синтезу нових матеріалів.

Комірки високого тиску з алмазними ковадлами DAC – Diamond Anvil Cell розроблено в 1959 р. співробітниками Національного бюро стандартів Сполучених штатів Америки та дослідниками університету Чикаго.

Комірки з алмазними ковадлами до теперішнього часу є одним з єдиним інструментів у геологічній фізиці та геологічній хімії надвисоких тисків, які мають доволі просту конструкцію та невеликі компактні розміри. Комірку з алмазними ковадлами можна розмістити в людській долоні. Вибір алмазу як матеріалу ковадла обумовлено дуже високою його твердістю, а також стійкістю до впливу високої температури, також алмаз є прозорим матеріалом в широкому спектральному діапазоні оптичного випромінювання. Залежно від призначення та організації експериментальних досліджень застосовують різні типи конструкції комірки з алмазними ковадлами. Найбільшу популярність в під час проведення досліджень отримати комірки Меррілла-Бассета, мембранна комірка, важільні комірки Мао-Белла та гвинтова комірка зі застосуванням циліндричних поршнів. Схему стиснення зразка, що досліджується, між алмазними ковадлами, яка є гвинтовою коміркою, що має в своєму складі циліндричний поршень, наведено на рис. 1.1.

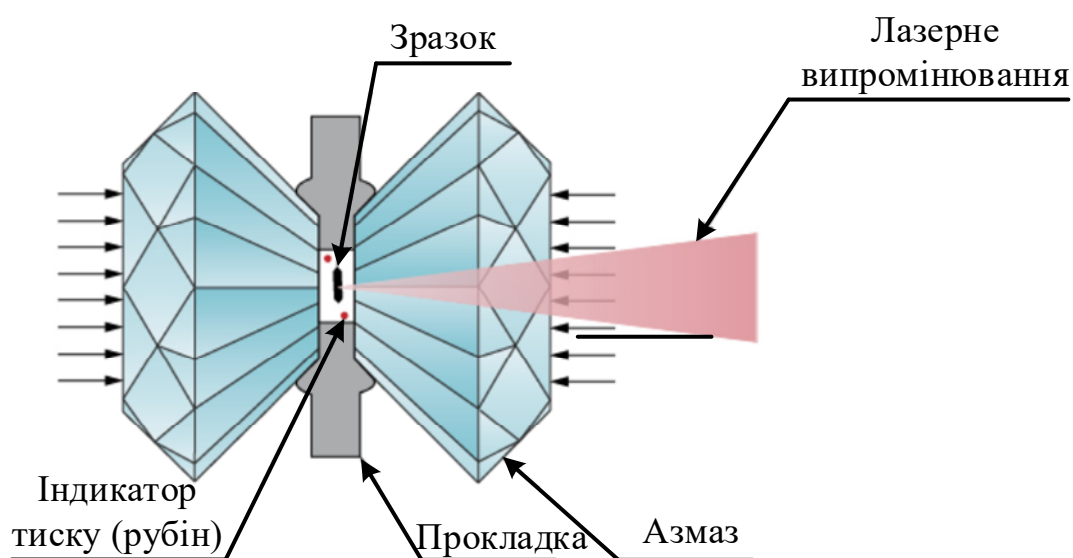


Рисунок 1.1 – Схема стиснення зразка, що досліджується, в комірці високого тиску з алмазними ковадлами

У цих комірках величина тиск збільшується завдяки синхронному та плавному затягуванні мікронних гвинтів. Величини статичної сили, що діє на широку частину алмазного ковадла, утворює велике значення тиску всередині комірки через доволі велике відношення площ основ ковадла. Для зменшення впливу перекосу ковадл, застосовується конструкція поршень-циліндр. Як матеріал ковадлу застосовують у переважній більшості штучні або природні алмази. Ковадла зі штучних алмазах не мають внутрішньої напруженості, а також в них менше дефектів, тому штучні алмази є більш довговічними та надійними. Величину тиску, під час дії якої має місце руйнування алмазних ковадла $P_{\max}$, визначається через величину діаметру вузької основи ковадла d , та може бути розраховано за емпіричною формулою [6]:

$$P_{\max} (\text{ГПа}) = \frac{12,5}{(d(\text{мм}))^2}.$$

Опори виготовляються з твердих матеріалів, таких як карбід вольфраму. Конструктив опор і матеріал, з якого вони виготовляються, визначаються властивостями конкретного експериментального дослідження. Однією з основних вимог щодо утворення значень високого тиску алмазних комірок з циліндричними поршнями є точне прилягання поверхонь зіткнення поршня та циліндра.

Під час експериментальних досліджень застосовується два базових способи, що дозволяють виконувати стиснення речовини:

1. Речовину, що досліджують, стискають безпосередньо між алмазними ковадлами.
2. Зі застосуванням прокладки.

Під час реалізації першого способу здійснюється дослідження тільки твердих речовин. Це спосіб має такий недолік: зразок, що досліджується, має неоднорідне стиснення, а під час його зіткнення з алмазними ковадлом має місце доволі сильний відтік тепла, що не дозволяє здійснювати нагрівання

цього зразка зі застосуванням лазера.

Цю проблему успішно вирішено під час застосування як камери для зразка отвір в тонкій пластині. Це дозволило створити робочий об'єм, що є замкнутим простором, та виконувати дослідження речовин, які мають газоподібну та рідку фази під час дії високого тиску в гідростатичних умовах. Як матеріал для цієї прокладки під час експериментальних досліджень використовується сталь, також можна успішно застосовувати інші метали та сплави, такі як наприклад: W, Nb, Ta, Mo.

Під час дії значення тиску до 25 ГПа та температури не більше 2500 К застосовується в прокладках сталь. Зі збільшення температури понад 2500 К та тиску більше ніж 25 ГПа використовують як матеріал прокладки тугоплавкі речовини з високою межею пластичності та плинності.

Підготовка прокладки виконується в декілька етапів:

1. Здійснюється попереднє пресування металевої фольги від значення товщини від 150 до 500 мкм між ковадлами з алмазу до товщини від 30 до 90 мкм. Обсяг металу, який є надмірним, виходить назовні, під час цього формується кільцевий валик.

2. Підготовка отвору в прокладці. Отвір можна утворювати різними способами, проте різання отвору за допомогою лазера дозволяє отримувати великі значення тисків під час експериментальних досліджень. Основною складністю зазначеного способу є правильне позиціонування оптичного променя лазера, а також отримання рівності країв отвору всередині прокладки. Якщо ці умови виконано, то можна досягти максимальних значень тисків під час експериментальних досліджень.

3. Здійснення очищення прокладки від нагару за допомогою ультразвукової ванни.

Для реалізації умов використовується лазерна установка для отримання отворів у прокладках між алмазними ковадлами, схему якої наведено на рис. 1.2. Схема має мікроскопічні отвори, діаметр яких складає від 20 мкм, а глибина цих отворів становить до 2 мм. Зі схемою постачається програмне

забезпечення, що здійснює контроль різання. Оптичне випромінювання в імпульсному режимі від лазера типу Nd:YAG юстується зі застосуванням дихоричних дзеркал M1, M2, M4. Дзеркало M4 є прозорим в діапазоні довжин хвиль оптичного випромінювання від 500 до 900 нм. Через мікрооб'єктив типу Objx20 оптичне випромінювання від лазера фокусується на прокладки, розміри оптичної плями під час фокусування складають не більше 10 мкм. Оптична схема установки має в своєму складі джерела світла LS1, дзеркала M3, світлоділнийник типу BS 50/50, а також об'єктив Objx20, що дозволяє виконувати підсвічування підкладки. Зображення, що збільшено в $Z=20$ виходить зі застосуванням Objx20 до довгофокусної лінзи L1, фокусна відстань якої дорівнює $F=400$ мм, до кольорової камери, що позначено як Cam. Позиціювання здійснюється під час поєднання зображення центру прокладки з міткою на екрані зі застосуванням моторизованого столика Motorized stage, який виконує переміщення з мікрометричним кроком $d=1,25$ мкм.

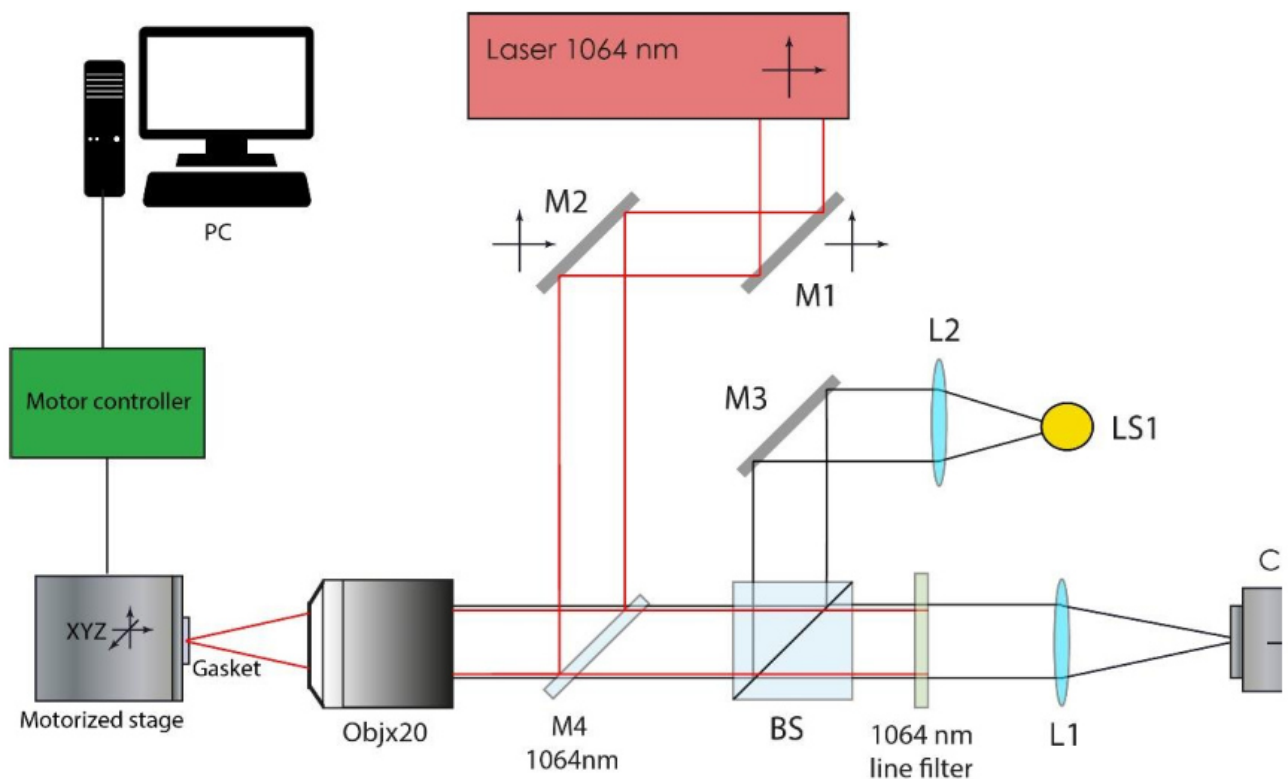


Рисунок 1.2 – Схема лазерної установки для отримання отворів у прокладках між алмазними ковадлами

Керування столиком здійснюється контролером приводів Motor controller через інтерфейс USB та програмним забезпеченням, що входить до комплекту поставки устаткування.

За допомогою програмного забезпечення здійснюється: (1) керування переміщенням столика, що можливо з різною швидкістю; (2) вибір діаметр отвору; а також (3) завантажити більш складних фігур для форми. Величина діаметру отвору в прокладці змінюється від 20 мкм до 150 мкм. На рис. 1.3 наведено зображення отвору, що має діаметр 80 мкм, який зроблено в прокладці зі сталі, та має глибину 40 мкм. Подальше застосування такої прокладки в комірці з алмазними ковадлами дозволить одержати величину тиску приблизно 42 ГПа.

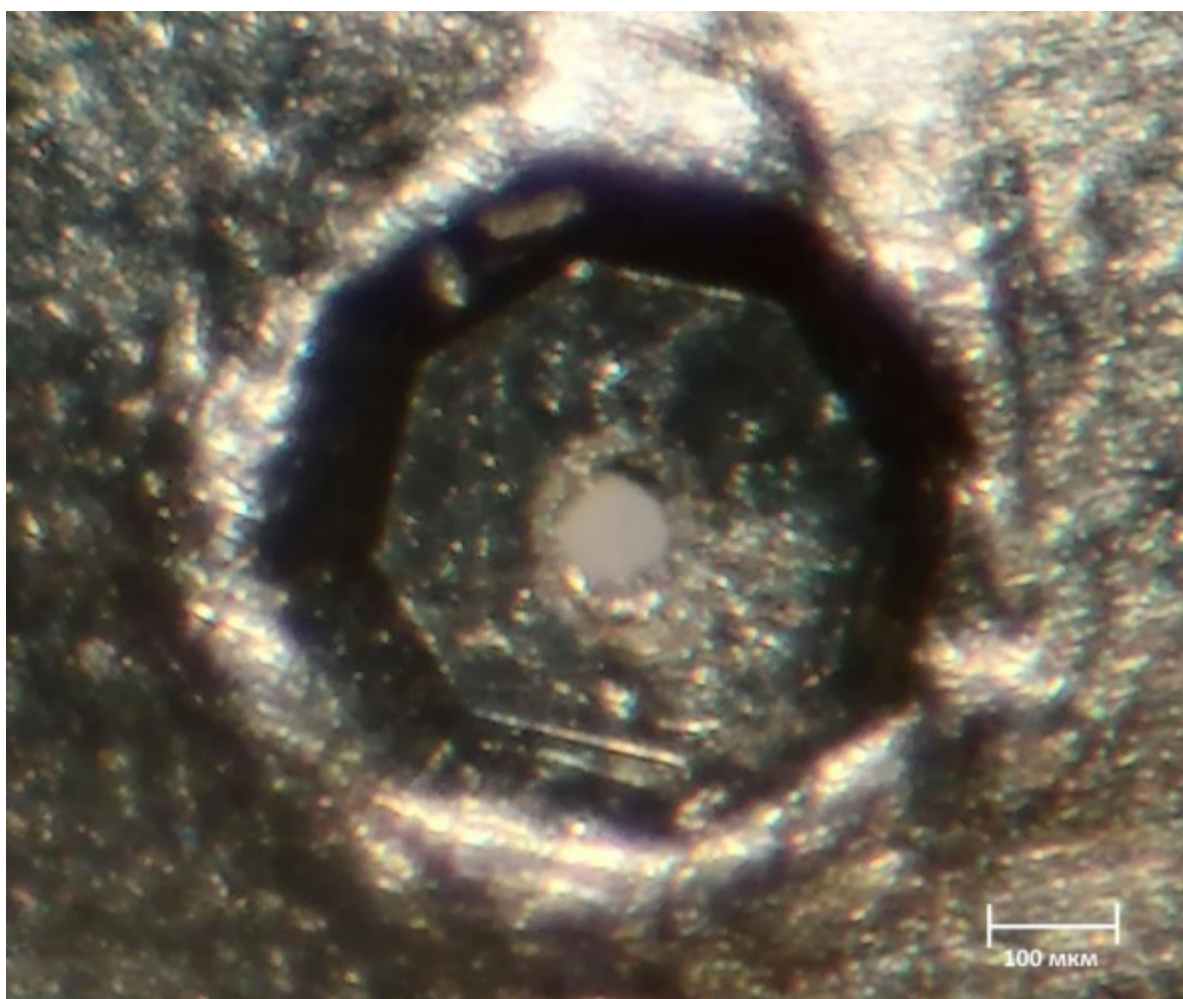


Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд отвору в прокладці перед застосуванням в комірці з алмазними ковадлами

Калібрування тиску до 100 ГПа в комірках з алмазними ковадлами здійснюється зі застосуванням вимірювання зсуву спектрального максимуму флюоресценції рубіна під час дії тиску. Цей спосіб вимірювання тиску базується на тому, що до комірки разом зі зразком, що досліджується, розміщується мікронний кристал рубіну. Під час застосування зазначеного методу необхідно здійснювати вимірювання положення максимуму спектра люмінесценції рубіну. Зсув лінії люмінесценції рубіна має лінійний характер з коефіцієнтом пропорційності $0,036 \text{ \AA/ГПа}$ до величини тиску 300 ГПа. Значення абсолютної похибки вимірювання тиску складає $\pm 0,05 \text{ ГПа}$ [7]. До основного недоліку зазначеного способу є істотне розширення спектральних ліній та зменшення величини інтенсивності зі збільшенням температури. На рис. 1.4 наведене масштабоване зображення у комірці високого тиску з металевою прокладкою в середовищі NaCl зі залізним зразком, що розташовано в центрі, тиск у комірці складає 51 ГПа.

