# НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

## Факультет електроніки

## Кафедра мікроелектроніки

До захисту допущено: В.о. завідувача кафедри \_\_\_\_\_Дмитро ТАТАРЧУК

«\_\_\_»\_\_\_\_20\_\_\_p.

# Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

## за освітньо-професійною програмою «Мікро- та наноелектроніка»

## спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

на тему: «Джерело оптичного випромінювання для пірометра-рефлектрометра»

Виконала: студентка IV курсу, групи ДП-92, Ткаленко Яна Юріївна

Керівник: доц. каф. МЕ, к.т.н., Воронько Андрій Олександрович

Консультант з нормоконтролю: ст. викл. каф. МЕ, к.т.н., Королевич Любомир Миколайович

Консультант з інформаційних питань: доц. каф. МЕ, к.т.н., доц., Діденко Юрій Вікторович

Рецензент:

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань. Студент (-ка) \_\_\_\_\_

# Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## Факультет електроніки

## Кафедра мікроелектроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Освітньо-професійна програма «Мікро- та наноелектроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ В.о. завідувача кафедри \_\_\_\_\_ Дмитро ТАТАРЧУК «\_\_\_»\_\_\_\_\_20\_\_ р.

# ЗАВДАННЯ

# на дипломну роботу студентці

# Ткаленко Яні Юріївні

1. Тема роботи «Джерело оптичного випромінювання для пірометрарефлектрометра», керівник роботи Воронько Андрій Олександрович, доц. каф. МЕ, к.т.н., затверджені наказом по університету від «\_\_\_»\_\_\_\_ 20\_\_ р. №\_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом роботи \_\_\_\_\_09.06.2023\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи: оптичне джерело в якості випромінювача якого використовується ІЧ світлодіод, який має параметри: оптична потужність не менше 30 мВт при роботі не більше 60% від максимального струму. Час наростання та спаду не більше 20 нс, площа кристала не більше 0,3×0,3 мм<sup>2</sup>.

4. Зміст роботи: 1) вивчення та порівняння видів оптичних пірометрів, обрання найбільш оптимального пірометру для технології металоорганічного осадження із парової фази; 2) аналіз методу пірометрії з компенсацією випромінювання; 3) створення колімованого джерела з випромінювачем, в якості якого виступає ІЧ світлодіод; 4) вимірювання параметрів світлодіоду та розробка коліматора для пірометра-рефлетрометра.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): презентація.

# 6. Консультанти розділів роботи\*

<ol> <li>Консультанти розділів роботи*</li> </ol>			
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання	завдання
		видав	прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_\_ 14.04.2023\_\_\_\_\_

# Календарний план

№ 3/П	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Пошук та ознайомлення з	17.04.2023p	
	літературними джерелами	21.04.2023p.	
2	Ознайомлення з вимірювальною	24.04.2023p	
	установкою та принципом роботи	28.04.2023p.	
	пірометра		
3	Вимірювання параметрів	01.05.2023p	
	світлодіода, створення оптичної	05.05.2023p.	
	схеми коліматора		
4	Обробка експерементальних	08.05.2023p	
	результатів	12.05.2023p.	
5	Оформлення роботи	15.05.2023p	
		03.06.2023p.	

# Студент

# ТКАЛЕНКО ЯНА ЮРІЇВНА

Керівник

# ВОРОНЬКО АНДРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

#### ΡΕΦΕΡΑΤ

Роботу викладено на 62 сторінках, вона містить 3 розділи, 30 ілюстрацій, 3 таблиці та 39 джерел в переліку посилань.

Об'єктом дослідження є джерело випромінювання для пірометричної системи, що складається з системи колімації та інфрачервоного світлодіода.

Предмет роботи – дослідження параметрів інфрачервоного світлодіода та створення оптичної схеми для колімованого джерела випромінювання.

Мета роботи – створити колімоване джерело випромінювання з використанням IЧ світлодіоду для пірометра-рефлектрометра для прецинзійного вимірювання температури в діапазоні 450-1200°С.

В першому розділі подаються основні теоретичні відомості про класичні, двопроменеві, волоконно-оптичні пірометри та пірометри з компенсацією випромінювання.

В другому розділі розглядаються теоретичні основи процесу газової епітаксії та пірометрії з компенсацією випромінювання.

В третьому розділі досліджуються параметри випромінювача в якості якого використовується ІЧ світлодіод. Обґрунтовується необхідність колімації для забезпечення прецизійності визначення параметрів поверхні епітаксійних шарів за допомогою пірометра. Розглядається класичний дизайн оптичного коліматора, на основі якого розроблюється джерело оптичного випромінювання для системи пірометрії.

Ключові слова: пірометр-рефлектрометр, пірометрія із компенсацією випромінювання, епітаксія тонких плівок з газової фази.

### ABSTRACT

The work is presented in 62 pages and consists of 3 chapters, 30 illustrations, 3 tables, and 39 references in the bibliography.

The object of the research is a collimated radiation source in the form of an IR LED and its application in pyrometry.

The subject of the work is the investigation of the parameters of the IR LED and the development of an optical scheme for a collimated radiation source.

The aim of the work is to create a collimated radiation source using a light-emitting diode for the functional design of a pyrometer-reflectometer for precise temperature measurement in the range of 450-1200°C.

The first chapter provides basic theoretical information about classical, two-color, fiber-optic and emissivity-compensated pyrometers.

The second chapter shows the theoretical foundations of the process of vapourphase epitaxy and emissivity-compensated pyrometry.

The third chapter investigates the parameters of the emitter, using an IR LED. The necessity of collimation for ensuring the precision of determining the parameters of epitaxial layer surfaces using a pyrometer is substantiated. The classical design of an optical collimator is considered, based on which an optical radiation source for the pyrometry system is developed.

Key words: pyrometer-reflectrometer, pyrometry with emissivity compensation, vapour-phase epitaxy of thin films.

# **3MICT**

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ 6
ВСТУП7
РОЗДІЛ 1. ОПТИЧНІ ПІРОМЕТРИ
1.1 Класичні пірометри
1.2 Двопроменеві пірометри 10
1.3 Пірометри з компенсацією випромінювання
1.4 Волоконно-оптичні пірометри17
Висновки до розділу
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ГАЗОВОЇ ЕПІТАКСІЇ ТА
ПІРОМЕТРІЇ З КОМПЕНСАЦІЄЮ ВИПРОМІНЮВАННЯ
2.1 Особливості застосування оптичного пірометра в процесі епітаксійного
росту
2.2 Теорія пірометрії 30
2.3 Пірометр з компенсацією випромінювання. Функціональна схема пірометра
Висновки до розділу 39
РОЗДІЛ З. ДЖЕРЕЛО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ ОПТИЧНОГО ПІРОМЕТРА 40
3.1 Світлодіод як точкове джерело 40
3.2 Вимірювання параметрів світлодіода 42
3.3 Схема колімації для пірометра-рефлектрометра 50
Висновки до розділу
ВИСНОВКИ
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

# ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ГФЕ МОСМ – метод металоорганічного хімічного осадження із газової фази

MOCVD – Metal-Organic Chemical Vapour Deposition (укр. Металоорганічна епітаксія з пару)

ECP – emissivity-compensated pyrometry

СД – світлодіод

АЧТ – абсолютно чорне тіло

ІЧ – інфрачервоний

ФД – фотодіод

#### ВСТУП

Метод металоорганічного хімічного осадження із газової фази (ГФЕ МОС) знаходить широке застосування в сучасному виробництві складних напівпровідникових матеріалів та структур. Зокрема, використовується для виготовлення оптоелектронних пристроїв, які належать до груп A(III)-B(V), A(II)-B(VI). Включаючи лазери та світлодіоди на основі сполук AlGaAs, AlGaN, InGaAsP, а також транзистори з високою рухливістю електронів (HEMT), біполярні транзистори з гетеропереходом (HBT), сонячні елементи та фотоприймачі.

Одним з основних параметрів які треба вимірювати є температура під час епітаксійного росту. Для вирішення цієї задачі використовують оптичні пірометри, що дистанційно вимірюють температуру за рахунок чого забезпечують необхідну якість та повторюваність вирощених структур.

Пірометр з компенсацією випромінювання враховує зміни властивостей поверхні в процесі металоорганічного хімічного осадження із газової фази та компенсує зміну випромінювальної здатності підкладки.

Для забезпечення необхідної прецизійності визначення температури, система пірометрії з компенсацією випромінювання потребує джерела випромінювання з рівномірним світловим пучком та точністю підтримання заданої потужності. Інтенсивність випромінювання, спектральний розподіл енергії та ширина спектру випромінювання є одними з ключових параметрів для світлодіода в якості точкового джерела випромінювання.

## РОЗДІЛ 1. ОПТИЧНІ ПІРОМЕТРИ

### 1.1 Класичні пірометри

Класична оптична пірометрія – це метод вимірювання температури, який використовує принципи випромінювання тепла для визначення температури об'єкта. Вона базується на порівнянні кольору зразка з кольором джерела, що є підібраним за температурою. Основна перевага класичної оптичної пірометрії полягає в її простоті та можливості безконтактного вимірювання температури.



Рисунок 1.1 – Класичний пірометр Mikron PhotriX Series [36]

На рисунку 1.1 зображено класичний пірометр фірми Advenced, система PhotriX. Пристрій містить сенсорну електроніку з лінзою з антибліковим покриттям, модуль інтерфейсу зв'язку (СІМ), інтерфейсний кабель RS-232, універсальне джерело живлення та програмне забезпечення для збору даних і побудови графіків TemperaSure<sup>™</sup>. Перевагами є роздільна здатність та висока швидкість відгуку (1 мс).

Основні характеристики Mikron PhotriX Series ML-AAPX/088-HXXX 310:

- Довжина хвилі 900 нм
- Мінімальна температура 310 °С
- Максимальна температура 2600 °С

- Варіативні діапазони вимірювання температури в межах 310 2600 °С
- Час відгуку 1 мс
- Фіксована оптика
- Спектральний діапазон 0,88 мкм
- Вихід 4 to 20 мА / RS232 / RS485
- Точність 0,01°С, залежить від довжини хвилі, швидкості та температури
- Тип перегляду оптика або світлові труби (мін. 0,5 мм)
- Умови експлуатації від 10 до 60°С
- Чутливість до коливань: нечутливий до ± 1 градуса
- Розмір плями вимірювання на фокусній відстані: від 0,65 до 1,65 мм [36].