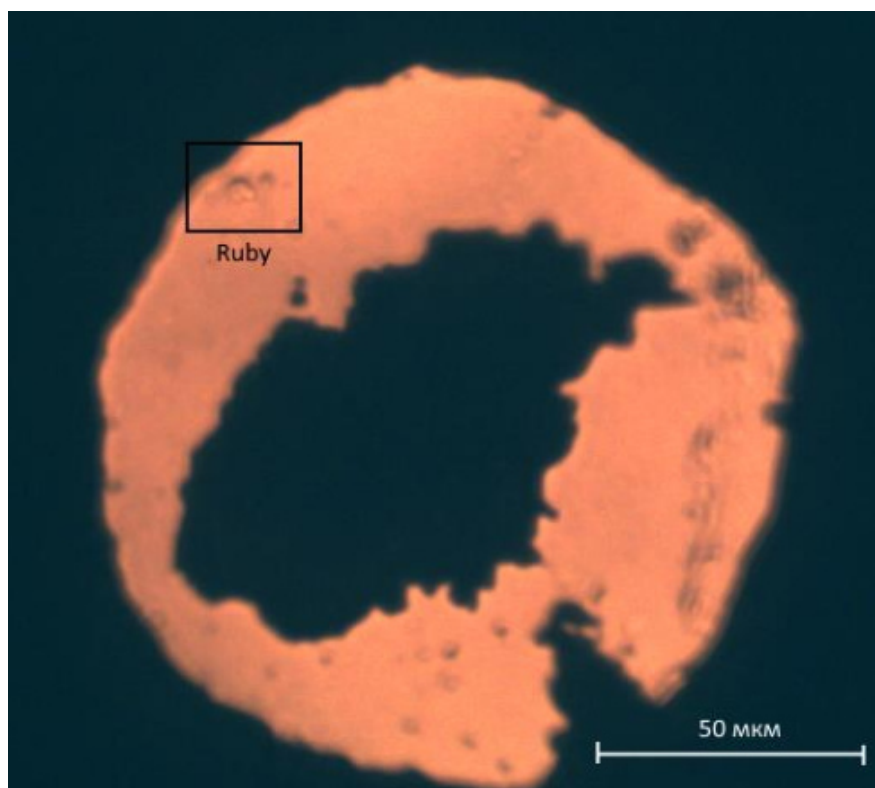


Рисунок 1.4 – Вигляд комірки високого тиску з металевою прокладкою в середовищі NaCl з тиском 51 ГПа

Зсув люмінесцентних ліній під час дії різного зтягування гвинтів комірки високого тиску наведено рис. 1.5. У максимумі інтенсивності спектральних ліній за довжиною хвилі визначено величину тиску в комірці камері: а) 0,0001 ГПа за величиною довжини хвилі 694,2 нм; б) 41 ГПа за довжиною хвилі 708 нм;

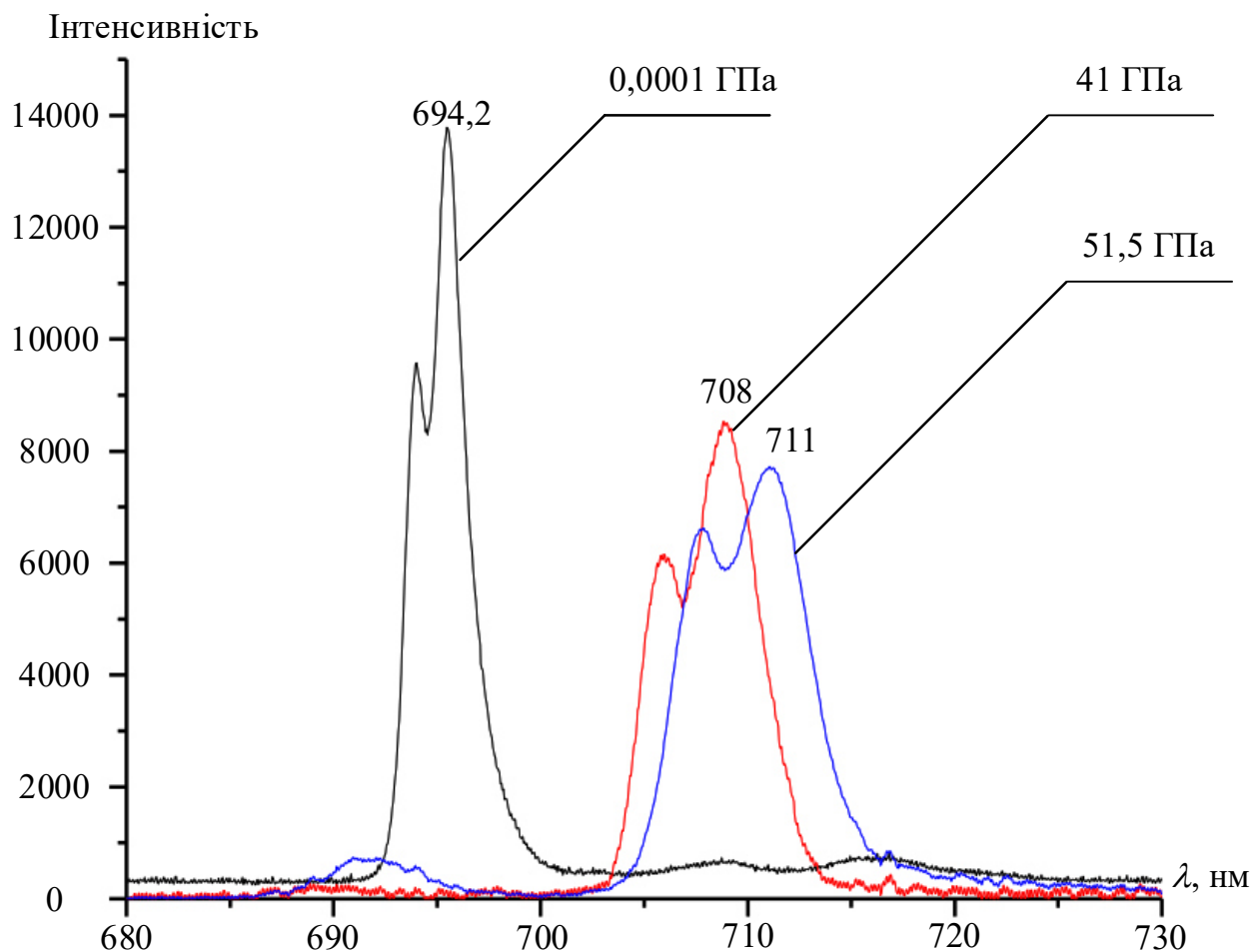


Рисунок 1.5 – Зсув люмінесцентних ліній рубінового стандарту зі збільшенням величини тиску

Для визначення величини тиску також використовується зміна спектральних характеристик під час комбінаційного розсіювання нижньої частини ковадла. Пікові величини в діапазоні комбінаційного розсіювання зсуваються зі збільшенням величини тиску. У порівнянні з інтенсивністю флюоресценції, величина інтенсивності комбінаційного розсіювання

підвищується зі збільшенням температури та має менші межі, що забезпечує визначення величини тиску з кращими показниками точності. Застосування алмазного ковадла дозволяє здійснювати визначення величини тиску безпосередньо в області розташування зразка, що досліджується. Отже, зазначений спосіб можна застосовувати як базовий. До недоліку цього способу можна віднести те, що необхідно використовувати спектрометричне обладнання, що має більшу чутливість та точності результатів вимірювання.

Під час аналізу конструктивних особливостей алмазного ковадла можна зробити висновок, що вони призначено для стиснення за однією віссю. Це стиснення не є гідростатичним тому, що під час дії його на зразок, що досліджується, виникає напруження зсуву. Для зменшення впливу цього фактору необхідно забезпечити отримання гідростатичного стискання. Для цього необхідно заповнити робочу комірку зі зразком рідким середовищем, що може забезпечити стискання. Проте, під час дії досить високого тиску практично всі рідини кристалізуються. Так, під час дії нормальної температури немає такої речовини, що здатна мати рідкий стан під час дії тиску від 15 ГПа. Отже, якщо немає можливості забезпечити гідростатичне стиснення, то утворюють розподіл тиску, який є близьким до гідростатичного, який має назву квазігідростатичний. Деякі з'єднання, які мають низьку міцністю щодо зсуву можна застосовувати як квазігідростатичне середовище для стиснення (AgCl, KCl, NaCl, KBr.). У зазначених з'єднаннях зсувні напруження повністю релаксуються під час дії температури більше ніж 500°C. Через високу хімічну активність цих з'єднань до деяких типів речовин застосовуються Al₂O₃ та MgO. Зазначені з'єднання мають менший показник прозорості в оптичному спектральному діапазоні, це призводить до утворення негідростатичних умов для релаксації яких потрібно здійснювати нагрівання до величини температури більше ніж 1000°C.

До переваг застосування газів як стискаючих середовищ можна віднести великий діапазон тисків, в яких зберігаються квазігідростатичні умови. Як газове середовище для передачі тиску застосовують азот, водень, а також такі

інертні гази як неон та гелій. Зазначені гази у комірці високого тиску під час переважної більшості експериментальних досліджень, перебувають у твердому кристалічному стані: 2,4 ГПа (азот), 5,7 ГПа (водень), 1,2 ГПа (аргон), 4,7 ГПа (неон) та 11,8 ГПа (гелій) [8]. До недоліків застосування газів відносять необхідність використання спеціального обладнання для роботи комірок високого тиску. Також деякі легкі гази, а саме водень та гелій, дифундують до зразків, що досліджуються, а також до алмазів ковадла, це є причиною збільшення швидкості руйнування.

Нагрівання речовини, що стиснена, зазвичай здійснюється електричними печами для не високих температур. Для отримання робочої температури до $(500 - 600)^{\circ}\text{C}$ можна розмістити повністю у печі камеру високого тиску. Зі збільшення значення температури міцність матеріалів, з яких складається камера, істотно зменшується, та необхідно обмежити зону нагрівання лише зразком, що досліджується. Отже необхідно застосовувати в робочому об'ємі комірки між алмазними ковадлами дротів, які виготовлено з провідних матеріалів. Ці дроти ізолюють від прокладки для зменшення паразитного впливу зразок, що досліджується. Зазначені умови істотно ускладнюють конструкцію комірки та процес закладки. Найпростішим та ефективним варіантом є випадок, коли об'єкт досліджень використовується як нагрівач. Під час реалізації іншого варіанту оптичне випромінювання інфрачервоного діапазону від лазера фокусується на поверхні зразка як пляма, що має діаметр декілька десятків мікрометрів. Під час цього прозоре в інфрачервоному діапазоні спектра алмазне ковадло не нагрівається від дії оптичного випромінювання від лазера. Однією з головних вимог є забезпечення здатності поглинання оптичного випромінювання, яке має довжину хвилі генерації лазера. Якщо ні, то в комірці розташовують поглиначі: TiC, B, Pt. Комірки з алмазними ковадлами використовують під час проведення різних видів дослідження фазових перетворень BC_x [9]. Оптичне зображення фази BC_3 під час дії тиску 50 ГПа та температури 2000 К наведено на рис. 1.6.

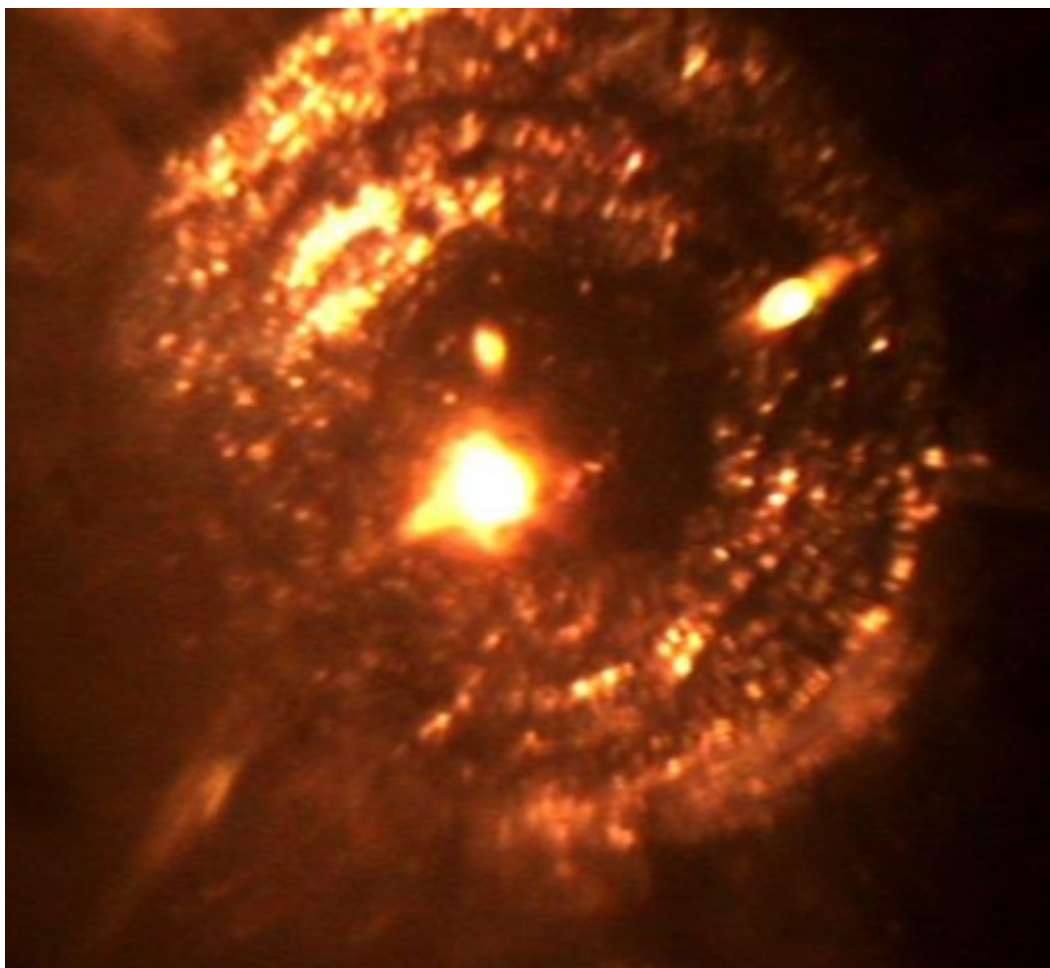


Рисунок 1.6 – Оптичне зображення фази VC_3 під час дії тиску 50 ГПа та температури 2000 К

Для вірної інтерпретації вимірювальних експериментальних даних необхідно здійснювати вимірювальний контроль температури з високою точністю на різних етапах експериментальних досліджень. Виконаємо аналіз основних методів і підходів щодо здійснення дистанційного вимірювального контролю температури, що використовуються у теперішній час.

1.2 Підходи щодо моніторингу температури в комірках високого тиску

У теперішній час єдиним з можливих методів вимірювального контролю високих значень температури більші ніж 1500 К в комірках алмазних ковадл є безконтактні методи вимірювання. Найбільшого використання отримали

пірометричні методи тому, що вони мають високу швидкодію. Виконаємо аналіз найрозповсюджених трьох методів точкової пірометрії [10]:

1.2.1 Яскрава пірометрія

Метод базується на порівняльному аналізі інтенсивності оптичного випромінювання від об'єкта дослідження на обраному значенні довжини хвилі з величиною інтенсивністю абсолютно чорного тіла на тій самій довжині хвилі. Якщо припустити, що об'єкт дослідження можна вважати сірим тілом, яке має здатність до випромінювання $\varepsilon(\lambda, T)$, то залежність спектральної щільності оптичного випромінювання від теплового джерела можна описати як добуток випромінювальної здатності сірого тіла на розподіл Планка:

$$I(\lambda, T_i) = \varepsilon \cdot c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)^{-1},$$

де λ – довжина хвилі оптичного випромінювання в мікрометрах;

$$c_1 = 37418 \frac{\text{Вт} \cdot \text{мкм}^4}{\text{см}^2};$$

$$c_2 = 14388 \text{ мкм} \cdot \text{град.}$$

Під час практичного застосування використовується пірометр, який має ниткою, що зникає. Принцип роботи цього пірометра базується на порівнянні ступеня яскравості нитки, що нагрівається, лампи пірометра з величиною зображення об'єкта дослідження. Рівність яскравості визначається за монохроматичним світлофільтром, під час зникнення нитки пірометра на фоні нагрітого тіла. Падіння напруги на нитці пірометричної лампи змінюється за допомогою струму, а величина температура нитки визначається зі застосуванням градуювальної таблиці або графіка.

Якщо значення температури нитки є доволі високою, то ослаблення потоку оптичного випромінювання здійснюється за допомогою нейтрального світлофільтру [11]. Під час цього аналітичний зв'язок між яскравою температурою T_{br} та її реальним значенням T розраховується за такою залежністю:

$$\frac{1}{T_c} = \frac{1}{T} - \frac{\lambda_0}{C_2} \cdot \ln[\varepsilon(\lambda_0, T)],$$

де $\varepsilon(\lambda_0, T)$ – здатність до випромінювання під час заданої довжини хвилі та температурі.

λ – довжина хвилі оптичного випромінювання в мікрометрах;

$C_2 = 14388$ мкм · град;

До недоліків яскравої пірометрії можна віднести те, якщо має місце невідомі данні щодо здатності випромінювання, то визначити величину абсолютної температури об'єкта досліджень є неможливим. Нижня межа діапазону вимірювання визначається як інтенсивністю зовнішнього підсвічування, так і чутливістю фотоприймача, а верхня межа діапазону обмежена базою еталона, а його значення складає 2000 К.

1.2.2 Пірометрія спектрального відношення

Зазначений метод базується два відношенні спектральної інтенсивності теплового оптичного випромінювання від об'єкта дослідження $b(\lambda_1, T)$ та $b(\lambda_2, T)$ на довжинах хвиль λ_1 та λ_2 . Застосування цього підходу дозволяє зменшити вплив здатності до випромінювання ε_1 та ε_2 на результати вимірювального контролю теплового стану нагрітих тіл:

$$\frac{b(\lambda_1, T)}{b(\lambda_2, T)} = \frac{r(\lambda_1, T)}{r(\lambda_2, T)}.$$

Зв'язок між яскравою температурою T_c з її реальним значенням T визначається зі застосуванням такої аналітичної залежності:

$$\frac{1}{T_c} = \frac{1}{T} - \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{C_2} \cdot \ln \left(\frac{\frac{\varepsilon_1}{\lambda_1 - \lambda_2}}{\frac{\varepsilon_2}{\lambda_1 - \lambda_2}} \right).$$

Для об'єкта дослідження, що має невідомі значення оптичних властивостей, а також з невідомою температурою, вимірювання величин інтенсивності на 5 довжинах хвиль з наявними статистичними флуктуаціями не зможе однозначно розв'язати задачу визначення величини температури [10].

1.2.3 Спектральна пірометрія

Спектральна пірометрія базується на вимірюванні величини інтенсивності оптичного випромінювання від нагрітого об'єкта дослідження, що здійснюється в доволі широкому діапазоні довжин хвиль. Під час порівняння визначених спектрів оптичного випромінювання від нагрітих об'єктів, що мають Планківський спектр оптичного випромінювання та сірого тіла, можна зробити висновок щодо подібності цих спектрів.

Під час реалізації зазначеного методу вводять такі допущення, що оптичне випромінювання є рівноважним, а спектр його випромінювання з достатнім ступенем точністю відповідає спектру від нагрітого сірого тіла. Шукане значення температури об'єкта дослідження визначається один з параметрів спектральної щільності інтенсивності Планківського розподілу

оптичного випромінювання, а інформація щодо здатності випромінювання об'єкта дослідження не потрібна. Під час визначення температури за допомогою цього методу має місце зворотне завданням з достатньо великою кількістю рішень. Якщо здійснювати вимірювання на вузькому діапазоні довжин хвиль, то можна вважати, що $\varepsilon(\lambda_i)$ незначно змінюється та під час розв'язання рівняння вимірювання можна отримати одне рішення.

Для значень температури менше ніж 4000 К можна застосовувати приближення Вина,

$$e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} \gg 1,$$

тоді рівняння вимірювання можна записати таким чином:

$$\ln(\varepsilon) - \frac{c_2}{\lambda \cdot T} = \ln\left(\frac{\lambda^5 \cdot I}{c_1}\right).$$

Для сірого тіла є рівнянням прямої в таких координатах:

$$(x, y),$$

де $x = \ln(\lambda^5 \cdot I)$ та $y = \frac{C_2}{\lambda}$ – координати Вина.

Кут нахилу цієї прямої визначається вимірювальним значенням температури. Отже, якщо побудувати отриманий спектр у координатах Вина, то можна знайти значення температури, якщо цю залежність можна описати рівнянням прямої [10]. Недоліком зазначеного методу є обмеження максимального значення вимірювальної температури, що складає 4000 К, у діапазоні довжин хвиль від 620 до 780 нм з нелінійним внеском зміни величини інтенсивності до результату вимірювання температури.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ МОНІТОРИНГУ ТЕМПЕРАТУРИ В КОМІРКАХ ВИСОКОГО ТИСКУ

Структурну схему електронного пристрою моніторингу температури в комірках високого тиску наведено на рис. 2.1, що складається з трьох блоків: ЛН; визначення розподілення температури; вимірювання спектральних характеристики комірки. Теплове оптичне випромінювання від дослідного зразка збирається об'єктивом типу OBJx20, що застосовується в блоці лазерного нагрівання. Це випромінювання передається до акусто-оптичного монохроматора (TAOF). Під час акусто-оптичної (АО) взаємодії оптичне випромінювання трансформується до лінійно поляризованого, що виділяється вхідним поляризатором ТАОФ, на ортогональну складову, це випромінювання проходить через вихідний поляризатор. Випромінювання, що пройшло монохроматор (ТАОФ), фокусується за допомогою лінз (L1) до чутливої матриці відеокамери (Cam). Зі зміною значення частоти f акустичної хвилі, що збуджується п'єзoeлектрично в ТАОФ за керуючими впливами від персонального комп'ютера, змінюється період дифракційної ґрати та отримується зображення об'єкта дослідження на довжині хвилі у діапазоні від 650 до 1000 нм з високою спектральною (1,5 нм) роздільною здатністю, а також досить просторовою (500×500 елементів) роздільною здатністю. Синхронізація детектування випромінювання за допомогою фотоприймача зі зміною ТАОФ комірки за довжиною хвилі дозволяє отримувати з високою швидкістю набір спектральних зображень об'єкта в діапазоні довжин хвиль випромінювання від $\lambda_{\min}$ до $\lambda_{\max}$ з кроком $\Delta\lambda$. Віддзеркалене оптичне випромінювання від лазера, що має високу інтенсивність обмежується вузькосмуговим фільтром (F1). Оптичні гілки, які мають функцію підсвічуванням під час виконання експериментальних досліджень обмежуються зі застосуванням зсуву світлоділників (Bs1, Bs2), що необхідно для підвищення величини інтенсивності оптичного сигналу та зменшення впливу паразитного засвічування.

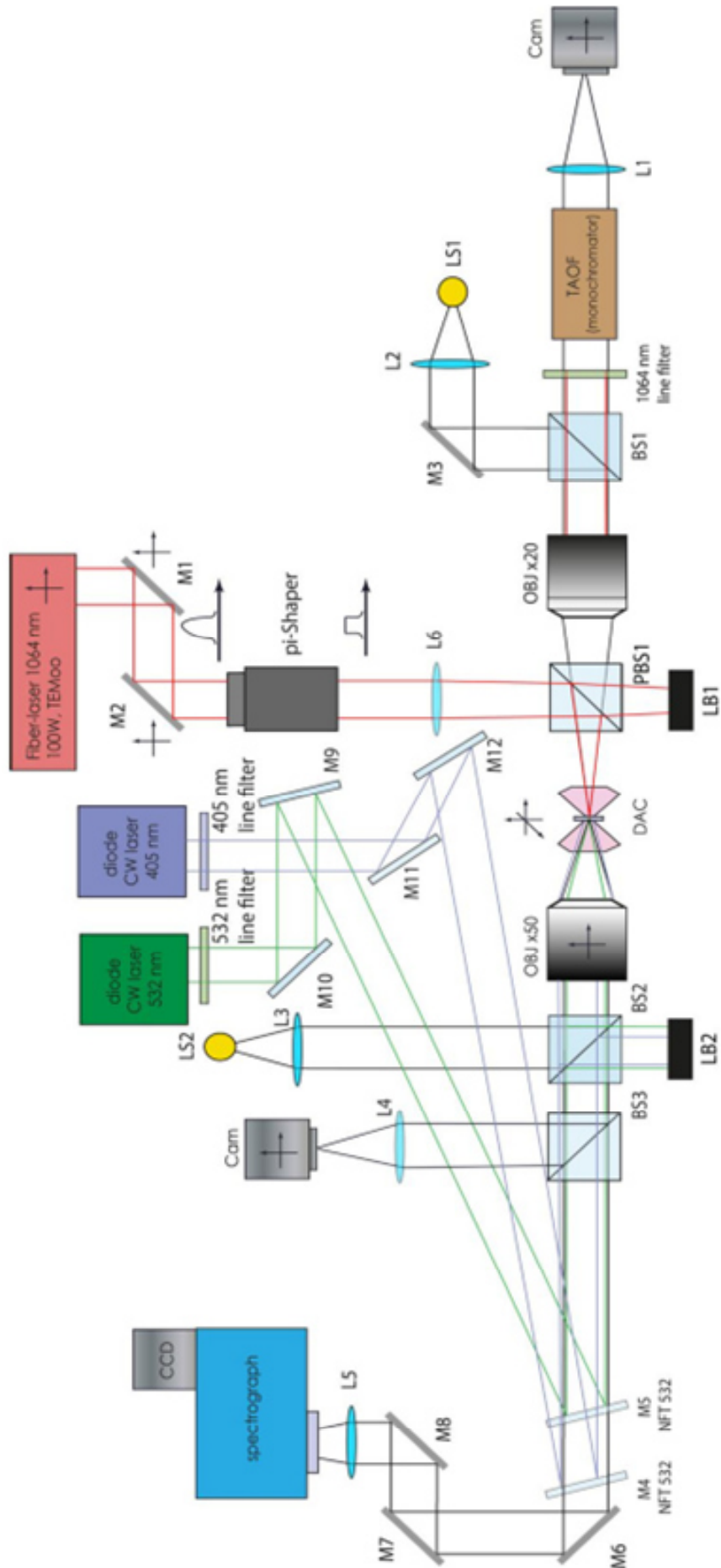


Рисунок 2.1 – Структурна схема електронного пристрою моніторингу температури в комірках високого тиску

2.1 Розробка методика калібрування оптичної частини електронного пристрою

Лампа розжарювання, яка має вольфрамову стрічку, застосується як відоме джерело оптичного випромінювання $I_{\text{standart}}(\lambda)$. Процедура градуювання базується на порівнянні оптичного випромінювання від нагрітого тіла з випромінюванням еталонної калібрувальної лампи, яка має еталонну температуру 1723 К. Лабораторне джерело живлення застосовується для забезпечення точного відтворення амплітуди струму лампи, що забезпечує стабілізоване та постійне оптичне випромінювання. Лампа розташовується в тому положенні, де необхідно розмістити зразком дослідження. Тому інтенсивність оптичного випромінювання $I_{\text{optics}}(\lambda)$ від лампи проходить однаковий оптичний шлях, що й випромінювання від об'єкта дослідження. Фотоприймач оптичного випромінювання визначає значення випромінювання $I_{\text{measured}}(\lambda)$, що пройшло через оптичну схему оптико-електронного пристрою.

Для розрахунку залежності оптичного випромінювання від нагрітого зразка з поправкою $I_{\text{corrected}}(\lambda)$ застосовується таке співвідношення:

$$I_{\text{corrected}}(\lambda) = \frac{I_{\text{measured}}(\lambda) \cdot I_{\text{standart}}(\lambda)}{I_{\text{optics}}(\lambda)}.$$

У блоці формування зображень ТАOF отримується зображення, яке фотографується камерою. Це зображення є розподілом величини інтенсивності на конкретній довжині хвилі (λ). Зображення на довжині хвилі оптичного випромінювання 698 нм під час лазерного нагрівання вольфраму в вакуумі, наведено на рис. 2.2. Кількість отриманих зображень $I_{\text{measured}}(x, y, \lambda_j)$ ТАOF складає $N = 75$ з кроком 2 нм у діапазоні довжин хвиль від 610 до 760 нм. Час витримки кожного зображення складає 83 мкс.

Виміряне значення інтенсивності на кожному з пікселів (x,y) спектроскопічного зображення TAOTF є пропорційна величина інтенсивності оптичного випромінювання, що випромінюється кожною ділянкою поверхні нагрітого об'єкта дослідження на заданій довжині хвилі (λ) [12]. Під час обробки отриманих зображень визначається величина термодинамічної температури.