Класичні пірометри, як і всі види оптичних пірометрів, вимірюють температуру з використанням формули Стефана-Больцмана, яка передбачає знання коефіцієнта випромінювання тіла (емісії). У наближенні Стефана-Больцмана потоки F1 та F2 можна описати залежністю

$$\Phi = \sigma \cdot \mathcal{E} \cdot T^4 \cdot A \,, \tag{1.1}$$

- де  $\sigma$  константа Стефана-Больцмана, (5,6697 ± 0,0029)·10<sup>-12</sup> Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);
  - є коефіцієнт поглинання нагрітої контрольної поверхні;
  - Т контрольна температура випромінювальної поверхні, К;
  - А геометричний параметр квадрату видимої нагрітої поверхні, м<sup>2</sup>.

Оскільки закон Стефана-Больцмана описує лише загальну кількість випромінюваної енергії. Розподіл енергії по спектру випромінювання описується формулою Планка. Яка показує, що навіть при одній температурі, випромінювання складається з безлічі випромінювань, що мають різну довжину хвиль, але при цьому спектр випромінювання має єдиний максимум. Положення (частота) максимуму в спектрі залежить від температури об'єкта і визначається законом зміщення Віна, який можна подати наближеною формулою:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T \approx 3000 \text{ мкм} \cdot \text{K},$$
 (1.2)

де  $\lambda_{max}$  – максимальна довжина хвилі, м;

Т – температура, °С.

Доходимо до висновку, що із законів Стефана-Больцмана і Планка випливає, що чим вища температура тіла, тим більша потужність випромінювання, і тим коротша його довжина хвилі  $\lambda_{max}$  [2].

Оскільки коефіцієнти поглинання контрольного об'єкта  $\mathcal{E}_{OC}$  та зразка матеріалу, розміщеного в джерелі інфрачервоного випромінювання  $\mathcal{E}_{SIR}$ , однакові, то

$$T_{OC} = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_{SIR}}{\varepsilon_{OC}}} \cdot T_{SIR} , \qquad (1.3)$$

де Е<sub>SIR</sub> – джерелі інфрачервоного випромінювання;

Е<sub>ОС</sub> – коефіцієнти поглинання контрольного об'єкта;

T<sub>SIR</sub> – розміщеного в джерелі інфрачервоного випромінювання.

Таким чином, забезпечується рівність температури поверхні контрольного об'єкта Т<sub>ос</sub> та температури поверхні зразка матеріалу, розміщеного в джерелі інфрачервоного випромінювання Т<sub>SIR</sub>.

При досягненні рівності потоків F1 та F2 справжня температура джерела інфрачервоного випромінювання вимірюється контактним датчиком температури DT мікроконтролера та відображається на індикаторі температури I або на персональному комп'ютері PC як температура тестового об'єкта [1].

## 1.2 Двопроменеві пірометри

Залежність випромінювання-температури тіла залежить від його емісії. Її можливо розрахувати при калібруванні до певного тіла, яке вимірюється. Двопроменевий пірометр – це система, яка використовуючи схему, показану на рис. 1.2 та не потребує постійної калібровки, адже випромінювання з тіла рівномірно розбивається на дві частини, які подаються на окремі фільтри з вузьким спектром. Вихідні сигнали з фільтрів складаються з випромінювання у двох вузьких діапазонах довжин хвиль  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ . Детектори, чутливі до цих частот, виробляють вихідні напруги V<sub>1</sub> і V<sub>2</sub> відповідно. Співвідношення цих виходів (V<sub>1</sub>/V<sub>2</sub>), як показано, є функцією температури і не залежить від емісії, за умови, що дві довжини хвиль,  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ , досить близькі одна до одної.



Рисунок 1.2 – Схема двопроменевого пірометра [3]

Вихід сигналу двопроменевого пірометру є незалежним від емісії, оскільки емісія на двох довжинах хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  є однаковою. Це ґрунтується на припущенні, що  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  дуже близькі одна до одної. На практиці це припущення не виконується, тому точність двопроменевого пірометра, як правило, є порівняно низькою. Однак інструмент все ще є дуже корисним в умовах, коли вимірювана ціль задимлена або запилена, що є поширеною проблемою в цементній та мінеральній промисловості [3].

Прикладом двоколірного пірометру, що має широке використання в промислових процесах є CAPELLA C311. Даний двоколірний пірометр має два режими роботи – із одним проминем або двома.

- Мінімальна температура 600 °С
- Максимальна температура 2500 °С

- Час відгуку 1 мс
- Регульована оптика для відстаней від 380 мм до 10 м
- Два спектральних діапазони 0.75-0.93 мкм та 0.93-1.1 мкм
- Вихід 4 to 20 мА / RS232 / RS485
- Точність 0,5% виміряного значення в °C +2K
- Час контакту 0.5 мс
- Довжина хвилі 515 нм [4].



Рисунок 1.3 – Візуалізація двоколірного пірометра САРЕLLA СЗ11 [4]

Дані отримані на пірометрі із рисунку 1.3 отримуємо фіксуючи два сигнали

$$I_{\lambda 1} = \varepsilon_{\lambda 1} L_{\lambda 1} \tag{1.4}$$

$$I_{\lambda 2} = \varepsilon_{\lambda 2} L_{\lambda 2} \tag{1.5}$$

де I<sub>1</sub> – сигнал каналу 1 (не лінійний відносно температури),

ε<sub>1</sub> – емісія об'єкта на довжині хвилі каналу 1,

L<sub>1</sub> – радіаційна енергія на довжині хвилі каналу 1, еквівалентна чорному тілу при однаковій температурі;

I<sub>2</sub> – сигнал каналу 1 (не лінійний відносно температури),

 $\varepsilon_2$  – емісія об'єкта на довжині хвилі каналу 1,

L<sub>2</sub> – радіаційна енергія на довжині хвилі каналу 1, еквівалентна чорному тілу при однаковій температурі.

Функція «відношення» ділить ці два сигнали. Припускаючи, що  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ , отже емісії скорочуються. Якщо  $\varepsilon_1$  не дорівнює  $\varepsilon_2$ , тоді потрібна корекція, яку зазвичай називають "нахил" у пірометрах. Нахил =  $\varepsilon_1/\varepsilon_2$  [5].

Двоколірний термометр спостерігає за чорним тілом з коефіцієнтом випромінювання 1,0 та температурою чорного тіла 1500 °С. На основі закону Планка два детектори надають наступні значення енергії відповідно до синьої кривої при коефіцієнті випромінювання 1,0:

a) Детектор № 1 на довжині хвилі λ<sub>1</sub> дасть вихідний сигнал 500 одиниць.

б) Детектор № 2 на іншій довжині хвилі λ<sub>2</sub> вихідний сигнал буде 1000 одиниць.

Оскільки це двоколірний термометр, ми створюємо корекцію про яку зазначалось раніше поділивши 1000 на 500 і отримуємо співвідношення два. Прилад колібрується таким чином, щоб він показував 1500°С, коли бачить співвідношення два.



Рисунок 1.4 – Корекція двоколірного пірометра [5]

На рисунку 1.4 криві Планка для пірометра мають співвідношення, двох детекторів, що направлені на чорне тіло при температурі 1500 ° С.

Коли вимірюваний об'єкт швидко змінює свою температуру або коли вимірювання проводиться на об'єктах зі змінюваною температурою, детектор двопроменевого пірометра не завжди може швидко реагувати на ці зміни. Час реакції детектора може бути порівняно повільним, що може призводити до неточностей вимірювання.

Цей недолік пов'язаний з фізичними властивостями детектора і обмеженнями його чутливості та швидкодії. Детектори можуть мати обмежену швидкодію реакції на зміну випромінювання через теплову ємність і час необхідний для відповіді на новий температурний стан об'єкта.

Закон Стефана-Больцмана виражає залежність між випромінювальною здатністю тіла (ε) і його температурою (T) через константу σ (стала Стефана-Больцмана):

$$\mathbf{P} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{T}^4, \tag{1.6}$$

де Р – потужність випромінювання,

А – площа поверхні тіла.

Закон Променевого переносу описує зв'язок між випромінювальною здатністю тіла (є) і випромінюваною потужністю (Р):

$$\mathbf{P} = \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{T}^4, \tag{1.7}$$

Теплова ємність (C) тіла визначається масою (m) тіла і його теплоємністю (c):

$$\mathbf{Q} = \boldsymbol{m} \cdot \boldsymbol{c} \cdot \Delta \boldsymbol{T},\tag{1.8}$$

де Q – тепло, яке треба передати для зміни температури на ∆Т.

На основі цих законів можна пояснити, що при швидкій зміні температури об'єкта, швидкість зміни випромінювання буде відповідно великою згідно з законом Стефана-Больцмана. Однак, детектор двопроменевого пірометра має певну затримку у реагуванні на зміни випромінювання, яка може бути описана за допомогою теплової ємності тіла. Чим більша теплова ємність, тим більша затримка у реагуванні детектора на зміни випромінювання.

Таким чином, при швидких змінах температури об'єкта, затримка детектора може призвести до неточностей вимірювання, оскільки випромінювання об'єкта змінюється швидше, ніж здатність детектора його виявити.

#### 1.3 Пірометри з компенсацією випромінювання

Пірометрія з компенсацією випромінювання є методом вимірювання температури, що враховує вплив змін емісії об'єкта на точність вимірювання. Принцип роботи пірометрів з компенсацією випромінювання базується на вимірюванні випромінювання тіла і врахуванні залежності емісії від спектральної залежності матеріалу. Залежні від довжини хвилі функції зводяться майже до вигляду δ-функцій з допомогою використання інтерференційного фільтра зі смугою пропускання 10 нм на довжині хвилі 930 нм.

Було розглянуто пірометр із компенсацією випромінювання, що працює в багатопластинних ротаційних дискових реакторах, від компанії Veeco DRT-210 RealTemp© 200 Manual Version 1.1.

Особливістю є поєднання рефлектометра (для обчислення коефіцієнта випромінювання в реальному часі) та пірометра (використовує отриманий коефіцієнт випромінювання та виміряну яскравість для обчислення температури). Загальний принцип роботи якого зображено на рисунку 1.6.



Рисунок 1.5 – Принцип роботи Veeco DRT-210 RealTemp© 200 Manual Version 1.1 [38]

Технічні характеристики:

- Спектральна довжина хвилі: 930нм
- Сумісні підкладки: canфір, SiC, Si, GaN, GaAs, Ge, InP
- Діапазон вимірювання температури: від 450 до 1200°С
- Розмір плями вимірювання на фокусній відстані: 0,30 дюйма на 17 дюймів або 12 дюймів (від оптичної головки до мішені), спеціальні фокусні відстані доступні за запитом
- Мінімальний час збору даних: 0,1 мс
- Чутливість до коливань: нечутливий до  $\pm 0,25$  градусів
- Тип вікна перегляду: спеціальне вікно перегляду на основі фланця 1.33
- Умови експлуатації: температура від 18 до 40°С, відносна вологість без конденсації [38].

Контроль температури є важливою вимогою для вирощування відтворюваних структур, температури пластин можуть значно відрізнятися від тих, що вимірюються за допомогою традиційних методів, таких як термопари з близьким контактом або оптичними пірометрами. Елементи (такі як носії пластин і проміжки, заповнені газом з низьким тиском), розташовані між термопарою та пластиною, призводять до помилок вимірювання, особливо коли середовище камери змінюється, наприклад під час перемикання газів [10]. Помилка температури (ΔT), пов'язана з помилками вимірювання емісії (Δε) та випромінювання (ΔE), може бути виражена таким чином:

$$\Delta T = C\left(\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} + \frac{\Delta E}{E(T)}\right),\tag{1.6}$$

де C = T<sup>2</sup> ×  $\lambda/c^2$ . Оскільки c<sup>2</sup> = 1.44 × 10<sup>7</sup> нм·К є другою радіаційною константою. Значення C приблизно 60 °C при T ≈ 700 °C та  $\lambda \approx 900$  нм.

Метол компенсації випромінювання дозволяє враховувати змінну спектральну випромінювальну здатність об'єкта під час вимірювання, яка може бути обумовлена, наприклад, термічною окисністю або температурною залежністю Оскільки передбачається, випромінювальної здатності. зміни шо випромінювальної здатності з часом і температурою є гладкими, то припускається, що оцінку випромінювальної здатності в одній точці вибірки можна отримати на основі оцінки випромінювальної здатності, отриманої на попередніх точках вибірки, разом з оновленою спектральною інформацією. Це призводить до послідовних перерахунків спектральної випромінювальної здатності разом із відповідними значеннями температури. Запропонований алгоритм було доведено, що дає точні оцінки температури на основі даних, отриманих стандартним УФвідбиваючим спектрофотометром, навіть для оксидуючого зразка Ті-6Al-4V у діапазоні температур від 900 до 1400 К [11].

### 1.4 Волоконно-оптичні пірометри

Волоконно-оптичні пірометри є приладами для вимірювання температури за допомогою використання волоконно-оптичної технології. Вони базуються на принципі вимірювання теплового випромінювання тіла і використовують волоконно-оптичні канали для передачі сигналів.

Метод можна узагальнено розділити на внутрішні та зовнішні технології. Внутрішні техногії включають випадки, коли світло, що поширюється в оптичному волоконному елементі, залишається всередині волокна; в зовнішньому датчику світло взаємодіє безпосередньо з оточуючим середовищем. Безконтактні методи передбачають фізичне розділення волокна від матеріалу, який потрібно оцінити. Системи безконтактного оптичного вимірювання температури на основі волоконної оптики зазвичай є пірометрами з двома або трьома довжинами хвиль, які використовують кілька оптичних детекторів на декількох дискретних довжинах хвиль [12].



Рисунок 1.6 – Геометрія моделі передачі вимірювання [12]

Конфігурація системи визначається з урахуванням схеми показаної на рисунку 1.6. Випромінювання, що йде до волокна, коли воно перебуває у полі зору волокна, не враховується. Іншими словами, вважається, що випромінювання, коли пелета знаходиться у полі зору, залишається постійним від точки t<sub>1</sub> до точки t<sub>2</sub>.

Віддалена кінцева точка оптичного волокна вирівнюється так, щоб гарячий матеріал був в полі зору волокна. Падаюче світло розщеплюється волоконним спліттером, який незалежно подає кожному кількох 3 оптичних фільтрів/детекторів. Зміна температури матеріалу, який треба виміряти, призводить до зміни виходів різних детекторів, і за допомогою кривих випромінювання серединної сили, можна визначити температуру матеріалу.



Рисунок 1.7 – Схема волоконно-оптичного пірометру [12]

Схема роботи волоконно-оптичного пірометру показана на рисунку 1.7. Для збільшення випромінювального потоку, що потрапляє на детектори, збирається експериментальний пірометр з пучком, який складається з 120 волокон зі здібністю розподілення потужності довжиною 6 дюймів і діаметром 0,125 дюйма. Ядро волокон має діаметр 200 мкм, а оболонка - діаметр 250 мкм і виготовлена з цирконій-фториду. Цей пучок збільшить оптичний потужнісний бюджет на детекторах приблизно на 20 дБ порівняно з випадком з одним волокном, що було аналізовано у дослідженні фактору конфігурації.

Недоліком волоконно-оптичних пірометрів є складність вимірювання низьких значень температури з високою точністю і помірною швидкістю, що обмежує використання при вимірюванні температури полімерних композитів [13] або матеріалів з низьким коефіцієнтом випромінювання [14]. Ці матеріали обробляються за нижчих швидкостей, що призводить до меншого випромінювання і зниження температури процесу. У такому випадку важливо покращити співвідношення сигнал-шум (SNR). Для подолання цієї проблеми були розроблені деякі рішення, що працюють в діапазоні довжин хвиль від 1 до 4 мкм і використовують інфрачервоні волокна з великими діаметрами сердцевини [15] і охолоджені фотодетектори. Спектральна світність чорного тіла визначається відомим законом Планка. Якщо розглядається реальне тіло з коефіцієнтом випромінювання є, спектральну світність (L) можна виразити таким чином [16].

$$L(\lambda, T) = \frac{C_1 \cdot \varepsilon(\lambda, T)}{\lambda^5 \cdot (e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}})}$$
(1.7)

де λ – довжина хвилі, м;

 $C_1$  – константа випромінювання Планка, табличне значення якої становить 1,191 × 10<sup>8</sup> Вт·Cp<sup>-1</sup>·µм<sup>4</sup>·м<sup>-2</sup>;

 $C_2$  – константа випромінювання Планка, значення – 1,439 × 10<sup>4</sup> µм·К;

Т – відповідає абсолютній температурі тіла.

У деяких випадках для подолання впливу варіацій коефіцієнта випромінювання використовують двоколірні волоконно-оптичні пірометри, які вимірюють випромінювання на двох конкретних діапазонах довжин хвиль [17].



Рисунок 1.8 – Схема роботи двоколірного пірометра із волоконно-оптичним перемикачем [17]

Дизайн пірометра проілюстрованого на рисунку 1.8 включає волоконнооптичний перемикач, оптичний кабель і обидва фотодетектори з відповідними трансімпедансними підсилювачами, що забезпечують умови обробки сигналу. Активний елемент біля блока вимірювання відповідає волоконно-оптичному перемикачу. Він оптично живиться системою PoF і керується електричним квадратним сигналом для здійснення ввімкнення/вимкнення. Чи буде оптичний перемикач частиною системи обробки сигналу залежить від аналізу, який буде проводитись за допомогою пірометра. Система обробки сигналу розроблена з можливістю модуляції оптичного сигналу (ввімкнення/вимкнення) та просторового демультиплексування випромінювання, що видається гарячим об'єктом, на два спектральних діапазони з центральними довжинами хвиль 1.31 і 1.55 мкм відповідно.

Одним із сучасних волоконно-оптичних пірометрів є Advanced Energy's Sekidenko OR4000 мульти-канальний волоконно-оптичний пірометр з можливістю налаштування діапазону довжини хвилі та корекцією фіксованого коефіцієнта випромінювання при повторюваних температурах. Прилад створює конфігуровану довжину хвилі в залежності від типу матеріалу та необхідного діапазону температур.



Рисунок 1.9 – Зображення Advanced Energy's Sekidenko OR4000 [39]

Характеристики Advanced Energy's Sekidenko OR4000:

- Спектральна довжина хвилі: до 2300 нм
- Діапазон вимірювання температури: від 50 до 1600°С
- Робоча відстань від 3.9 до 118.1 дюйма
- Мінімальний час збору даних: 0,1 мс
- Чутливість до коливань: нечутливий до  $\pm 0,1$  градусів
- Точність ±1,5 °С
- Дисплей внутрішній, 4 х 20 LCD з клавіатурою введення
- Умови експлуатації: температура від 5 до 40°С, відносна вологість без конденсації [39].

Модель OR4000T забезпечує багатоканальне вимірювання температури, використовуючи до чотирьох незалежних робочих каналів, адаптованих до конкретних робочих вимог. Ця функція дозволяє проводити однакові інтегровані вимірювання в кількох камерах.

Недолік пов'язаний з дійсним середовищем передавання сигналу по оптичному волокну. Зміна середовища може впливати на якість передачі сигналу і спотворювати вимірювання температури.

Наприклад, якщо середовище передавання має змінну температуру, то коефіцієнт пропускання оптичного волокна може залежати від цієї температури і впливати на точність вимірювання. Крім того, зміна середовища може призводити до втрати сигналу, розсіювання чи затухання його інтенсивності, що також може впливати на точність вимірювання температури [18].

Для зменшення впливу зміни середовища, важливо підтримувати стабільні умови передавання сигналу по оптичному волокну, контролювати температуру середовища та використовувати компенсаційні методики для корекції вимірювань, які враховують вплив зміни середовища на сигнал.

Було досліджено чотири види оптичних пірометрів наведених в таблиці нижче.

	Класичний	Двоколірний	3 компенсацією	Волоконно-
	пірометр	пірометр	випромінювання	оптичний
Назва приладу	Mikron PhotriX	CAPELLA C311	Veeco DRT-210	Advanced
	Series ML-		RealTemp© 200	Energy's
	AAPX/088-		Manual Version 1.1	Sekidenko
	HXXX 310			OR4000
Довжина хвилі, нм	900	515	930	до 2300
Модуляція хвилі,	2	3,2	5,2	2
кГц				
Діапазон	310-2600°C	600-2500°C	450-1200°C	50-1600°C
вимірювання				
температури				
Швидкодія	1 мс	0.5 мс	0,1 мс	2 мс
Тип оптики	Фіксована	Регульована від	305 мм, 355 мм, 430	Індивідуально
		380 мм до 10 м	мм, може бути	регульована
			модифікована	
Спектральний	0,88 мкм	0.75-0.93 мкм та	400 до 1100 нм	400 до 950 нм
діапазон		0.93-1.1 мкм		
Точність	±0,01°C	±0,5 °C	±0,5 °C	±1,5 °C
Умови експлуатації	від 10 до 60°С	від 0 до 60°С	від 18 до 40°С	Від 5 до 40°С

Таблиця 1.1 – Порівняння оптичних пірометрів

### Висновки до розділу

Порівнюючи параметри пірометрів кожен з видів має свої переваги та недоліки, але саме характеристики пірометра з компенсацією випромінювання найбільше підходять для методу ГФЕ МОС.

Недоліком класичних пірометрів є необхідність постійно калібрувати пристрій на нове значення емісії. Якщо значення змінюється, то пристрій продовжує вимірювати зі старими даними.