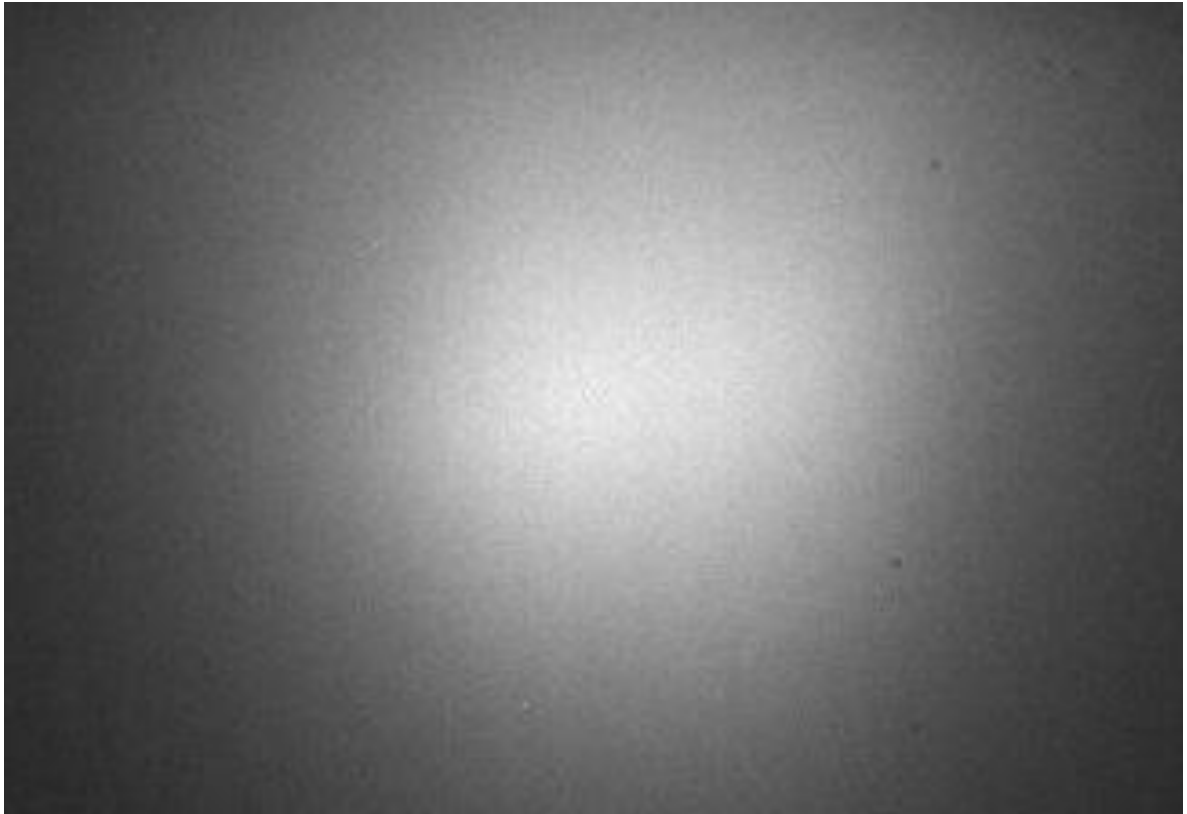


Рисунок 2.2 – Зображення поверхні пластини вольфраму в вакуумі на довжині хвилі випромінювання 635 нм

Масив $I_{\text{measured}}(x_i, y_j, \lambda_k)$ застосовується для визначення $I_{\text{corrected}}(\lambda_k)$ у діапазоні довжин хвиль від 610 до 760 нм на кожному пікселі (x_i, y_j) . На рис. 2.3 наведено спектр $I_{\text{measured}}(x_m, y_m, \lambda_k)$ у точці (x_m, y_m) , що знаходиться поблизу максимального значення температури, масив $I_{\text{corrected}}(x_m, y_m, \lambda_k)$ також наведено на рис. 2.3.

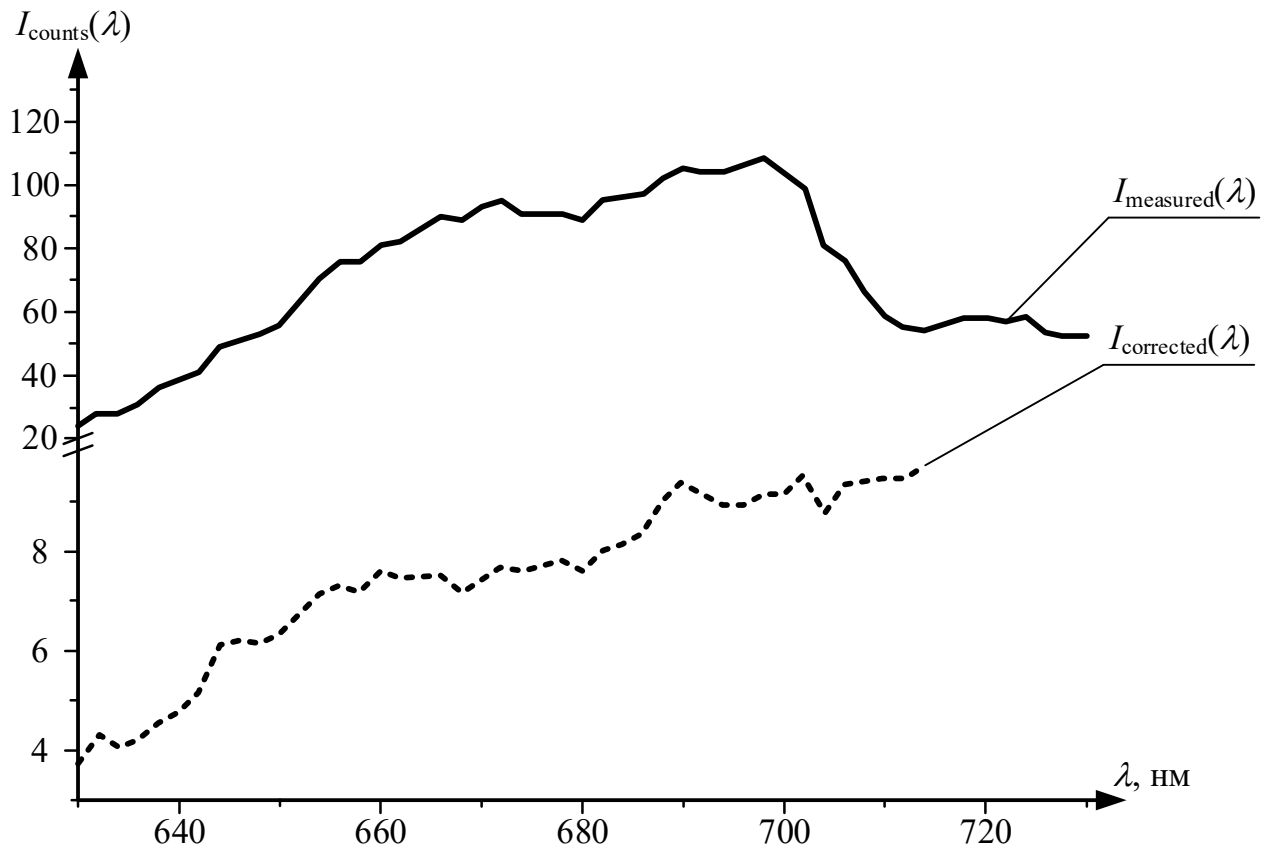


Рисунок 2.3 – Спектральні характеристики з поправкою $I_{\text{corrected}}(\lambda)$ та вимірюване значення $I_{\text{measured}}(\lambda)$ від зміни довжини хвилі випромінювання

Метод вимірювання температури нагрітого зразка за експериментально скоригованими значеннями інтенсивності $I_{\text{corrected}}(\lambda_k)$ базується на застосуванні підгонки методом найменших квадратів або визначення таких значень температури та здатності випромінювати, під час дії яких функція має мінімальне значення:

$$S(\varepsilon, T) = \sum_{i=1}^n \left(I_{\text{corrected}}(\lambda_k) - \varepsilon \cdot g(\lambda_i, T) \right)^2,$$

$$\text{де } g(\lambda, T) = \frac{r(\lambda, T)}{\varepsilon} = c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left[e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right]^{-1}.$$

Для вимірювальних значень температури менше 4000 К зі застосуванням наближення Вина використовується $TO(x_i, y_j)$ для кожного пікселя (x_i, y_j) . Лінійну апроксимацію одержаної залежності наведено на рис. 2.4. Під час аналізу отриманих результатів $I_{corrected}(x_m, y_m, \lambda_k)$ встановлено, що наближена функція Вина має доволі точні результати в центрі нагрітої ділянки, де значення температури досліджуваного зразка більше 1800 К, у цих межах вимірювальне значення температури складає максимальне величину відношення сигнал/шум.

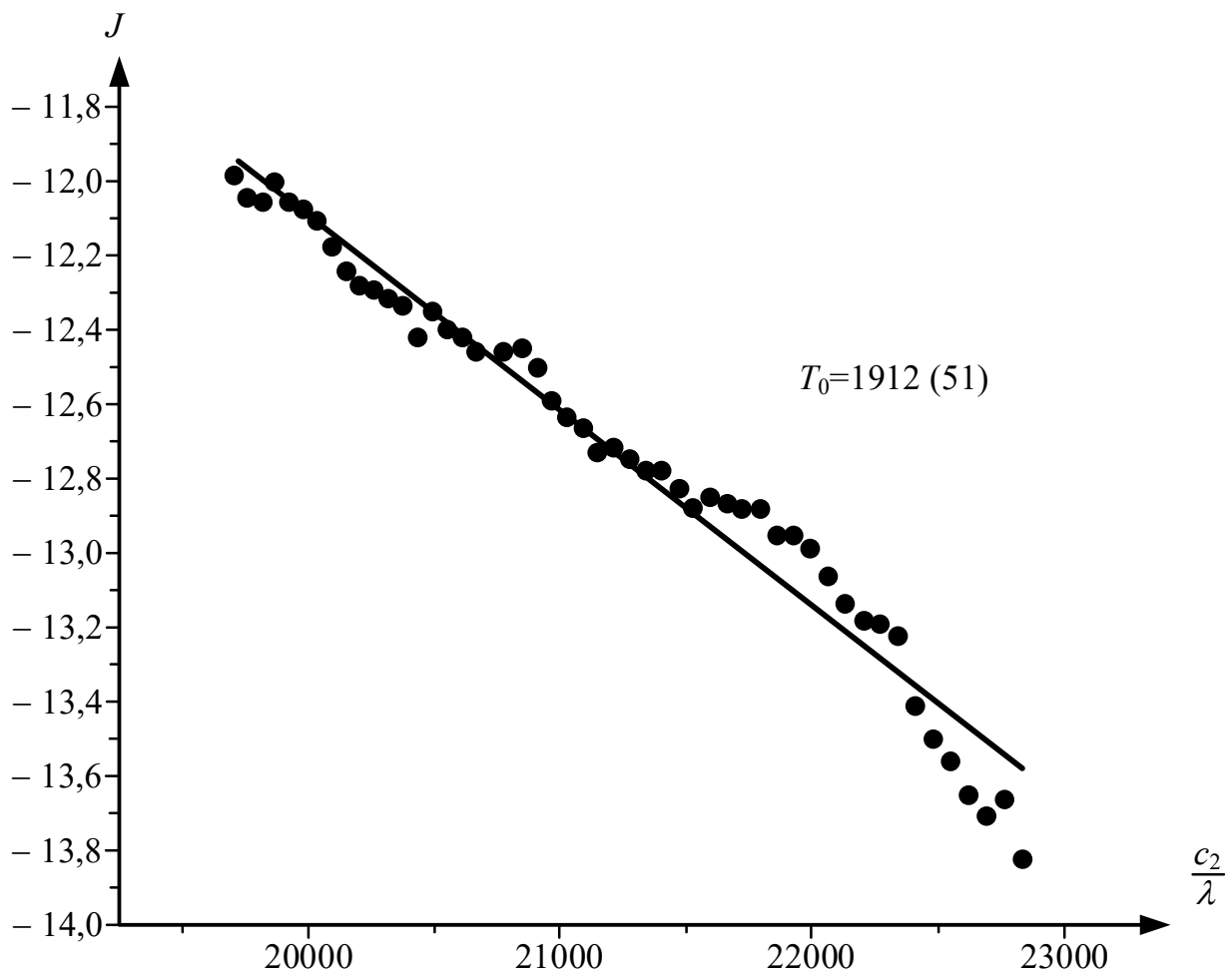


Рисунок 2.4 – Лінійна апроксимацію закону Вина

На ділянці поза межами нагрітої плями має місце високе значення шуму в порівнянні з сигналом, що призводить до виникнення доволі високого значення похибки вимірювання температури тому, що нахил лінії (див. рис. 2.4) є чутливими до наявності статистичних похибок в результатах вимірювання.

2.2 Розрахунок статичної характеристики перетворення вимірювального каналу температури комірок високого тиску

Для зменшення величини статистичної похибки результату вимірювання температури використовується метод найменших квадратів. Цей метод базується на тому, що здатність до випромінювання має лінійний характер. Якщо функція $S(T, \lambda)$ має мінімум під час дії ε_0 та T_0 повинні виконуватися такі рівності:

1. $\frac{\partial S}{\partial \varepsilon} = 0;$
2. $\frac{\partial S}{\partial T} = 0.$

З першого рівняння визначено:

$$\varepsilon_0 = \frac{\sum_{i=1}^N [I(\lambda_i) \cdot g(\lambda_i, T)]}{\sum_{i=1}^N g^2(\lambda_i, T)}.$$

Друге рівняння можна записати у такому вигляді

$$\frac{\partial S}{\partial T} = \frac{2 \cdot c_2 \cdot \varepsilon_0}{c_1 \cdot T^2} \sum_{i=1}^N \left[\lambda_i^4 \cdot g^2(\lambda_i, T) \cdot e^{\frac{c_2}{\lambda_i \cdot T}} \cdot (\varepsilon_0 - I(\lambda_i) \cdot g(\lambda_i, T)) \right].$$

Воно має таке коріння, якщо функція мінімальне:

$$S_T = \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{\lambda_i} \cdot \left[\frac{I(\lambda_i) \cdot g(\lambda_i, T)}{\varepsilon_0} - 1 \right] \right)^2.$$

Отже, у відповідність з наведеної вище методикою 2D нелінійна апроксимація методом найменших квадратів зводиться до 1D апроксимації. На рис. 2.5 наведено поведінку функції $S(T)$ у точці (x_m, y_m) від зміни температури T . Функція $S(T)$ має явно визначений мінімум у $T_{1D} = 2033$ К, де T_{1D} – значення температури, яку отримано зі застосуванням 1D мінімізації. Для визначення довірчого інтервалу, в якому знаходиться визначене значення температури T_{1D} , застосовується стандартна методика для нелінійної регресії [13]. Для реалізації зазначеної методики необхідно побудувати S від зміни температури в околиці точки T_{1D} : $S(T_{1D})$. Межі довірчого інтервалу можна визначити як:

$$S(T) = \text{const},$$

де постійна розраховується за таким співвідношенням:

$$S(T) = S(T_0) \cdot \left[1 + \frac{p}{(n-p) \cdot F(n, p, \alpha)} \right],$$

де $F(n, p, \alpha)$ – параметр Фішера;

n – кількість експериментів;

p – число параметрів;

α – конфіденційна ймовірність.

За наведеними співвідношеннями розраховано значення ± 105 К для довірчого інтервалу з рівнем достовірності 0,95. Межі довірчого інтервалу для методом Вина може розрахувати зі застосуванням стандартного відхилення (51 К) та значення коефіцієнта Стюдента 1,99 для 75 вимірювань:

$$51 \cdot \frac{1,99}{\sqrt{75}} = 14 \text{ К},$$

що є на порядок менше, ніж під час 1D мінімізації.

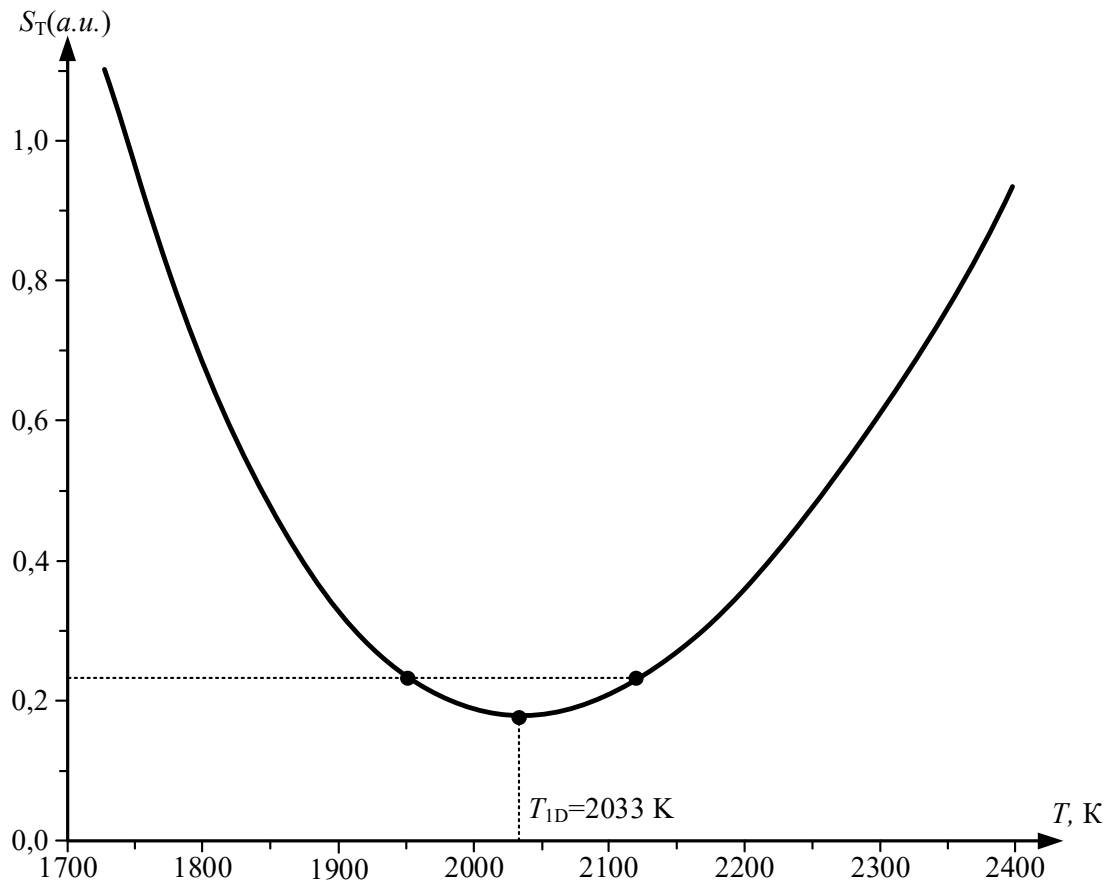


Рисунок 2.5 – Залежність S від зміни в температури, $T_{ID} = (2033 \pm 49)$ K

На рис. 2.6 наведено результат виконання одновимірної апроксимації, який визначено за набором спектральних зображень, які одержано під час фотографування платини вольфраму. Результат розрахунку значення температури T_D нагрітої поверхні є істотно нерівномірним. Максимальне значення температури дорівнює 2100 K, а мінімальне складає 1650 K.

Для порівняння результатів вимірювання температури пірометричним методом з результатами вимірювання опору. Для цього необхідно виконувати вимірювання сили електричного струму, який необхідний для нагрівання лампи, отже, значення температури лампи можна визначити за результатами вимірювання питомого опору R . Позначимо T_R – результат вимірювання температури за допомогою цього методу. Величина питомого опору лампи буде підвищуватися зі збільшення значення температури:

$$R(T_R) = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T_R),$$

де R_0 – питомий опір під час дії 273 K;

α – коефіцієнт теплового питомого опору вольфраму, який визначений за допомогою таблиць фізичних констант).

Значення температури визначається через величину питомого опору за таким співвідношенням:

$$T_R = \frac{R - R_0}{\alpha \cdot R_0}.$$

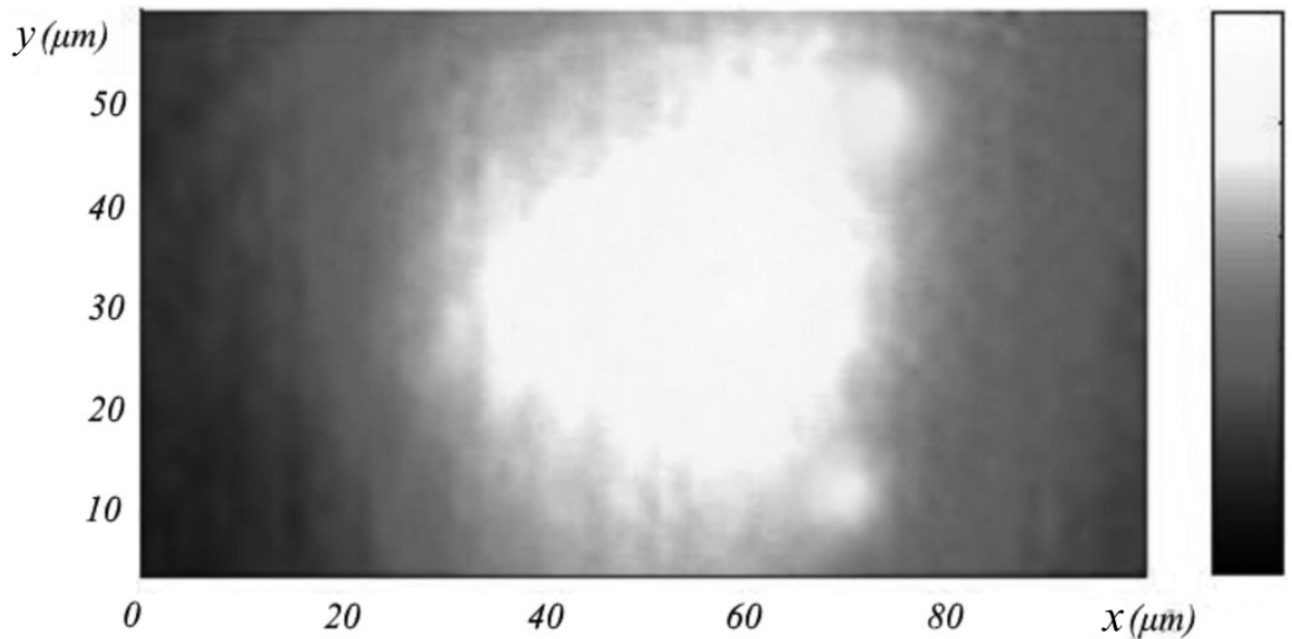


Рисунок 2.6 – Двовимірна картина розподілу температури T_D за поверхнею пластини з вольфраму, що нагрівається лазером

Величини питомого опору R_0 та R можна визначити під час вимірювання падіння напруги U та струму нагрітої лампи у нормальних умовах за температурою та під час нагрівання: $R = U/I$.

На рис. 2.7 наведено зміни T_W , T_{1D} , та T_R від величини електричного струму.

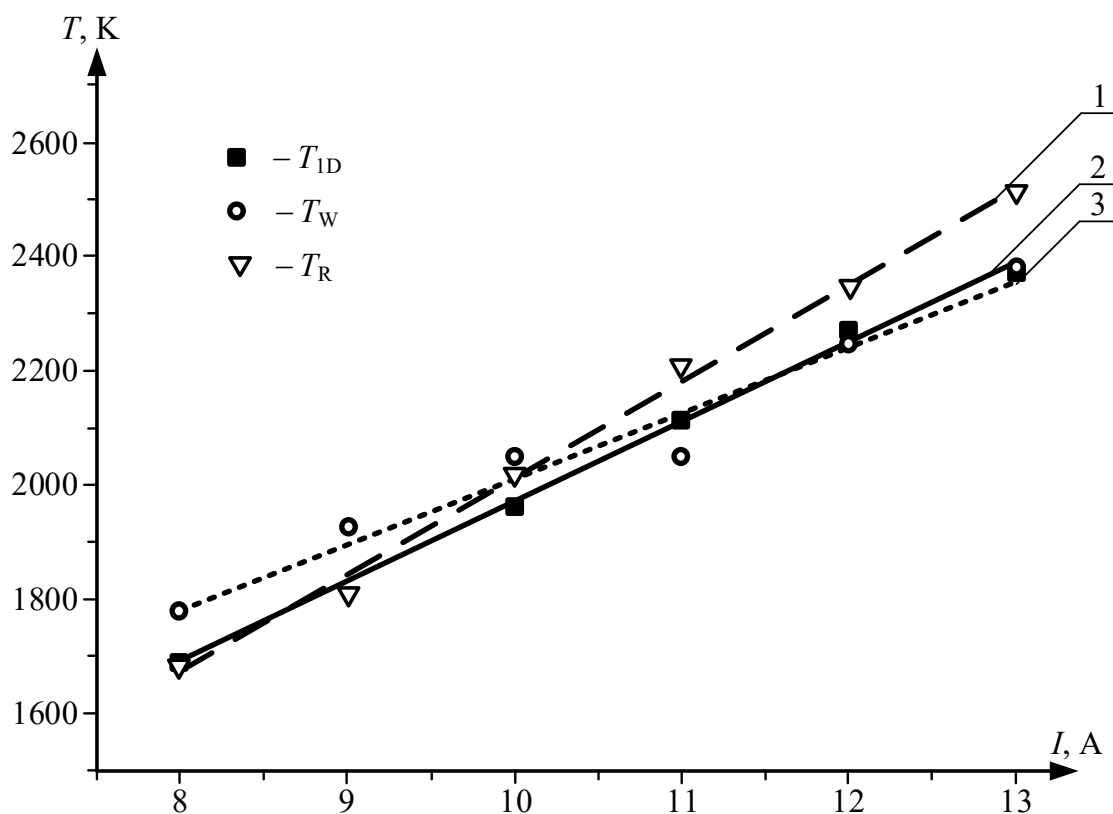


Рисунок 2.7 – Зміни T_W , T_{ID} , та T_R від величини електричного струму

З аналізу отриманої залежності, що наведено на рис. 2.7, можна зробити висновок, що T_W більше ніж T_{ID} під час дії малих значень струмів та низьких температур. Зі збільшенням температури залежності T_{ID} та T_W наближуються одна до одної. T_R співпадає з T_{ID} під час дії меншої температури та підвищується під час дії високих температур.

3 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ НАГРІВАННЯ КОМІРОК ВИСОКОГО ТИСКУ

Оптичне випромінювання від лазера під час взаємодії з поверхнею середовища частково віддзеркалюється. Частина цього випромінювання проникає до матеріалу та поглинається, що супроводжується виділенням тепла. Зміна величини щільності цього оптичного випромінювання описується законом Бугера [14]:

$$q(z) = A \cdot q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot z},$$

де A – поглинальна здатність матеріалу;

q_0 – оптичний потік, що падає до поверхні матеріалу;

z – координата, що відраховується від поверхні до матеріалу;

α – лінійний коефіцієнт поглинання.

Цю формулу, що описує лінійне поглинання оптичного випромінювання, можна застосовувати для діелектриків, металів і металізованих напівпровідників у доволі широкому діапазоні довжин хвиль. Значення величин, які входять до цієї формули, можуть істотно відрізнятися для матеріалів різних типів. Кванти оптичного випромінювання в металах поглинаються електронами, що здійснюють розсіювання енергії до теплового коливання грати. Цей процес має місце в шарі товщиною від 10^{-8} до 10^{-7} м, що є глибиною проникнення до металу оптичного випромінювання. Переважна більшість металів у діапазоні від ближньої ультрафіолетової до далекої інфрачервоної області мають високу величину віддзеркалення оптичного випромінювання та велике значення коефіцієнта поглинання від 10^5 до 10^6 см $^{-1}$.

У напівпровідникових матеріалах, що мають під час дії нормальної температури незначну кількість вільних електронів, поглинання оптичного випромінювання визначається пов'язаними носіями заряду. У цьому полягає їх

особлива відмінність від металів. Напівпровідникові матеріали істотно поглинають оптичне випромінювання. Значення лінійного коефіцієнту може сягати величини до $(10^3 - 10^4) \text{ см}^{-1}$. Також дія оптичного випромінювання від лазера у напівпровідникових матеріалах може викликати внутрішній фотоефект.

Кількість вільних носіїв заряду збільшується з часом. Проте в межі збільшення зарядів обмежено процесами дифузії та рекомбінації дірок і електронів від області збудження через градієнт концентрації носіїв заряду. Якщо концентрація електронів досягає такої межі, що вони здійснюють поглинання доволі значної частини оптичного потоку. Коли має місце металізація напівпровідникового матеріалу, то розпочинається інтенсивне розсіювання теплової енергії в ґраті напівпровідникового матеріалу. Значення вихідного коефіцієнту віддзеркалення у напівпровідникових матеріалів є меншим у порівнянні з металами. Механізми поглинання між зонами, а також внутрішні зонні є складовою механізмів поглинання оптичного випромінювання в неметалічних непрозорих матеріалах. Також велику роль має домішкове поглинання та поглинання на включеннях і дефектах, що може призвести до власного поглинання у матеріалах під час нагрівання.

Розроблена схема LH DAC базується на схемі [15]. Нагрівання зразка, що досліджується, здійснюється променем сфокусованого оптичного випромінюванням, довжина хвилі якого складає 1070 нм від безперервного волоконного YAG:Nd інфрачервоного лазера типу ЛК-100-ОМ (див. рис. 3.1). Оптичне випромінювання від лазера виходить від коліматора та подається до двох срібних дзеркал (M1 та M2), які здійснюють введення цього випромінювання до Pi-Shaper. Оптичний промінь від лазерний під час нагрівання здійснює генерацію у зразку, що досліджується, сильного градієнту температури. Для одержання постійного розподілу площі зразка з величиною діаметру в 100 мкм використовується спеціальна оптика (Pi-Shaper) [3].