Двопроменеві пірометри вимірюють температуру, використовуючи два детектори, один з яких вимірює температуру відображеного випромінювання, а інший - від прямого випромінювання. Параметри спектральної залежності матеріалу можуть стати причиною похибок при вимірювані. Волоконно-оптичні пірометри вимірюють температуру за допомогою волоконно-оптичного кабелю, який передає сигнал від датчика температури до приладу. Недоліком є те, що волоконно-оптичний кабель може впливати на точність вимірювання температури. Також зміна середовища передавання може спотворювати вимірювання температури через вплив на якість передачі сигналу. Пірометри з компенсацією випромінювання дозволяють зменшити вплив зміни середовища шляхом контролю стабільних умов передачі сигналу та використання компенсаційних методик для точної корекції вимірювань.

Проаналізувавши таблицю та теоретичні відомості наведені в першому розділі обрали для роботи з методом ГФЕ МОС пірометр із компенсацією випромінювання, адже під час росту плівок змінюється структура та рельєф поверхні. Пірометрія з компенсацією випромінювання компенсує зміну випромінювальної здатності підкладки під час росту плівки та враховує особливості роботи реакторів CVD для прецизійного вимірювання істинних значень температури під час осадження, сприяючи поліпшенню якості та ефективності виготовлених пристроїв.

# РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ГАЗОВОЇ ЕПІТАКСІЇ ТА ПІРОМЕТРІЇ З КОМПЕНСАЦІЄЮ ВИПРОМІНЮВАННЯ

2.1 Особливості застосування оптичного пірометра в процесі епітаксійного росту

Коефіцієнт емісії - це міра здатності об'єкта випромінювати інфрачервону енергію. Випромінювана енергія вказує на температуру об'єкта. Емісія може мати значення від 0 (блискуче дзеркало) до 1,0 (чорне тіло). Більшість органічних, пофарбованих або окислених поверхонь мають коефіцієнт випромінювання, близький до 0,95. Більшість датчиків мають функцію регулювання випромінювальної здатності для забезпечення точності під час вимірювання інших матеріалів, таких як блискучі метали.



Рисунок 2.1 – Схема отримання значень емісії об'єкту [24]

На рисунку 2.1 показана схема отримання значень температури. Епітаксія використовується для вирощування тонких шарів матеріалів на підкладках, і точний контроль температури в цьому процесі допомагає досягнути бажаної якості та структури шарів. Оптичні пірометри знайшли широке застосування в процесі епітаксійного росту за рахунок безконтактного вимірювання температури поверхні підкладки та росту шару.

Зміна температури пластини є одним із ключових параметрів при епітаксійному вирощуванні. Вона впливає на швидкість росту, склад потрійних і

четвертинних сполук та рівень легування. Постійне підтримання температури в реакторі покращує якість вирощеного шару та його структуру. Як наслідок, необхідний ретельний моніторинг і точний контроль температури пластин протягом усього процесу росту.

Крім того, оптичні пірометри можуть працювати в широкому спектральному діапазоні, що дозволяє вимірювати температуру в різних типах матеріалів та умовах. Вони також можуть бути налаштовані на конкретні діапазони довжин хвиль, враховуючи властивості матеріалу, що росте.

Звичайні пірометричні вимірювання на гетероструктурах без корекції випромінювальної здатності мають коливання, показані на рис. 2.2 [19].

Щоб побачити справжню температуру (TT), поєднують два методи:

- а) вимірювання інтенсивності теплового випромінювання світла
- б) рефлектометрія нормального падіння



Рисунок 2.2 – Різниця значень температури між невиправлено температурою (синім) і справжньою температурою (TT) [19]

Рис. 2.2 демонструє різницю між невиправленою температурою (синім) і справжньою температурою (TT), виміряною методом ЕСР.

Газова епітаксія з металоорганічних сполук є одним з різновидів газової епітаксії. Визначальною ознакою є використання в технологічному процесі вирощування тонких шарів металоорганічних сполук і гідридів як елементів росту. В процесі використовуються дуже тонкі шари атомів на напівпровідникових

пластинах для виробництва напівпровідникових пристроїв із складом елементів III-V груп.

Гідриди представляють собою сполуки, що складаються з різних елементів та водню. Для транспортування цих реагентів до зони росту плівки використовується газ-носій, який має бути чистим і не взаємодіяти з підкладкою та плівкою, що зростає. У сучасних установках МОС-гідридної епітаксії, в яких використовуються гідриди, головним носієм газу є водень, оскільки він є найчистішим газом, який широко застосовується в промисловості.

Металоорганічні сполуки, які застосовуються для вирощування напівпровідникових плівок, зазвичай перебувають у рідкому стані при кімнатній температурі, але деякі з них можуть бути твердими. Ці речовини мають високі парові тиски і можуть легко доставлятись до зони реакції шляхом пропускання газу-носія через рідину або над твердим матеріалом, які виконують роль джерела металоорганічних сполук.

Газові суміші та тримач з підкладками нагріваються високочастотним нагрівачем - генератором. Газова суміш нагрівається до високих температур біля поверхні підкладки, тоді як стінки реакційної камери залишаються прохолодними. Це забезпечує ріст плівки лише на нагрітих підкладках і запобігає забрудненню реактора, а також мінімізує втрати речовин на його поверхні [20].



Рисунок 2.3 – Схема вертикального реактора [20]

На рисунку 2.3 зображена схема вертикального реактора. У процесі МОСVD потік газу пропускають через нагріту пластину (при температурах від 400 °C до 1300 °C залежно від матеріалу, який буде нанесено). Потік газу містить такі молекули, як триметилгалій або аміак (TMGa, NH3), які розкладаються під дією тепла. Наприклад, один атом галію (Ga) і один атом азоту (N) на молекулупопередник виділяються для росту GaN і вбудовуються в кристал. Таким чином, кристалічний шар продовжується вгору атомний шар за атомним шаром. Кристалічний склад можна регулювати концентрацією молекул-попередників у потоці газу. Триметиліндій (TMIn) можна додати до газової фази для отримання шарів InGaN. Співвідношення In і Ga в шарі напівпровідника, таким чином, є результатом відносних концентрацій молекул-попередників у газовій фазі.

Щоб пірометрія працювала належним чином у середовищі МОСVD, підкладка або нанесені тонкі плівки мають бути непрозорими. Постійною проблемою вимірювання температури під час MOCVD нітридів групи III є дуже широке вікно пропускання сапфіру (найбільш широко використовуваної підкладки).



Рисунок 2.4 – Властивості пропускання інфрачервоного випромінювання (а) сапфіру, (б) аміаку та (в) аддукту ТМАІ:NH3, температура близько кімнатної [21]

Чорна крива на рис. 2.4 показує інфрачервоний спектр пропускання для сапфірової пластини товщиною 500 мм, яка демонструє непрозорість на довжинах хвиль понад 8 мм. Коли сапфір нагрівається, крива пропускання зміщується в бік коротших хвиль, забезпечуючи непрозорість в області 7–8 мм. Також варто відзначити, що в цьому діапазоні коефіцієнт випромінювання сапфіра дуже високий (е40,97). На щастя, це вікно довжини хвилі забезпечує мінімальні перешкоди від поглинання аміаку в газовій фазі, також зображене на рис. 2.4 (синя крива). Спектр був отриманий при кімнатній температурі зі значенням довжини шляху парціального тиску, еквівалентним 500 торр на 10 см, що є близьким до верхнього діапазону для умов, очікуваних під час росту GaN у реакторі МОСVD.

Стандартний MOCVD ріст GaN на сапфірі служить хорошим тестом продуктивності пірометра з компенсацією випромінювання через охоплений температурний діапазон і інтерференційні коливання, які є природними. Використовуючи значення інтерференційних коливань отримуємо оптичні константи GaN на 7,5 мм [21]. Порівняння виміряних оптичних констант GaN з відомими або прогнозованими значеннями також може служити вторинним тестом процедури калібрування коефіцієнта відбиття (вимірювання t).



Рисунок 2.5 – Відображення інфрачервоного діапазону під час росту GaN температурі (1050 °C); крива (а) без дозування Si (1,05 мм/год), крива (б) з дозуванням Si у концентрації 5.10<sup>18</sup> (1,30 мм/год) [22]

Результати двох типових циклів показані на рисунку 2.5. Після етапу високотемпературного відпалу H<sub>2</sub> вирощується низькотемпературний шар зародження GaN при 550 °C. Потім зразок нагрівають до 1050 °C і високотемпературний ріст GaN відновлюється на мітці «GaN on» на рисунку 2.2. GaN для кривої (a) ненавмисно легований, тоді як GaN для кривої (b) легований Si щоб отримати концентрацію носія ~ 5·10<sup>18</sup> см<sup>3</sup>. Під час цієї ранньої стадії росту поверхня зазвичай стає дуже шорсткою, і коефіцієнт відбиття на довжинах хвиль видимого діапазону падає майже до нуля [23]. Потім морфологія поверхні відновлюється (згладжується) і виникають інтерференційні коливання. Однак через знижену чутливість до шорсткості поверхні на середніх довжинах хвиль ІЧдіапазону ми не бачимо падіння відбивної здатності, коли зростання відновлюється при 1050 °C. Замість цього після короткої затримки коефіцієнт відбиття зростає і виникають інтерференційні коливання. Велика довжина хвилі виявлення означає, що інтерференційна частота коливань дуже низька (період 2 мм), тому, система корисна лише як монітор швидкості росту дуже товстих плівок [22].

### 2.2 Теорія пірометрії

Абсолютно чорне тіло - це об'єкт, який абсорбує всю радіацію, яка на нього падає, без відбиття або пропускання. Таке тіло не відбиває світло, тому воно здається абсолютно чорним для спостерігача. Виходячи з того, що АЧТ є ідеальним поглиначем, а тому й випромінювачем, то до нього співвідносять властивості реальних матеріалів. Найбільше наближення до АЧТ дає модель порожнини з вузьким отвором (апертурою) та непрозорими стінками з однаковою температурою внутрішньої поверхні, тобто знаходиться в термодинамічний рівновазі (рис.1.8). Порожнина не містить будь-яку речовину всередині, тому показник заломлення n=1 [26].