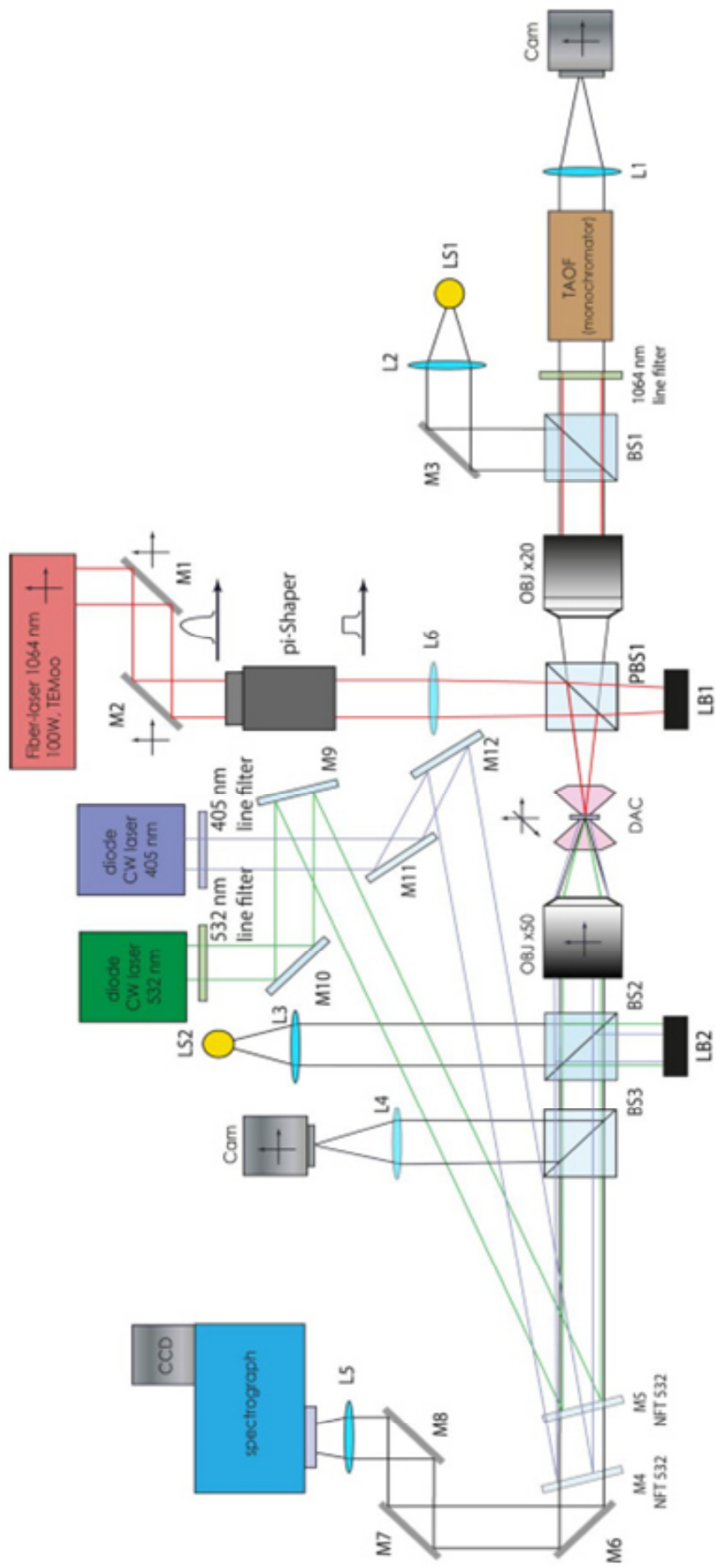


Рисунок 3.1 – Схема электронного прибора LN DAC

На виході коліматора лазера енергетичний потік має гаусове розподілення та після проходження через Pi-Shaper цей потік є більш рівномірно розподілений в потоці оптичного випромінювання від лазера. Після об'єктиву типу Pi-Shaper розташовано дзеркало M4, яке віддзеркалює оптичне випромінювання з довжиною хвилі 1070 нм, яке надходить до об'єктива OBJ x20, у фокусі якого розташовано зразок, що досліджується. Зразок нагрівається інфрачервоним випромінюванням від лазера. Оптичне випромінювання від нагрітого зразка, яке є вертикально поляризованим фокусується мікрооб'єктивом $\times 20$, який має велику робочу відстань 20 мм з такими параметрами як OBJx20, M, Plan Apo, L , $NA = 0,28$, та надходить до акусто-оптичного монохроматора (ТАОФ). Акусто-оптичний монохроматор є поляризаційним пристроєм, який має вертикальну лінійну поляризацію. Застосування поляризаційного дільника дозволяє не втрачати енергію оптичного випромінювання від нагрітого тіла. Оптичне випромінювання, яке пройшло через акусто-оптичний монохроматор фокусується за допомогою лінзи L1, яка має такі параметри $f' = 400$ мм, AC254400-B Thorlabs, та на чутливу ділянку матриці відеокамери типу Allied Vision Mako G-030B, які підключено до персонального комп'ютера.

Основним недоліками розглянутого електронного пристрою лазерного нагрівання:

1. Один об'єктив застосовується як для фокусування оптичного пучка від лазера, так і для оптичного блоку, що дозволяє одержати гіперспектральне зображення об'єкта дослідження, а реалізувати вимірювальний контроль температури. У цьому пристрої фокус об'єктива повинен бути на поверхні об'єкта, для здійснення точного вимірювання значення температури. Проте, це призводить до фокусування лазера, який здійснює нагрівання, та виникнення великого значення градієнта температур на зразку. Нагрівання об'єктива від постійного опромінювання лазерним променем призводить до спотворення отриманого зображення на видимій ділянці спектра.

2. Лазерний промінь під час нагрівання генерує доволі великі градієнти

температури у зразку, що досліджується. Для одержання постійного розподілу площі зразка з діаметром приблизно 100 мкм використовується спеціальна оптика типу Pi-Shaper.

Для усунення впливу зазначених недоліків необхідно здійснити розділення фокуруючого блоку ЛН та блоку, який відповідає за одержання оптичного зображення та вимірюванні розподілення температури за поверхнею зразка, що досліджується. Необхідно розробити електронний пристрій нагрівання зразків, що досліджується, в комірці високого тиску, де пристрій нагрівання та оптична частина електронного вимірювального пристрою температури розділено. Також необхідно визначити оптимальне значення фокусної відстані від зразка, що нагрівається потоком від лазера, діапазон цієї відстані знаходиться в межах від 30 до 150 мкм. Розроблена конструкція пристрою повинна дозволити збільшити ділянку нагрівання до (50 – 100) мкм, а також істотно зменшити вплив потоку від лазера на алмазне ковадло, що дозволить перейти до імпульсного режиму нагрівання. Схему електронного пристрою нагрівання комірок високого тиску наведено на рис. 3.2.

Для забезпечення компенсації втрати оптичного випромінювання застосовується лазер типу ЛК-200-ОМ-У, який має такі характеристики і параметри: максимальне значення потужності 200 Вт; довжина хвилі $\lambda=1,07$ мкм; якість пучка потоку $M2 = 1,06$; величина кутової розбіжності 24,31 мрад; радіус пучка за рівнем інтенсивності 29,64 мкм, довжина Релея 4,96 мм. Для просторових параметрів потоку випромінювання від лазера [16]:

$$h_p \cdot \theta = \frac{h_p^2}{z_r} = \text{const} = \frac{M^2 \cdot \lambda}{\pi} = 0,36 \text{ мм} \cdot \text{мрад}.$$

Оптичне випромінювання від лазера надходить до дзеркал М1 та М2, які мають високу стійкість до опромінювання. Інтенсивність вихідного оптичного потоку лазерного випромінювання коліматора має спонтанну поляризацію та гаусовий розподіл інтенсивності.

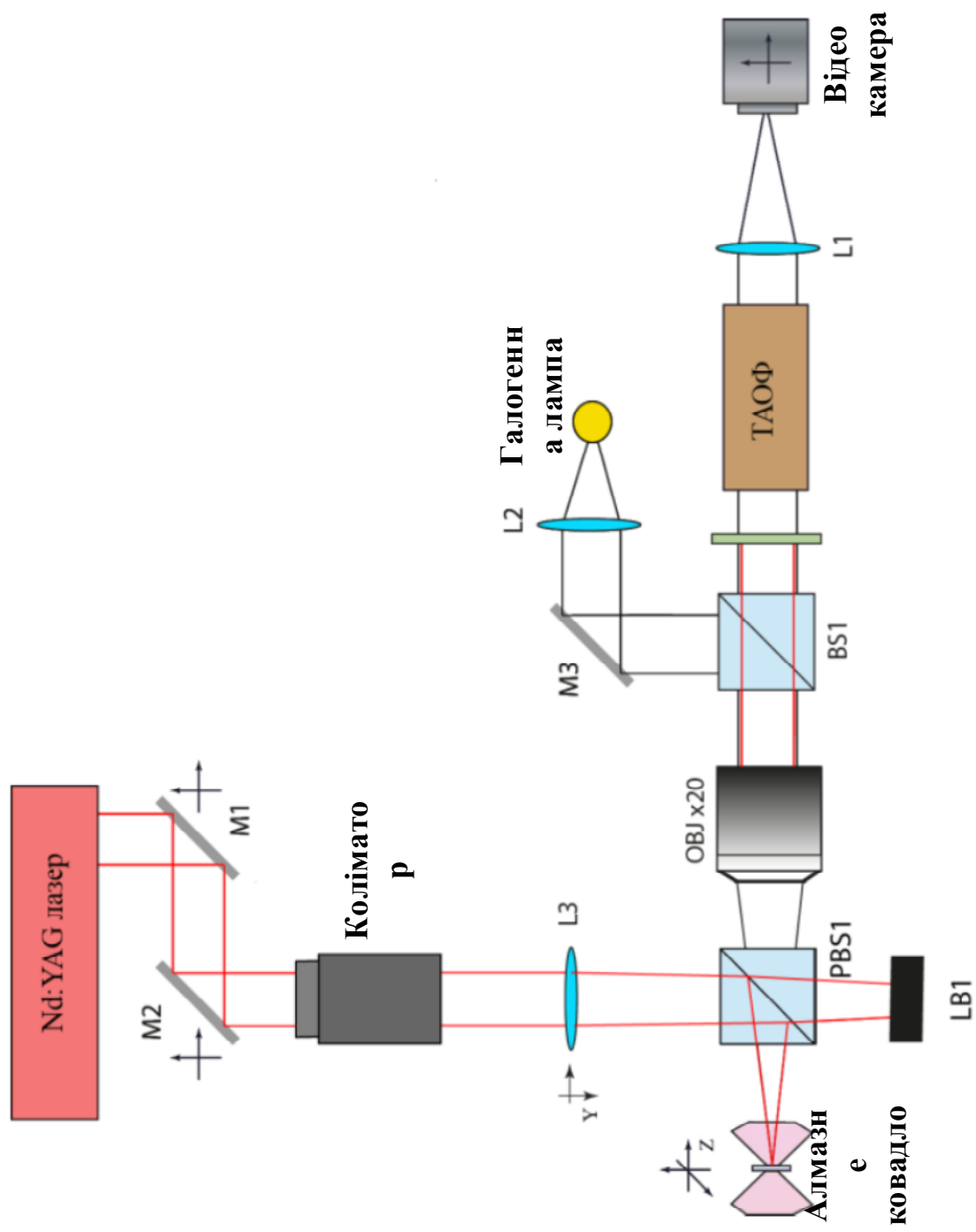


Рисунок 3.2 – Схема електронного пристрою нагрівання комірок високого тиску

Після коліматора розташовано лінзу L3, яка переміщується за оптичною віссю. Лінза L3 застосовується для фокусування оптичного випромінювання від лазера на зразок, що досліджується. Під час переміщення лінзи L3 можна змінювати геометричні розміри лазерного пучка, що фокусується на зразок. Після лінзи оптичний потік від лазера надходить до поляризованого дільника PBS1. До зразка потрапляє лише вертикальна складова поляризованого оптичного випромінювання від лазера, яка обумовлює процес нагрівання. Горизонтальна складова оптичного випромінювання від лазера розсіюється на тепловому екрані LB1. Зразок, що досліджується, розташовано в комірці між алмазним ковадлом. Як вихідні данні від оптичного блоку пристрою формується гіперспектральне зображення теплового оптичного випромінювання дослідного від зразка. Теплове оптичне випромінювання, яке є спонтанною поляризацією від дослідного зразка проходить через дільник поляризації PBS1. Зазначене випромінювання розділяється на дві складові: горизонтальну поляризацію, що не застосовується, та вертикальну поляризацію.

Теплове оптичне випромінювання від нагрітого зразка, яке має вертикальну поляризацію, фокусується на мікрооб'єктиві $\times 20$, який має величину робочої відстані 20 мм, надходить до акустооптичний монохроматор (ТАОФ). Акустооптичний монохроматор є пристроєм, що має вертикальну поляризацію, тому під час застосування поляризаційного дільника втрати відсутні. Оптичні промені, що пройшло через монохроматор, фокусується за допомогою лінзи L1 до чутливої матриці чорно-білої відеокамери типу Allied Vision Mako G-030B, яку підключено до персонального комп'ютера.

Для забезпечення позиціонування досліджуваного зразка застосовується підсвічування його білим світлом. Оптичний блок, що здійснює підсвічування, має в своєму складі галогенну лампу, потужність якої складає 100 Вт. Оптичне випромінювання від цієї лампи зі застосуванням лінзи L2, яка має фокусну відстань 30 мм, та дзеркала M3 надходить до світлодільника BS1, та фокусується до зразка, що досліджується. Під час проведення експериментальних досліджень світлодільник BS1 витягується з пристрою. Ця

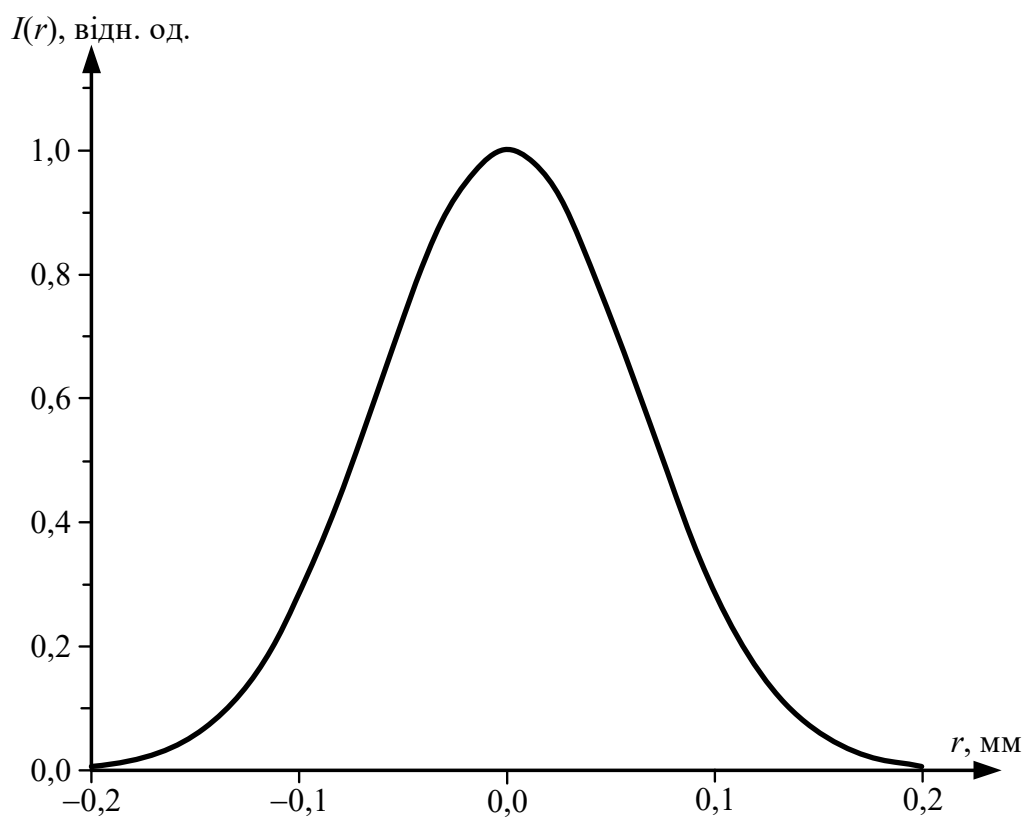
операція дозволяє підвищити величину інтенсивності сигналу теплового оптичного випромінювання та мінімізувати вплив паразитного засвічування.

Після встановлення комірки високого тиску до електронного пристрою здійснюється її позиціонування. Для точного позиціонування застосовується галогенна лампа та дільник оптичного випромінювання BS1. Потім монохроматор настраюється на довжину хвилі, яка має максимальне значення оптичного пропускання, та завдяки переміщенню комірки зі застосуванням мікронних гвинтів столика, що рухається, визначається оптимальне зображення зразка, що досліджується, у відеокамері.

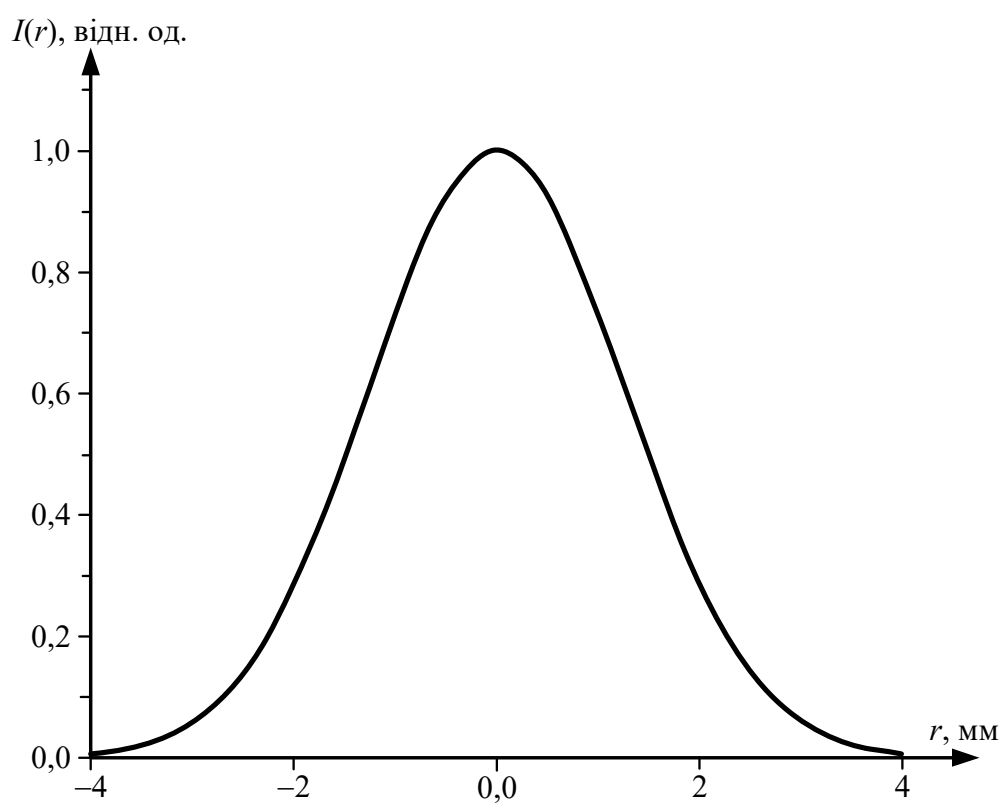
На наступному кроці здійснюється позиціонування оптичного випромінювання від лазера на поверхні зразка. Для цього розташовують лінзу L3 зі застосуванням мікронних гвинтів таким чином, щоб зразок розташувати в задньому фокусі. Величина потужності лазера встановлюється на мінімальне значення. Значення довжини хвилі фільтра вибирається 1040 нм. Зі застосуванням наведеної процедури можна отримати зображення інфрачервоного випромінювання від лазера на зразку, що досліджується.

До переваг розробленого пристрою можна віднести те, що є можливість здійснення фокусування оптичного випромінювання від лазера. Застосування цієї процедури дозволяє виконувати вимірвальний контроль градієнту температури зразку зі збереженням чіткості зображення. Завдяки переміщенню лінзи L3 можна здійснювати керування розміром оптичної плями на поверхні алмазного ковадла та на зразку, що досліджується.

Під час моделювання роботи оптико-електронного пристрою розглядалось фокусування випромінювання від лазера типу ЛК-200-ОМ-В з параметрами потоку під час використання лінз з фокусами: 30, 40, 50, 100 і 150 мм. Розподілення нормованої інтенсивності потоку випромінювання від лазера наведено на рис. 3.3, де позначено: а) на виході лазера ЛК-200-ОМ-В, б) на лінзі L3. Для отримання необхідного розміру перетину потоку оптичного випромінювання від лазера в алмазній ковадлі зі застосуванням коліматора лазерний пучок розширено.



а)



б)

Рисунок 3.3 – Розподілення нормованої інтенсивності потоку оптичного випромінювання від лазера а) на виході лазера ЛК-200-ОМ-В, б) на лінзі L3

Отриманий потік оптичного випромінювання фокусується за допомогою лінзи L3 (див. рис. 3.1). Розмір перетину потоку на поверхні зразка визначається через фокусну відстань лінзи L3, а також за її положенням щодо поверхні алмазного ковадла.

Фактичне положення перетину потоку зсувається через те, що він проходить через два середовища: алмаз та зразок, що досліджується. Діаметр перетину потоку не змінюється в середовищі, він є однаковим у середовищі та повітрі [17]:

$$2 \cdot h'_n \approx 1,27 \frac{M^2 \cdot \lambda}{2 \cdot h_L} \cdot f'.$$

Для розробленого оптичного блоку $2 \cdot h \cdot L = 5$ мм.

Оптичний потік від лінзи L3 фокусується на поверхні алмазного ковадла. Для здійснення фокусування інфрачервоного оптичного випромінювання від лазера на зразок необхідно здійснити переміщення лінзи L3, величину цього переміщення можна визначити з співвідношенням [17]:

$$z = - \left(\frac{d_1}{N_1} + \frac{d_2}{3 \cdot N_1 \cdot N_2} \right),$$

де n_1 – показник заломлення повітря;

n_2 – показник заломлення алмаза, значення якого дорівнює 2,4;

n_3 – показник заломлення солі, величина якого дорівнює 2;

$N_1 = \frac{n_2}{n_1}$, $N_2 = \frac{n_3}{n_1}$ – відносні показники заломлення середовища;

d_1 – товщина алмаза, яка дорівнює 2,5 мм;

d_2 – товщина шару термічної ізоляції, що дорівнює 20 мкм;

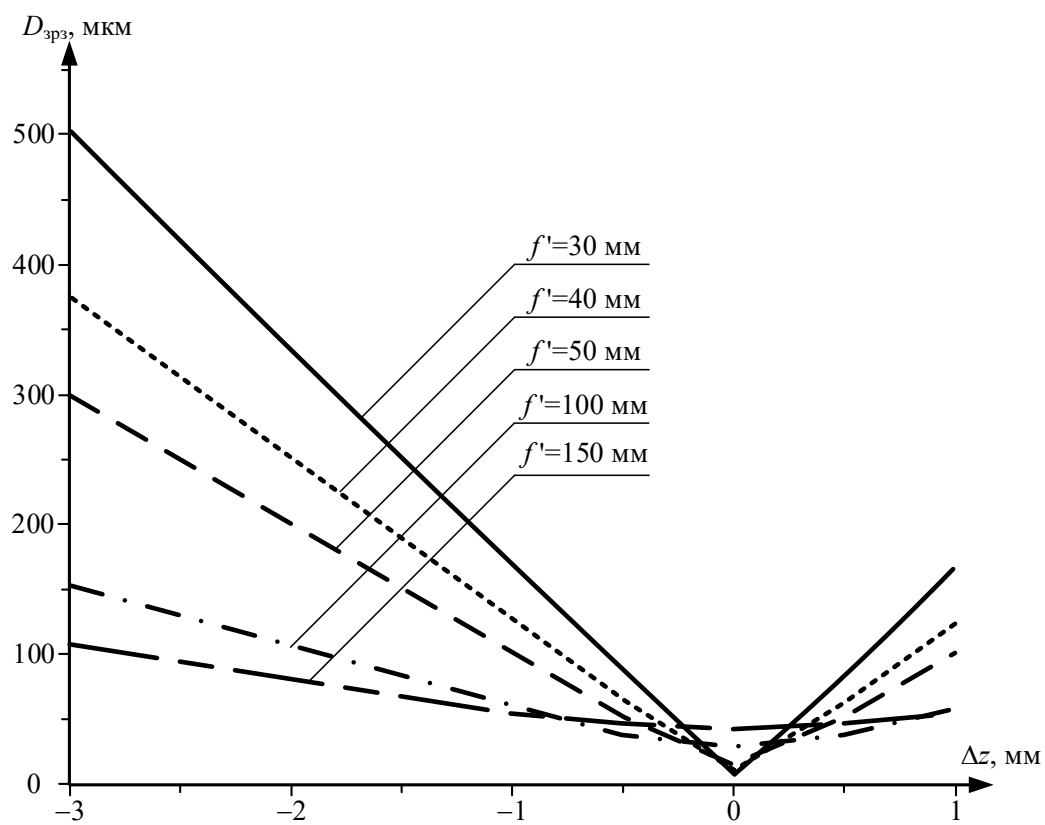
Зсув лінзи фокусування L3 від визначеного положення на Δz може

призвести до виникнення відхилення між алмазною ковадлом та лінзою, а також збільшення діаметра перетину пучка на поверхні зразка та алмаза. Потім лінза фокусування L3 зсувається в межах від -2 до $+0,5$ мм та визначається діаметр перетину на поверхні зразка та алмаза (див. рис. 3.4, а). якщо має місце негативне значення Δz , то лінза зсувається до ковадла, а під час позитивного значення Δz від нього.

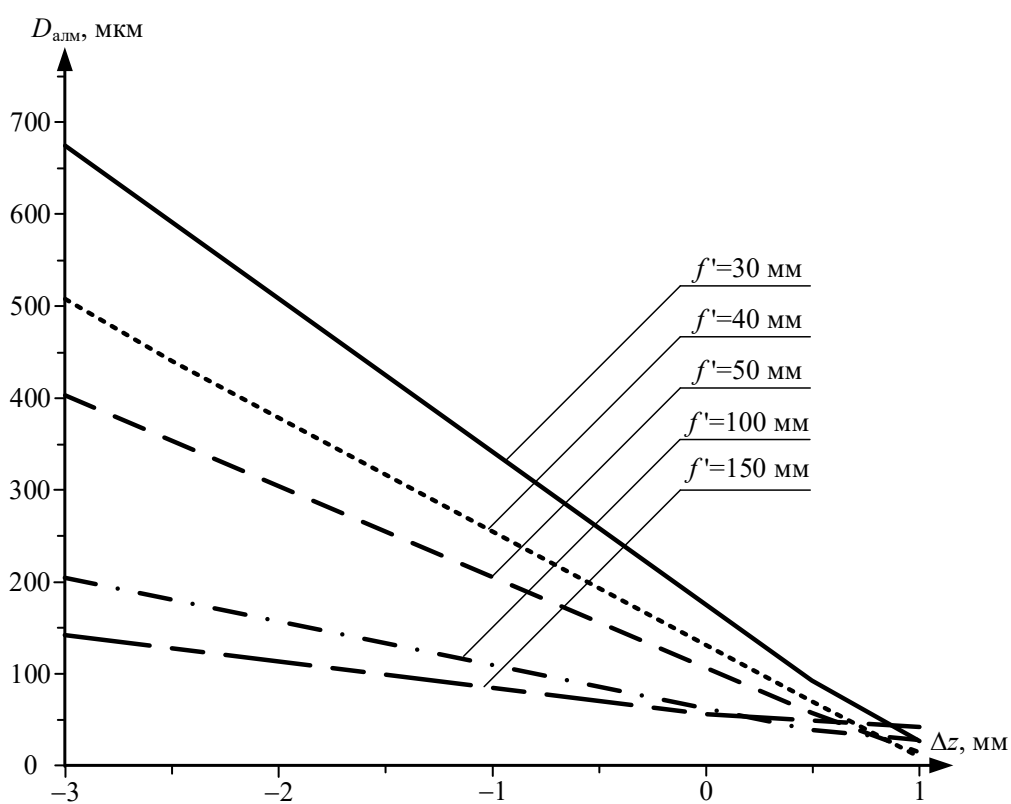
Розраховується діаметр перетину оптичного випромінювання на поверхні зразка та алмаза. Якщо фокусні відстані лінзи дорівнюють 40 мм і 0,5 мм, а радіус перетину потоку: на поверхні алмазного ковадла 132 мкм, а на зразку, що досліджується, 12 мкм (див. рис. 3.4, б).

З отриманої залежності, яку наведено на рис. 3.4, можна зробити висновок, що лінза, яка має фокусну відстань 150 мм, утворює найбільше значення перетину, що дорівнює 48 мкм. Перетин такого діаметра 50 мкм утворюється на поверхні алмазного ковадла. Алмази, що застосовуються під час виготовлення ковадла є прозорими для інфрачервоного випромінювання. Проте, потрапляння потужного оптичного випромінювання від лазера на порошинки, що знаходиться на поверхні алмазу призводить до його пошкодження. Отже, необхідно зробити перетин потоку від лазера на поверхні алмазу більшого діаметра. Оптимальним є застосування лінзи, яка має фокусну відстань 40 мм. Застосування лінзи, яка має менш ніж 30 мм фокусну відстанню неможлива через геометричні розміри розробленого електронного пристрою.

Отже, розподілення блоку нагрівання та вимірювального блоку, а також застосування лінзи, яка має фокусну відстань 40 мм, та забезпечення її зсуву дозволяє одержати діаметр поперечного перетину оптичного потоку від інфрачервоного лазера до зразка 85 мкм, а зменшення значення інтенсивності потоку оптичного випромінювання від лазера до зразка у вісім разів.



а)



б)

Рисунок 3.4 – Зміна діаметра потоку на зразку $D_{зрз}$ (а) та діаметра на поверхні алмаза $D_{алм}$ (б) від зсуву Δz

ВИСНОВКИ

Виконано аналіз безконтактних методів вимірювального контролю градієнту температури на поверхні об'єктів дослідження з можливістю їх використання для комірок високого тиску. Усі відомі способи достовірного визначення поверхневого розподілення температури базуються на ступені чорноти або відомого значення середньої температури, що може призвести до отримання недостовірних інформаційних даних щодо значення температури. Для визначення значення температури застосовано метод лінеаризації сумісно з методом найменших квадратів, що зменшило величину похибки під час нелінійної апроксимації функції методом найменших квадратів.

Виконано розробку електронного пристрою нагрівання зразків у комірці з алмазним ковадлом, де блоки лазерного нагрівання та вимірювання параметрів спектру оптичного сигналу розділені. Електронний пристрій з розділеними блоками нагрівання та вимірювання параметрів спектру оптичного сигналу має такі переваги:

- юстирування оптичної частини електронного пристрою блоку вимірювання параметрів спектру здійснюється незалежно від юстирування параметрів інфрачервоного лазера;

- застосування лінзи, що переміщується в діапазоні фокусної відстані від 30 до 40 мм, дозволяє одержати оптимальну величину поперечного перетину оптичного потоку випромінювання від інфрачервоного лазера на зразку, що досліджується.