Рисунок 2.6 – Властивості порожнини АЧТ: а) повне поглинання, б) випромінювання із апертури, та в) опромінення АЧТ внутрішніх поверхонь [27]

Коли випромінювання проникає через отвір (рис. 2.6, а), воно відбивається декілька разів від внутрішньої поверхні, втрачаючи енергію з кожним відбиванням, повністю Згідно поглинеться. принципами термодинаміки, доки не 3 випромінювання, яке виходить з отвору, залежить від температури внутрішньої поверхні порожнини і відповідає випромінюванню чорного тіла (рис. 2.6, б). Оскільки випромінювання АЧТ ізотропно-дифузним, спектральне £ випромінювання L<sub>λ,b</sub>, що проходить через отвір, не залежить від напрямку. Крім того, поле випромінювання в порожнині, що виникає внаслідок комбінації випромінювання та відбивання від поверхні стінок, повинно мати ту саму форму, що і випромінювання, яке проходить через отвір (рис. 2.6, в) [28].

Фундаментальним виразом, що визначає властивості випромінювання абсолютно чорного тіла, є формула Планка:

$$E_{\lambda,T}^{o} = n_{\lambda}^{2} c_{1} \lambda^{-5} (e^{\frac{c_{2}}{\lambda T}} - 1)^{-1} \Delta \lambda \quad \text{BT/M}^{2}, \qquad (2.1)$$

де

$$c_1 = 2\pi h c^2 = 3,7413 \cdot 10^{-16} \text{ BT/M}^2;$$
 (2.2)

$$c_2 = \frac{hc}{k} = 1,438 \cdot 10^{-2}$$
 м · град (2.3)

с – швидкість світла у вакуумі;

h – постійна Планка;

k – Постійна Больцмана;

 $n_{\lambda}$  – показник заломлення середовища (по відношенню до вакууму), в якому поширюється випромінювання.

У переважній більшості випадків формулу Планка використовують для розрахунку властивостей випромінювання в повітрі, для якого показник заломлення дуже близький до одиниці і тому його не беруть до уваги. Однак при описі властивостей випромінювання в таких прозорих середовищах, як рідке скло, вода, важливо враховувати показник заломлення середовища [27].



Рисунок 2.7 – Графік для визначення параметрів формули Планка [28]

Формула Планка визначає яскравість абсолютно чорного тіла, тобто потужність енергії, що випромінюється одиницею поверхні з температурою Т усередині спектрального інтервалу  $\Delta\lambda$ , середина якого характеризується довжиною хвилі  $\lambda$ . Згідно з цією формулою з підвищенням температури збільшується випромінювальна здатність на всіх ділянках спектра. Це зростання є різним для різних інтервалів довжин хвиль.

Використовуючи цю формулу можна розрахувати розподіл енергії в спектрі чорного тіла при заданій температурі Т. Для зручності таких розрахунків формулу

Планка часто представляють в узагальнених координатах. Для цієї мети позначають:

$$\frac{\lambda T}{c_2} = \xi. \tag{2.4}$$

Отже частина виразу при (n=1), що визначає довжину ординати кривої розподілу, подається в вигляді:

$$\frac{c_2^5}{c_1} \cdot \frac{E_{\lambda}^0}{T^5} \,\xi^5\left(e^{\frac{1}{\xi}} - 1\right) = 1.$$
(2.5)

Тоді розраховуємо:

$$\frac{c_2^5}{c_1} \cdot \frac{E_{\lambda,T}^0}{T^5} = \eta. \tag{2.6}$$

Отримуємо:

$$\xi^{5}\left(e^{\frac{1}{\xi}}-1\right) = \eta^{-1}.$$
(2.7)

Саме таким методом можливо розрахувати потужність випромінювання чорного тіла для будь-якої довжини хвилі спектру. Формули Планка дозволяють формулювати такі положення про властивості випромінювання чорного тіла:

a) При підвищенні температури тіла його світність у всіх довжинах хвиль спектру дуже швидко зростає. Це має дуже велике значення для використання випромінювання тіл з метою вимірювання їхньої температури.

б) Під час зростання температури максимум кривої розподілу енергії випромінювання по спектру зміщується в бік коротких хвиль.

Вимірювання температури за допомогою оптичної пірометрії ґрунтується на тому факті, що спектральне випромінювання нагрітого тіла є функцією його температури. Рівняння випромінювання Планка встановлює зв'язок між спектральним випромінюванням та температурою:

$$N_{b\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5/\pi}}{e^{C_2/\lambda T} - 1},$$
(2.1)

де  $N_{b\lambda}$  — це спектральна яскравість на довжині хвилі чорного тіла при термодинамічній температурі Т;

b – нижній підпис для позначення властивостей АЧТ;

 $C_1$  – перша радіаційна константа для форми світимості  $C_1 = 2\pi h c_0^2$ ;

C2 – друга радіаційна константа  $C_2 = \frac{hc_0}{k_{\rm B}}$ .

За допомогою вимірювання  $N_{b\lambda}$ , враховуючи відомі інші параметри в рівнянні 2.1, можна визначити термодинамічну температуру чорного тіла. Проте вимірювання яскравості світла можуть бути не дуже точними. Щоб подолати обмеження, можна виміряти  $N_{b\lambda}$  відносно деякої стандартної спектральної яскравості. Таким чином, встановлюється температурна шкала на основі співвідношення двох спектральних яскравостей, одна з яких вибирається як еталон.

$$N_{b\lambda} \frac{N_{b\lambda}(t)}{N_{b\lambda}(t_{Au})} = \frac{e^{\frac{C_2}{\lambda(t_{Au}+T_0)}} - 1}{e^{\frac{C_2}{\lambda(t+T_0)}} - 1},$$
(2.2)

де  $N_{b\lambda}$  — це спектральна яскравість на довжині хвилі чорного тіла при термодинамічній температурі Т;

t<sub>Au</sub> – золота точка, 1063 °С;

t0-початкова температура, 273,15°С;

 $C_2$  – друга радіаційна константа  $C_2 = \frac{hc_0}{k_{\rm R}}$ .

Калібрування спираючись на дві спектральні яскравості надає перевагу в більш точному вимірювані при термодинамічній температур Т. На практиці важливо підібрати довжину хвилі для скінченної спектральної смуги, для отримання точних результатів.

# 2.3 Пірометр з компенсацією випромінювання. Функціональна схема пірометра

Пірометрія з компенсацією випромінювальної здатності є ефективним методом для безконтактного вимірювання температури поверхонь з, що змінюються в часі. Використовуючи оптичну пірометрію під час процесу MOCVD ми стикаємось із наступними проблемами: фіксування випромінювальної здатності пластини в часі, швидкою зміною розташування плями вимірювання від поверхні пластини до тримача, а також можливими похибками через енергію випромінення нагрівача та енергію, що відбивається від внутрішніх поверхонь камери реактора.

Пірометр з компенсацією випромінювання вирішує ці проблеми за рахунок відсутності інтерференції між вимірювальним приладом та процесом, що вимірюється.

Блок-схема пірометра з однією довжиною хвилі та кремнієвим фотодіодом в якості детектору зображена на рисунку 2.8. Добуток площі плями вимірювання А та тілесного кута збору Ω оптичної системи визначає амплітуду вихідного сигналу.



Рисунок 2.8 – Блок-схема пірометра [29]

Детальніше про кожен об'єкт зі схеми 2.8:

1. Оптична система

- Оптична система забезпечує точне збирання і фокусування інфрачервоного випромінювання від об'єкта на інтерференційний фільтр та фотоприймач.

- Датчик IЧ випромінювання перетворює вхідне випромінювання на електричний сигнал, який відображає інтенсивність випромінювання. Вихідний сигнал з датчика залежить від температури об'єкта та емісійного коефіцієнту матеріалу об'єкта.

2. Електронний блок:

- Трансіпедансний підсилювач підсилює слабкий електричний сигнал з Si фотодіоду.

- АЦП перетворює аналоговий сигнал з трансімпедансного підсилювача на цифровий сигнал, який можна обробляти цифровими алгоритмами.

- Персональний комп'ютер керує роботою пірометра. Він отримує цифровий сигнал від АЦП та виконує необхідні обчислення для вимірювання температури. Такі обчислення можуть включати калібрування, компенсацію фонового випромінювання і перетворення цифрових даних в фізичні величини температури.

Для подальшої цифрової обробки та візуалізації даних програмним забезпеченням на персональному комп'ютері використовується формула енергетичної яскравості за законом Планка:

$$L_b(\lambda, T)d\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(e^{\left(\frac{c_2}{\lambda} T\right)} - 1\right)} d\lambda$$
(2.3)

де λ-довжина хвилі світла, нм;

 $c_1 = 1.19 \times 10^{16}$  – перша радіаційна константа, Вт см<sup>2</sup> ср<sup>-1</sup> нм<sup>4</sup>;

 $c2 = 1.43888 \times 10^7$  – друга радіаційна константа, нм °К.

Значення сигналу, що отримується від пірометра, залежить від температури об'єкта і може варіюватись від десятків пікоамперів при низьких температурах – 450 °C до десятків наноамперів при високих температурах близько 700 °C.

Для забезпечення високої чутливості в широкому діапазоні температур, необхідно мати блок обробки сигналу з широким динамічним діапазоном, що може враховувати такі низькі рівні сигналу. Проте, це може підвищити вартість та ускладнити схему пірометра через необхідність більш складного електронного обладнання.

Також, величина сигналу теплового випромінювання пропорційна ширині спектральної смуги, яку може виміряти фотодетектор (ФД). Існує постійний баланс між силою сигналу та необхідністю зберігати ширину спектральної смуги якомога меншою. Широка спектральна смуга може призводити до похибок вимірювання. Форма кривої яскравості об'єкта впливає на пропускання сигналу через довгохвильову частину інтерференційного смугового фільтра, що також може впливати на точність вимірювання.



Рисунок 2.9 – Функціональна схема пірометра з методом компенсації випромінювання

В схемі на рис. 2.9 використано метод компенсації випромінювання, який використовує фотодіод для вимірювання ступеня дзеркального відбиття зразка незалежно. Світло проходить через систему дзеркал розташованих під кутом 45 градусів, і надходить на дільник променю, 20% якого йде на фотодіод зворотного зв'язку та близько 80% на поверхню пластини в реакторі. Інтерференційні фільтри

спектр випромінювання. Вілбите світло, разом із звужують тепловим випромінюванням надходить на головний фотоприймач. Фотодіод зворотного зв'язку потрібен для нормування потужності світлодіода та перетворення електричний теплового випромінювання на сигнал. Струмовий сигнал перетворюється на пропорційну напругу за допомогою розробленої схеми трансімпедансного підсилювача. Сигнали подаються на АЦП мікроконтроллера та передаються через СОМ-порт на комп'ютер, де відбувається візуалізуція даних.



Рисунок 2.10 – Графік вихідного сигналу на фотодіоді

На рисунку 2.10 зображено графік залежності напруги від часу вихідного сигналу фотодіоду. Вхідний оптичний сигнал модулювався за допомогою генератора оптичних імпульсів ОГ5-87 та лазерного діода з довжиною хвилі випромінювання 950 нм.