Розроблено електронний пристрій моніторингу температури в комірках високого тиску, який має такі особливості:

- дослідження здійснюється на двох довжинах хвиль оптичного випромінювання;

- виконується сканування об'єкта дослідження;

- застосування поляризатора для введення оптичного випромінювання від

лазера, а також підвищення амплітудного значення вихідного сигналу на детекторі, що призводить до підвищення точності результату вимірювання.

Основною перевагою розробленого електронного пристрою є те, що він має розділення блоків нагрівання зразка та вимірювального блоку. Розроблено оптичну частину блоку нагрівання зразка в комірці високого тиску, де лазерне нагрівання та оптична схема вимірювання температури розділені між собою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ступников, В.А. Высокие давления в химии. Алмаз и алмазоподобные материалы, технические и синтетические аспекты / В.А. Ступников, Б.М. Булычев. – М.: УМО, 2012. – 112 с.
2. Popova, S.V. Structural phase transitions in highly compressed substance and the synthesis of high-pressure phases/ S.V. Popova, V.V. Brazhkin, T.I. Dyuzheva // *PhysicsUspekhi*, 2008. – № 51 (10).
3. Zinin, P.V. Synthesis, Characterization of Elastic and Electrical Properties of Diamond-like BC_x Nano-Phases Synthesized under High and Low Pressures / P.V. Zinin, A.V. Nozhkina, R.I. Romanov etc. // *Mrs Advances*, 2018. – № 3 (1 – 2). – P. 45 – 52.
4. Стишов, С.М. Азбука высоких давлений / С.М. Стишов. – Ижевск: ИКИ, 2019. – 140 с.
5. Bassett, W.A. The birth and development of laser heating in diamond anvil cells / W.A. Bassett // *Review of Scientific Instruments*, 2001. – № 72(2). – P. 1270 – 1272.
6. Dunstan, D.J. Technology of diamond anvil high-pressure cells: I. Principles, design and construction / D.J. Dunstan, I.L. Spain // *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1989. – № 22 (11). – P. 913 – 923.
7. Piermarini, G.J. Calibration of the pressure dependence of the R1 ruby fluorescence line to 195 kbar / G.J. Piermarini, S. Block, J.D. Barnett etc // *Journal of Applied Physics*, 1975. – № 46(6). – P. 2774 – 2780.
8. Miletich, R. High-Pressure Single-Crystal Techniques / R. Miletich, D. Allan, W. Kuhs // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2000. – № 41. – P. 445 – 519.
9. Burgess, K. Elastic characterization of platinum/rhodium alloy at high temperature by combined laser heating and laser ultrasonic techniques / K. Burgess, V. Prakapenka, E. Hellebrand etc // *Ultrasonics*, 2014. – № 54. – P. 963 – 966.

10. Магунов, А.Н. Спектральная пирометрия / А.Н. Магунов. – М.: Физматлит, 2012. – 248 с.
11. Куин, Т. Температура / Т. Куин. – М.: Мир, 1985. – 448 с.
12. Kavner, A. Temperature gradients and evaluation of thermoelastic properties in the synchrotron-based laser-heated diamond cell / A. Kavner, W.R. Panero // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2004. – № 143(44). – P. 527 – 539.
13. Draper, N.R. Applied Regression Analysis / N.R. Draper, H. Smith. – New York: Wiley, 1966. – 407 p.
14. Verhoeven, J.W. Glossary of terms used in photochemistry / J.W. Verhoeven // *Pure and Applied Chemistry*, 1996. – № 68(12). – P. 2223 – 2286.
15. Ming, L.C. Laser heating in the diamond anvil press up to 2000°C sustained and 3000°C pulsed at pressures up to 260 kilobars / L.C. Ming, W.A. Bassett // *Review of Scientific Instruments*, 1974. – № 45(9). – P. 1115 – 1118.
16. Prakapenka, V.B. Advanced flat top laser heating system for high pressure research at GSECARS: application to the melting behavior of germanium / V.B. Prakapenka, A. Kubo, A. Kuznetsov etc // *High Pressure Research*, 2008. – №28(3). – P. 225 – 235.
17. Климков, Ю.М. Прикладная лазерная оптика / Ю.М. Климков. – М.: Машиностроение, 1985. – 128 с.

ДОДАТОК А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві

До приміщення науково-дослідного відділу та організації робочого місця з обліком шкідливих виробничих факторів пред'являється ряд вимог. Приміщення, в якому знаходиться робоче місце з персональним комп'ютером, повинно мати природне освітлення, бажано з однобічним розміщенням світових прорізів, площа осклянілості яких не повинна перевищувати 25 % від площі стіни світових прорізів. Віконні прорізи в приміщенні з персональним комп'ютером повинні мати регульовані жалюзі чи занавіски або інші сонцезахисні пристрої. Не допускається розташування робочих місць з персональним комп'ютером у підвальних і цокольних поверхах. Робочі місця з персональними комп'ютерами рекомендується розміщувати в окремих приміщеннях. Площа на одного працюючого з персональним комп'ютером повинна складати 6 м², об'єм – 20 м³. Неприпустиме розташування персонального комп'ютера, під час якого працюючий звернений обличчям або спиною до вікон чи кімнати задньої частини персонального комп'ютера, де монтуються вентилятори.

Забороняється застосовувати для обробки інтер'єра приміщень з персональними комп'ютерами полімерні матеріали (дерев'яностружечні плити, шпалери, що миються, плівкові та рулоні синтетичні матеріали, шаруватий паперовий пластик та ін.), що виділяються в повітря шкідливі хімічні речовини, що перевищують гранично допустимі концентрації, не включені до «Переліку дозволених, МЗ» 1977-1985 р.

У лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідної роботи робочі місця з персональними комп'ютерами розташовані від стіни з вікнами на відстані 1 м, відстань між столами 3 м. Екрани моніторів знаходяться від очей користувача на відстані 700 мм відповідно до СН 512-78, приміщення ($S=21 \text{ м}^2$, $V=73,5 \text{ м}^3$) дозволяє розташовувати більше 3 робочих місця.

Робочі місця в положенні сидячі відповідають вимогам ДСТ 12.2.032 – 78 та ДСТ 12.2.029 – 77. Поверхня робочого столу знаходиться на висоті 0,75 м від підлоги, розміри робочої поверхні стільниці складають 1050x590 міліметрів, розміри вільного простору для ніг під столом складає висота 650, глибина 550, ширина 450 міліметрів, відповідно. Робочий стілець оснащений підйомно-поворотним пристроєм, що забезпечує регуляцію висоти сидіння та спинки, пневматичним і гідравлічними амортизаторами та обладнанні підлокітниками.

А.1 Мікроклімат робочого місця

У приміщенні науково-дослідного відділу є джерела тепловиділення, тому необхідно визначити необхідні умови його вентильовання. Витрати повітря в приміщенні з додатковим тепловиділенням визначаються за формулою:

$$L = \frac{Q_{\text{НАД}}}{c \cdot p \cdot (t_{\text{В}} - t_{\text{Н}})}, \quad (\text{A.1})$$

де $Q_{\text{НАД}}$ – надлишкове виділення тепла в робочому приміщенні, ккал/год.;

c – теплоємність повітря (0,237 ккал/кг);

p – об'ємна вага повітря (1,226 кг/м³);

$t_{\text{В}}$ – температура витяжного повітря (30°C);

$t_{\text{Н}}$ – температура приточного повітря (20°C).

Розраховується надлишкове надходження тепла за формулою:

$$Q_{\text{НАД}} = Q_{\text{УСТ}} + Q_{\text{ПЕР}} + Q_{\text{ОСВ}} + Q_{\text{СР}}, \quad (\text{A.2})$$

де $Q_{\text{уст}}$ – виділення тепла від устаткування;

$Q_{\text{пер}}$ – виділення тепла від персоналу;

$Q_{\text{осв}}$ – надходження тепла від електричного освітлення;

$Q_{\text{ср}}$ – надходження тепла від сонячної радіації через вікна.

Визначається виділення тепла від устаткування за формулою:

$$Q_{\text{уст}} = P \cdot K_a \cdot K_6 \cdot 860, \quad (\text{A.3})$$

де P – сумарна потужність устаткування, кВт/год;

K_a – коефіцієнт установленної потужності (0,95);

K_6 – коефіцієнт одночасної роботи (1,0).

$$\begin{aligned} Q_{\text{уст}} &= [x_1 \cdot k_1 + x_2 \cdot k_2 + x_3 \cdot k_3 + x_4 \cdot k_4 + x_5 \cdot k_5 + x_6 \cdot k_6 + x_7 \cdot k_7 + \\ &+ x_8 \cdot k_8 + x_9 \cdot k_9] \cdot K_a \cdot K_6 \cdot 860 = \\ &= [1 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,1 + 1 \cdot 0,07 + 2 \cdot 0,4 + 1 \cdot 0,06 + 1 \cdot 0,05 + 1 \cdot 0,6 + 4 \cdot 0,15 + \\ &+ 1 \cdot 3,5] \cdot 0,95 \cdot 1 \cdot 860 = 5131 \text{ ккал/год.} \end{aligned}$$

Визначається виділення тепла від обслуговуючого персоналу за допомогою формули:

$$Q_{\text{пер}} = n \cdot g = 2 \cdot 100 = 200 \text{ ккал/год,} \quad (\text{A.4})$$

де n – кількість працюючих;

g – кількість тепла, що виділяє один працівник за годину (100 ккал/год.).

Визначається надходження тепла від електричного освітлення за формулою:

$$Q_{\text{осв}} = E_m \cdot g_1 \cdot S = 300 \cdot 0,05 \cdot 21 = 315 \text{ ккал/год,} \quad (\text{A.5})$$

де E_M – нормована освітленість для зорової роботи, величина якої дорівнює 300 лк;

g_1 – питома тепловиділення на 1 м² підлоги під час освітленості в 1 лк (для люмінесцентних ламп – 0,05 ккал/год.);

S – площа приміщення, м².

Визначається надходження тепла від сонячної радіації через вікна за формулою:

$$Q_{CP} = F \cdot g_2 \cdot K_{OCL} = 7,5 \cdot 65 \cdot 0,4 = 195 \text{ ккал/год}, \quad (A.6)$$

де F – площа віконних прорізів (3 x 2,5=7,5 м²);

g_2 – кількість тепла, що надходить через 1 м² віконного прорізу (65 ккал/год.);

K_{OCL} – коефіцієнт ослаблення, приймається 0,4.

Визначається кількість надлишкового тепла:

$$Q_{HAД} = Q_{УСТ} + Q_{ПЕР} + Q_{OCB} + Q_{CP} = 5131 + 200 + 315 + 195 = 5841 \text{ ккал/год.}$$

Визначаються витрати повітря в приміщенні:

$$L = \frac{Q_{HAД}}{c \cdot p \cdot (t_B - t_H)} = \frac{5848}{0,237 \cdot 1,226 \cdot (30 - 20)} = 2010 \text{ м}^3 / \text{год.}$$

Існуюча в наявності система кондиціонування та вентилявання має продуктивність 2200 м³/год., що задовольняє необхідним нормативам.

Параметри мікроклімату на робочих місцях регламентуються ДНАОП 0.03.3.15 – 86 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень № 4088–86». Відповідно доданих санітарних норм температура повітря, швидкість руху повітря та відносна вологість у холодні періоди року повинна складати

(22 – 24) градуса за Цельсієм, 0,1 метра в секунду та (40 – 60) %, відповідно. Під час збереження всіх параметрів можливе коливання температури від 21 до 25 градусів Цельсія. У теплі періоди року температура повітря повинна складати (23 – 25) градусів Цельсія, швидкість руху повітря (0,1 – 0,2) метрів в секунду, вологість (40 – 60) %. Температура може коливатися від 22 до 26 градусів Цельсія під час збереження всіх інших параметрів мікроклімату. Вище зазначені норми цілком відповідають фактичним даним приміщення лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідним відділом.

А.2.2 Розрахунок системи загального рівномірного освітлення з лампами розжарювання для приміщення, в якому використовуються зорові роботи високої точності

Розміри приміщення: довжина ($a=6$ м), ширина ($b=3,5$ м), висота ($H=3,5$ м). Приміщення має світлу побілку: коефіцієнт відбиття $P_{\text{стелі}} = 70$ %, $P_{\text{стін}} = 50$ %. Висота робочих поверхонь (столів) $h_p = 0,7$ м. Для освітлення прийнято світильники типу УПМ-15, що розташовано на стелі, відстань від світильника до стелі $h_c = 0,4$ м. Мінімальна освітленість за нормами $E=200$ лк.

1) Визначається висота підвісу світильників над підлогою:

$$h_0 = H - h_c = 3,5 - 0,4 = 3,1 \text{ м.}$$

Для світильників загального освітлення з лампами розжарювання потужністю до 200 Вт мінімальна висота підвісу над підлогою відповідно до СНІП П-4-79 повинна бути в межах (2,5 – 4,0) м, залежно від характеристики світильника. Освітлення лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідного відділу відповідає цій вимозі.

2) Визначається висота підвісу світильника над робочою поверхнею:

$$h = h_0 - h_p = 3,1 - 0,7 = 2,4 \text{ м.}$$

Рівномірність освітлення досягається під час відповідного співвідношення відстані між світильниками (L) та висоти їх підвісу (h).

3) Визначається рекомендована відстань між світильниками:

$$L = 0,7 \cdot h = 0,7 \cdot 2,4 = 1,68 \text{ м.}$$

4) Розраховується необхідна кількість світильників:

$$N = \frac{a \cdot b}{L^2} = \frac{6 \cdot 3,5}{1,68^2} = 7,4.$$

Приймається 8 світильників, з обліком розмірів приміщення вони розташовуються у два ряди по 4 штуки.

5) Світловий потік лампи світильника ($\Phi_{\text{л}}$) визначається за формулою:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E \cdot K_3 \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta},$$

де E – нормативна освітленість, лк;

K_3 – коефіцієнт запасу, який враховує зниження освітленості в результаті забруднення та старіння ламп;

S – площа приміщення, що освітлюється, м²;

Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення для ламп розширювання (1,15);

N – кількість світильників;

n – кількість ламп у світильнику;

η – коефіцієнт використання світового потоку, що визначається за світлотехнічними таблицями залежно від показника приміщення (i) та

коефіцієнтів відбиття стін і стелі.

6) Визначається показник приміщення:

$$i = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)} = \frac{6 \cdot 3,5}{3,5 \cdot (6 + 3,5)} = 2,21.$$

Коефіцієнт використання $\eta = 0,48$ для світильника УПМ-15 ($i = 2,5$, $P_{\text{стелі}} = 70\%$, $P_{\text{стін}} = 50\%$)

Світловий потік одного світильника, а значить і лампи, оскільки за конструктивним виконанням у світильнику цього типу встановлена лише одна лампа, дорівнює:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 21 \cdot 1,15}{6 \cdot 1 \cdot 0,48} = 1677 \text{ лм.}$$

9) обирається лампа Б-150 потужністю 150 Вт, світловий потік якої дорівнює 2000 лм. Хоча це значення на 19,2 % більше розрахованого, проте не перевищує встановлену норму ($-0\% < \Phi_{\text{л}} < +20\%$). Сумарна електрична потужність усіх світильників, встановлених у приміщенні становить:

$$P_{\text{св}} = P \cdot N = 150 \cdot 8 = 1200 \text{ Вт.}$$