Класично для оптичних піромерів використовується лазер в якості оптичного джерела випромінювання. Через явище інтерференції було обрано світлодіод, адже при використані світлодіода пучок не відображається додатково на поверхнях відбиття.

Для стабілізації характеристик фотоприймача кремнієвий фотодіод зворотнього зв'язку, що є високочутливим напівпровідниковим детектором теплового вимірювання, поміщено в ізольоване середовище з контролем температури. Через здатність виявляти сигнал навіть при дуже низьких рівнях вхідних потужностей, а також можливості забезпечувати ширший динамічний діапазон вимірювання ФД використовується для вимірювання вихідного сигналу пірометра після проходження через інтерференційний фільтр. Основний фотодіод в цьому випадку виступає в ролі датчика сигналу, який реагує на випромінювання від об'єкта.

### Висновки до розділу

Було розглянуто особливості застосування оптичного пірометру в методі металоорганічного хімічного осадження із газової фази. Епітаксіальне осадження складних напівпровідників має проводитись із високою точністю температури процесу. Оптичні пірометри можуть працювати в широкому спектральному діапазоні, що дозволяє вимірювати температуру в різних типах матеріалів та умовах. Забезпечуючи повторюваність температури  $\pm 0,25$  °C.

Обраний в розділі 1 вид оптичної пірометрії з компенсацією випромінювання було досліджено та виявлено, що пірометр з компенсацією випромінювання за рахунок відсутності інтерференції між вимірювальним приладом та процесом, що вимірюється найбільш підходить для роботи з напівпровідниками в процесі MOCVD.

Було розглянуто блок-схему пірометра з однією довжиною хвилі та кремнієвим фотодіодом в якості детектору. На основі якої побудовано функціональну схему пірометра з компенсацією випромінювання. Описаний принцип роботи приладу з використанням фотодіоду зворотного зв'язку для стабілізації значення оптичної потужності світлодіода в вузькому спектральному діапазоні (930 нм).

# РОЗДІЛ З. ДЖЕРЕЛО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ ОПТИЧНОГО ПІРОМЕТРА

### 3.1 Світлодіод як точкове джерело

Світлодіод є напівпровідниковим пристроєм, який випромінює інфрачервоне або видиме світло при проходження електричного струму. Для цього дірки з робласті рекомбінують з електронами з напівпровідників n-області, створюючи світло. Довжина хвилі випромінюваного світла залежить від ширини забороненої зони напівпровідникового матеріалу. Твердіші матеріали з міцнішими молекулярними зв'язками зазвичай мають ширшу заборонену зону.

Матеріалом, який найчастіше використовується в світлодіодах, є арсенід галію, хоча існує багато варіацій цієї основної сполуки, наприклад арсенід алюмінію галію або фосфід алюмінію галію індію. Ці сполуки належать до III-V групи напівпровідників. Змінюючи склад напівпровідника, можна змінити довжину хвилі випромінення. Світлодіодне випромінювання зазвичай знаходиться у видимій частині спектру (з довжиною хвилі від 0,4 до 0,7 мікрометра) або в ближньому інфрачервоному діапазоні (з довжиною хвилі від 0,7 до 2,0 мікрометра). Прикладена напруга в більшості світлодіодів досить низька, в районі 2,0 вольт [37].

Параметри та характеристики світлодіода можливо розділити на вхідні і вихідні. Вхідні:

- прямий струм через світлодіод *I*<sub>np</sub>;
- пряме спадання напруги при номінальному струмі *U*<sub>*np*</sub>;
- максимально припустима зворотна напруга U<sub>зв.макс</sub>;
- вольт-амперна характеристика (залежність прямого спадання напруги від струму).

Будь-який світлодіод може бути змодельований як спрямоване точкове джерело в дальньому полі, можна використовувати таку модель для аналізу його властивостей, наприклад, ширини пучка світла, освітленості та інших параметрів, що впливають на дизайн оптичних систем, в яких використовується світлодіод. Коли промінь стає практично паралельним тоді таку відстань називають дальним полем. В цій області світло розповсюджується практично прямолінійно і може бути описане як пучок паралельних променів. Це дозволяє спростити розрахунки і моделювання в оптичних системах, таких як лінзи, дзеркала або оптичні прилади.

Інтенсивність випромінювання у заданій точці, що вимірюється в одиницях Вт/см<sup>2</sup>, визначається її полярними координатами, тобто відстанню від цієї точки до світлодіода та кутом між ним та горизонтальною площиною. Щоб знайти повну оптичну потужность світлодіода необхідно обчислити інтеграл від інтенсивності випромінювання по всій поверхні сфери

$$P = \iint_{A\lambda} I(\lambda) d\lambda dA, \qquad (3.1)$$

де I ( $\lambda$ ) – спектральна інтенсивність випромінювання, Вт/(нм·см<sup>2</sup>),

А – площа поверхні сфери.

Одним із факторів, що впливають на просторову інтенсивність світла є показник заломлення створений повітряним шаром світлодіода. Для планарних діодів на основі матеріалів з високими значеннями показників заломлення характерний ламбертівський розподіл випромінювання.



Рисунок 3.1 – Геометрична модель для рівняння ломбертівського розподілу [38]

Розглянемо рисунок 3.1, де світло випромінюється в межах кута d $\varphi$  показано як точкове джерело випромінювання, що розташоване нижче межі розділу напівпровідник-повітря. Промінь, що виходить із джерела світла під кутом  $\varphi$  з нормаллю до поверхні розділу, заломлюється під кутом  $\Phi$  по відношенню до нормалі. Кути  $\varphi$  та  $\Phi$  зв'язані законом Снеліуса, тому для малих кутів  $\varphi$  (sin  $\varphi \approx \varphi$ ) можна записати співвідношення:

$$\overline{n_s} \cdot \sin\varphi \approx \overline{n_s} \cdot \varphi = \overline{n_{air}} \cdot \sin\Phi \tag{3.2}$$

Активна область ідеального світлодіода випромінює по одному фотону за кожен електрон, який вводиться в неї. Іншими словами, кожен електрон породжує один світловий квант або фотон. Тому квантовий вихід випромінювання активної області ідеального світлодіода дорівнює одиниці. Внутрішній квантовий вихід випромінювання світлодіода, також відомий як внутрішня ефективність, визначається співвідношенням кількості фотонів, що генеруються в його активній області, до кількості електронів, які вводяться в цю область за одиницю часу.

Одним зі шляхів щоб параметри світлодіода були стабільними є зменшення температури ззовні [38].

## 3.2 Вимірювання параметрів світлодіода

У вимірювані було використано світлодіод з максимальною потужністю 55 мВт та розміром активної площі мікросхеми 0.3×0.3 мм<sup>2</sup>. Який для безперебійної роботи функціонує в напівномінальному режимі 50 мА. Робоча температура 25 °C.

Вимірювання відносного спектрального розподілу енергії та ширини спектру випромінювання. Принцип вимірювання базований на порівнянні спектрального розподілу енергії випромінювача та зразкового джерела випромінювання. Значення прямого струму через випромінювач відповідає встановленому в стандартах для випромінювачей.



Рисунок 3.2 – Структурна схема установки: G – генератор струму; D – випромінювач (який перевіряємо або зразковий); B – фотоприймач; PA – вимірювач струму; X1, X2 – контакти підключення випромінювача; L – відстань від випромінювача до фотоприймача; M – монохроматор

Генератор струму забезпечував створення та підтримку струму через випромінювач з похибкою ±2%. В якості зразкового випромінювача було використано зразкову світловимірюючу лампу розжарювання 3-го розряду по ГОСТ 8.023–74. Монохроматор було використано як спектральний прилад, перед цим його було проградуйовано. Було зафіксовано значення похибки 2,5-3% в ширині спектра випромінювача. Всі похибки були враховані під час математичних обрахунків результатів.

Оскільки ширина вхідної щілини не може бути більшою за ширину вихідної щілини, то було створено умови за яких випромінювання при виході спектрального приладу було достатньо великим для реєстрації його фотоприймачем.

Спектральну величину щілини було вирахувано по формулі:

$$\Delta\lambda_{0,5} = \frac{\frac{b}{dl}}{d\lambda},\tag{3.3}$$

де b – ширина щільни, мм;

 $\frac{dl}{d\lambda}$  – лінійна дисперсія спектрального приладу, мм/нм.

Перед вимірюваннями було жорстко зафіксовано фотоприймач відносно монохроматора, для того, щоб весь потік випромінювання з вихідної щілини

потрапляв на фотоприймач. Після чого було встановлено перед вхідною щілиною монохроматора конденсор.

Показник n реєструючого приладу для довжини хвилі λ був знятий за двох умов:

- Зразковим джерелом n<sub>0</sub>, при освітлені вхідної щілини спектрального приладу;
- Вимірюючим джерелом n<sub>x</sub> при освітлені вхідної щілини спектрального приладу.

Вимірювання було проведено по всьому спектральному діапазону випромінювання в 10 точках кожні 10 нм.

Для кожної довжини хвилі λ було обраховано щільність енергії випромінювання е<sub>λх</sub> випромінювача, що ми вимірюємо за формулою:

$$e_{\lambda x} = \frac{n_{x\lambda}}{n_{o\lambda}} e_{\lambda 0}, \qquad (3.4)$$

де е<sub>0</sub>, – відносна спектральна щільність енергії випромінювання зразкового джерела.

Будуємо відносну спектральну характеристику:

$$e_{\chi}(\lambda) = f\left(\frac{e_{\lambda\chi}}{e_{\lambda max}}\right),\tag{3.5}$$

де е<sub>λmax</sub> – максимальна відносна спектральна щільність енергії випромінювання вимірюваного джерела, який ми вираховуємо за формулою (3.4).

По відносній спектральній характеристиці було знайдено довжину хвилі  $\lambda_{max}$ , що відповідає максимальній спектральній щільності енергії випромінювання вимірюваного джерела, та ширину спектра  $\Delta\lambda_{0,5}$ .

Отримані дані занесли до таблиць:

Таблиця 3.1 Характеристики світлодіода при 100 мА

Пікова довжина хвилі	950 нм
Центроїдна довжина хвилі	940 нм
Спектральна смуга пропускання при 50% I <sub>rel,max</sub>	42 нм

0 $800$ 5,67 $875$ 10,23 $888$ 14,66 $895$ 20,12 $900$ 24,89 $905$ 29,78 $909$ 32,56 $912$ 35,02 $914$ 37,81 $916$ 41,01 $918$ 45,00 $922$ 48,09 $924$ 50,76 $926$ 56,51 $930$ 60,03 $932$ 64,89 $935$ 68,00 $937$ 72,12 $938$ 74,34 $939$ 77,30 $940$ $80,38$ $941$	I, %	λ, нм
5,67 $875$ $10,23$ $888$ $14,66$ $895$ $20,12$ $900$ $24,89$ $905$ $29,78$ $909$ $32,56$ $912$ $35,02$ $914$ $37,81$ $916$ $41,01$ $918$ $45,00$ $922$ $48,09$ $924$ $50,76$ $926$ $56,51$ $930$ $60,03$ $932$ $64,89$ $935$ $68,00$ $937$ $72,12$ $938$ $74,34$ $939$ $77,30$ $940$ $80,38$ $941$	0	800
10,23 $888$ $14,66$ $895$ $20,12$ $900$ $24,89$ $905$ $29,78$ $909$ $32,56$ $912$ $35,02$ $914$ $37,81$ $916$ $41,01$ $918$ $45,00$ $922$ $48,09$ $924$ $50,76$ $926$ $56,51$ $930$ $60,03$ $932$ $64,89$ $935$ $68,00$ $937$ $72,12$ $938$ $74,34$ $939$ $77,30$ $940$ $80,38$ $941$	5,67	875
14,66 $895$ $20,12$ $900$ $24,89$ $905$ $29,78$ $909$ $32,56$ $912$ $35,02$ $914$ $37,81$ $916$ $41,01$ $918$ $45,00$ $922$ $48,09$ $924$ $50,76$ $926$ $56,51$ $930$ $60,03$ $932$ $64,89$ $935$ $68,00$ $937$ $72,12$ $938$ $74,34$ $939$ $77,30$ $940$ $80,38$ $941$	10,23	888
20,12 $900$ $24,89$ $905$ $29,78$ $909$ $32,56$ $912$ $35,02$ $914$ $37,81$ $916$ $41,01$ $918$ $45,00$ $922$ $48,09$ $924$ $50,76$ $926$ $56,51$ $930$ $60,03$ $932$ $64,89$ $935$ $68,00$ $937$ $72,12$ $938$ $74,34$ $939$ $77,30$ $940$ $80,38$ $941$	14,66	895
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	20,12	900
29,78 $909$ $32,56$ $912$ $35,02$ $914$ $37,81$ $916$ $41,01$ $918$ $45,00$ $922$ $48,09$ $924$ $50,76$ $926$ $56,51$ $930$ $60,03$ $932$ $64,89$ $935$ $68,00$ $937$ $72,12$ $938$ $74,34$ $939$ $77,30$ $940$ $80,38$ $941$	24,89	905
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	29,78	909
35,0291437,8191641,0191845,0092248,0992450,7692656,5193060,0393264,8993568,0093772,1293874,3493977,3094080,38941	32,56	912
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	35,02	914
41,0191845,0092248,0992450,7692656,5193060,0393264,8993568,0093772,1293874,3493977,3094080,38941	37,81	916
45,0092248,0992450,7692656,5193060,0393264,8993568,0093772,1293874,3493977,3094080,38941	41,01	918
48,0992450,7692656,5193060,0393264,8993568,0093772,1293874,3493977,3094080,38941	45,00	922
50,76       926         56,51       930         60,03       932         64,89       935         68,00       937         72,12       938         74,34       939         77,30       940         80,38       941	48,09	924
56,51       930         60,03       932         64,89       935         68,00       937         72,12       938         74,34       939         77,30       940         80,38       941	50,76	926
60,0393264,8993568,0093772,1293874,3493977,3094080,38941	56,51	930
64,8993568,0093772,1293874,3493977,3094080,38941	60,03	932
68,00       937         72,12       938         74,34       939         77,30       940         80,38       941	64,89	935
72,12       938         74,34       939         77,30       940         80,38       941	68,00	937
74,34       939         77,30       940         80,38       941	72,12	938
77,30     940       80,38     941	74,34	939
80,38 941	77,30	940
	80,38	941

Таблиця 3.2 Отримані значення під час вимірювання потужності випромінювання

I, %	λ, нм
84,91	943
90,00	945
94,09	947
100,01	950
94,98	955
90,13	958
84,46	960
80,52	961
75,00	962
69,63	962,5
65,02	963
60,38	964
54,89	965
40,01	967
35,23	968
29,04	970
25,24	971,5
18,53	975
9,33	979
5,00	985
1,89	1000
0	1025

Випромінювання світлодіоду не є строго монохроматичним адже ширина спектральної смуги випромінювання складає 42 нм (за рівнем 0,5). Положення

максимуму випромінювання слабко залежить від прямого струму СД і від температури p-n-переходу (близько 0,05 нм/К ).



Рисунок 3.3 – Графік залежності інтенсивність від довжини хвилі

На рисунку 3.3 зображено відносне спектральне випромінювання світлодіода при 100 мА. Спектральний діапазон був нормований відносно пікової довжини хвилі.

Висока часова роздільна здатність забезпечує високу просторову роздільну здатність профілів відбиття/температури під час обертання пластини. Також виміряно частотні характеристики на світлодіоді при струмі 100 мА та опорі 50 Ом, а саме:

Час наростання – 12 нс Час спаду – 12 нс

47

Вимірювання інтенсивності. Важливим параметром для вибору точкового джерела випромінювання є сила світла. Просторову щільність світлового потоку в заданому напрямку визначають відношенням:

$$I_e = K \cdot I_{\phi} , \qquad (3.6)$$

де  $I_{\Phi}$  – струм у ланцюгу фотоприймача, А;

К – коефіцієнт у Вт/(ср·А), що враховує характеристики фотоприймача та конструктивні особливості з вимірювальної установки та визначається за формулою:

$$K = \frac{I}{\Omega \cdot S} \cong \frac{L^2}{A \cdot S},\tag{3.7}$$

де Ω – тілесний кут, в рамках якого вимірюють силу випромінювання, cp;

S – чуттєвість фотоприймача, А/Вт;

L – відстань від випромінювача до приймального майданчика фотоприймача, м;

А – площа приймальної площадки фотоприймача, м<sup>2</sup>.



Рисунок 3.4 – Структурна схема установки: G – генератор струму; D – випромінювач; B – фотоприймач; PA – вимірювач струму; X1, X2 – контакти підключення випромінювача; L – відстань від випромінювача до фотоприймача

Вимірювання сили випромінювання світлодіоду проводилось на установці структурна схема якої зображена на рис. 3.4. Вимірюючи електричний сигнал на виході з фотоприймача з відомою чутливістю при впливі на фотоприймач потоку випромінювання від випромінювача при відомому куті.

Генератор струму G задає та підтримує надання прямого струму через випромінювач з похибкою в межах ±5%. Частоту та тривалість імпульсів на генераторі прямокутних імпульсів струму було обрано згідно із умови забезпечення квазіімпульсного режиму, 6 кГц. Значення тілесного кута 0,03 ср.

Випромінювач під'єднаний до контактів X1 та X2 вимірювальної установки (рис. 3.2), встановлено струм через випромінювач, струм вимірюємо вимірювачем РА.



Рисунок 3.5 – Графік залежності інтенсивності від струму на світлодіоді

На рисунку 3.5 зображено відносну інтенсивність випромінювання одиничного імпульсу. Залежність функції струму від струму на світлодіоді. Одиниця дорівнювнює інтенсивності при струмі 100 мілі ампер. Отримана типова характеристика в логарифмічному маштабі є лінійною.

Пряма напруга вимірювання. Пряма напруга може бути виміряна за допомогою вимірювача кривої або статично, як показано на рисунку 3.6. Джерело постійного струму генерує заданий прямий струм для світлодіода. Напруга на компоненті вимірюється цифровим вольтметром. Використання окремих контактів для струму та напруги дозволяє уникнути похибок вимірювання через опори контактів.

Пряма напруга світлодіодів падає зі збільшенням температури. Температурний коефіцієнт для світлодіодів усіх кольорів становить від –1,5 до –2,5 мВ/градус.



Рисунок 3.6 – Структурна схема установки для вимірювання прямої напруги на світлодіоді

Вимірюючи пряму напругу при струмі 100 мА та часі 20 мс отримали типове значення 1.5В, а максимальне 1.7В. В свою чергу при вимірах із струмом 1А та часом 100 мкс типове значення – 2.3В, а максимальне досягло 2.9В. Температурний коєфіцієнт напруги -1.3 мВ/К.



Рисунок 3.7 – Графік залежності прямого струму від напруги

На рис. 3.7 показана залежність прямої напруги на діоді від ширини забороненої зони при струмі через діод 50 мА.

Оптимальний вибір хвилі для детектування полягає в знаходженні компромісу між використанням довжини хвилі, яка забезпечує достатньо сильний сигнал, та зниженням рівня шуму фотоприймача, щоб підтримувати шум на значно нижчому рівні, ніж бажана температурна залежність. Аналізуючи спектральну фоточутливість світлодіода довжина хвилі в 930 нм надає максимально великий відгук та мінімальні зміни фотодіоду зі зміною температури. Якщо обрати довжину хвилі 940 нм, що є центральною то при підвищенні температури - інтенсивність буде падати. Тому була обрана довжина хвилі для кремнієвого фотоприймача в 930 нм.

### 3.3 Схема колімації для пірометра-рефлектрометра

Коліматор, пристрій для перетворення розбіжного світла або іншого випромінювання від точкового джерела в паралельний пучок. Колімація світла необхідна для проведення спеціальних вимірювань у спектроскопії та геометричній і фізичній оптиці.

Коліматор складається з об'єктиву або дзеркала і вміщеного в його фокальній площині освітленого предмета, яким може служити непрозора діафрагма з отвором будь-якої форми (наприклад, вузька прозора щілина постійної або змінної ширини), перехрестя ниток, шкала або інша марка на світлому або темному полі. Об'єктив і предмет укріплені в зачорненій трубі (або в корпусі іншої форми). Випромінювання, що входить в отвір, виходить з коліматора у вигляді паралельного пучка, тому зображення можна переглядати без паралакса. Світло від джерела світла фокусується на цю щілину іншою лінзою з такою ж фокусною відстанню, і щілина служить об'єктом, що світиться оптичної системи [34] На рисунку 3.1 схематично зображено принцип роботи класичного коліматора.

Кінцевість розмірів предмету є причиною розбіжності пучків променів, що виходять із різних точок. Фокусна відстань, вільний отвір та якість виправлення

аберацій об'єктива, а також форма та розміри предмета вибираються відповідно до призначення коліматора та умов його використання.



Рисунок 3.8 Розповсюдження променів через лінзу [34]

Інтенсивність випромінюваного пучка світла від коліматора зменшується зі збільшенням фокусної відстані. Більша фокусна відстань впливає на механічні розширення трубки. Умови освітлення є більш сприятливими, коли використовуються великі отвори, а оцінка результатів легша та точніша. Коліматор із фіксованим налаштуванням відстані є більш доцільним, адже в нас є скінчена довжина пучка.



Рисунок 3.9 – Оптичні схеми коліматорів, де 1 – джерело світла, 2 – конденсор I, 3 – діафрагма, 4 – конденсор II, 5 – фотоелемент [35]

На рисунку 3.9 зображені схеми компенсаторів чотирьох типів конструкцій.

Коефіцієнтом світлопропускання  $\tau$  оптичного приладу називається відношення світлового потоку  $\Phi_{\tau}$ , що виходить з приладу і утворює зображення предмета, до світлового потоку  $\Phi_0$  від цього предмета, який входить у випробувану систему:

$$\tau = \Phi_{\tau} / \Phi_0. \tag{3.1}$$

Комбінація коліматора та генератора об'єктів проектує тестову ціль під певним нахиленим кутом залежно від фокусної відстані коліматора. Цей кут має відповідати одному із цих критеріїв: бути досить малим, щоб вважатися обмеженим дифракцією. Або щоб відповідна математична поправки на максимальній цікавій просторовій частоті вважалася незначною.

Для дифракційної обмеженої проекції під час оптичного тестування наступна умова повинна відповідати емпіричній умові:

$$F_C \ge 4 \cdot \frac{W_T \cdot E}{2,44 \cdot \lambda}, \qquad (3.2)$$

де: F<sub>C</sub> – ефективна фокусна відстань коліматора;

W<sub>T</sub> – характерний розмір мішені;

Е – діаметр вхідної зіниці досліджуваної оптичної системи;

λ – довжина хвилі, яка використовується для тестування.

Контроль центрування коліматорів та зорових труб виконується за допомогою іншого коліматора. При центруванні коліматора і зорових труб з іншого коліматора останній сам повинен бути точно центрований. Оптичні осі коліматорів повинні бути паралельні, для чого обидва прилади встановлюють або горизонтально, наприклад, за допомогою рівнів 3 і 4 (рис. 3.3), або вертикально за допомогою схилу [35].



Рисунок 3.10 – Схема центрування коліматора [35]

Була розроблена оптична схема роботи для процесу створення шарів під час газової епітаксії. Джерелом випромінювання є термостабілізований світлодіод з довжиною хвилі 930 нм та частотою модуляції 5,2 кГц. Фотодетектор монітора разом із схемою керування живленням підтримує стабільність живлення світлоліолів. Головний фотодетектор вимірює інтенсивність теплового випромінювання пластин та інтенсивність світлодіодного світла, відбитого пластинами. Алгоритм обробки цифрових даних виділяє дані про відбивну здатність і випромінювання з необробленого сигналу з низьким рівнем шуму та високою роздільною здатністю за часом. Для вимірювання точної потужність стабільного постійною створюються умови джерела випромінювання i3 потужністю.



Рисунок 3.11 – Оптична схема коліматора

В основі оптичної схеми зображеної на рисунку 3.11 було закладено оптичну схему коліматора (рис. 3.9 (б)). Зі світлодіода направляється пучок променів, що шляхом повздовжнього переміщення окуляром приладу потрапляє на отвір діафрагми діаметром 150 мкм. Діаметр обирався такого розміру, щоб проходячи світловий потік формував зображення точкового отвору. Після чого пучок потрапляє на об'єктив. Частина променів потрапляє фотодіод зворотного зв'язку, завданням якого є стабілізувати потужність (повпливавши на деградацію та зміну температури).

Коліматор зосереджує світловий пучок зі світлодіода, забезпечуючи концентрацію променевого потоку та зменшуючи його розсіювання, для отримання більш точного та прецензійного вимірювання температури об'єкта. Крім того, коліматор допомагає елімінувати вплив зовнішнього освітлення, яке може спотворити вимірювання. Це досягається фокусуванням світлового пучка лише на цільовій області та відсіканням зайвого світла. А також, коліматор забезпечує рівномірне освітлення поверхні об'єкта шляхом коригування неоднорідностей світлового потоку зі світлодіода.

### Висновки до розділу

Металоорганічне хімічне осадження з використанням парової фази (ГФЕ MOC) є важливою технологією для отримання тонких епітаксіальних структур, і точний контроль температури процесу є критичним для забезпечення якості та швидкості росту.

Під час використання ГФЕ МОС для епітаксіального росту, джерелами похибок є паразитне відбивання від поверхонь реактора, похибки в вимірюванні відбивальної здатності підкладки та спектральна невідповідність джерела випромінювання рефлектометра. Об'єктив коліматора зосереджує світловий пучок без його поглинання та розсіювання, допомагає зменшити ці похибки. Вибір довжини хвилі для вимірювання повинен бути здійснений з урахуванням потрібної сили оптичного сигналу та залежності ампер-ватної чутливості фотодіоду від

темпратури. Оптична схема, розроблена для цього дослідження, забезпечує формування світлового пучка довжиною хвилі 930 нм із діаметром 5 мм. Точковим джерелом випромінювання є світлодіод, пучок якого колімуєтеся під час проходження через оптичну систему.

Отримані експериментальні дані характеристик світлодіоду відповідають початковим даним дослідження.

#### ВИСНОВКИ

Процес газофазної епітаксії з металоорганічних сполук (ГФЕ МОС) є досить поширеним та актуальним на сьогоднішній день процесом вирощування гетероструктур. В процесі відбувається осадження потоку газу, який пропускають через нагріту пластину, в залежності від напівпровідникового матеріалу осадження при температурах від 450 до 1200°С, в залежності від технологічного рецепту. Особлива увага приділяється складу та пропорції газового потоку в реакторі, а також однорідності розподілу температури на поверхні пластини, на якій відбувається епітаксійний ріст.

Для прецизійного контролю температури протягом всього процесу застосовують оптичні пірометри з компенсацією випромінювання, що в свою чергу дозволяє враховувати зміни емісії поверхні підкладки за допомогою рефлектометра. В даній роботі розглянуто та досліджено джерело випромінювання системи пірометрії з компенсацією випромінювання.

В якості випромінювача було використано інфрачервоний світлодіод з піковою довжиною хвилі 950 нм. Оскільки фотодіод є точковим джерелом світла, була спроектована та досліджена оптична схема колімації. Для забезпечення прецизійної компенсації випромінювання та обрахунків, спроектована оптична система колімації переносить зображення з площі кристала на поверхню пластини. В результаті отримано рівномірний потік випромінювання діаметром 5 мм.

Світлодіод функціонує в імпульсному режимі при струмі в 50мА. Отримані значення, що були виміряні оброблено та занесено до таблиць, складено графіки: залежність сили світла від довжини, логарифмічна залежність інтенсивності, залежності прямого струму від напруги. Вимірювання відносного спектрального розподілу проводилось за допомогою порівняння спектрального розподілу енергії випромінювача та зразкового джерела випромінювання при кімнатній температурі 25 °C було зафіксовано залежність сила світла від довжини хвилі, на довжинах 800-1025 нм. Спираючись на отриманні експериментальні значення випромінювання світлодіоду не є монохроматичним, ширина забороненої смуги сягає 10 нм.

Положення максимуму випромінювання слабко залежить від прямого струму світлодіоду та від температури p-n-переходу — 0,5 нм/К. Проаналізувавши спектральну фоточутливість світлодіода було надано перевагу довжині хвилі в 930 нм, адже таке значення має максимально великий відгук та мінімальні зміни фотодіоду зі зміною температури.

Блок зворотного оптичного зв'язку пірометричної системи забезпечує контроль заданої оптичної потужності в імпульсі та стану інтерференційних фільтрів. Головний фотодіод вимірює значення теплового випромінювання з пластини та відбитого від поверхні випромінювання, що сформоване оптичним джерелом. Також, даний підхід довзволяє врахувати параметри поглинання оптичною системою при калібруванні пристрою за допомогою матеріалу з відомим значенням відбивання.

В результаті роботи було спроектовано та зібрано джерело оптичного випромінювання для системи пірометрії з компенсацією випромінювання, що відповідає вимогам технології.

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- Dmitry Ponomarev, V. A. Zakharenko, A. G., Shkaev Pyrometer with tracking balancing, Journal of Physics Conference: 2018. 5 p., – Series 998(1):012022.
- М.В. Лукінюк Технічні засоби автоматизації (Частина 2) / В.П. Лисенко, В.Є. Лукін, А.М. Гладкий, С.А. Шворов, А.А. Руденський, А.А. Заверткін.– Ніжин.: Видавець ПП Лисенко М.М., 2018. 455 с.
- Alan S. Measurement and Instrumentation: Theory and Application / Morris, Reza Langari, Auris Reference Limited, 2015. 405 p.
- Двоколірний пірометр. Компанія «Sensor Therm». URL: <u>https://www.sensortherm.de/en/2-color-pyrometers/</u>.
- 5. How do Ratio Pyrometers works, Компанія «Fluke» . URL: <u>https://www.flukeprocessinstruments.com/en-us/service-and-support/knowledge-center/infrared-technology/how-do-ratio-pyrometers-work%3F</u>.
- Yang, F. H. Modern Metal-Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) Reactors and Growing Nitride-Based Materials, Nitride Semiconductor Light-Emitting Diodes LEDs: Materials Technologies, and Applications, J.-J. Huang, H.-C. Kuo, and S.-C. Shen (eds.), Cambridge UK, 2014. p. 27–65.
- Ramer, J. Emissivity Compensated Pyrometry of the Substrate Surface During Movpe Growth of InxGa1-xAs1-yPy/InP Materials in Rotating Disc Reactors/ Patel, B., Patel, A., Boguslavskiy, V., & Gurary, A., 1999. 607p.
- Gurary, A. Application of Emissivity Compensated Pyrometry for Temperature Measurement and Control During Compound Semiconductors Manufacturing, AIP Conference Proceedings, 2003. 21 p.
- Breiland, W. G., and Evans, G. H., Design and Verification of Nearly Ideal Flow and Heat Transfer in Rotating Disk Chemical Vapor Deposition Reactors, J. Electrochem Soc. 308, 1991. 15 p.
- Songyao Tang Detailed study on MOCVD of wafer-scale MoS2 monolayers: From nucleation to coalescence, Annika Grundmann, Hleb Fiadziushkin, Amir Ghiami, Michael Heuken, Andrei Vescan, Holger Kalisch, 2022. 32 p.

- P. Hagqvist Emissivity compensated spectral pyrometry for varying emissivity metallic measurands/ F. Sikstrom, A. K. Christiansson, Measurement Science and Technology, Vol. 25 Nummer/häfte 2 art. nr 025010 P. Hagqvist, F. Sikstrom, A. K. Christiansson, 2014. 12 p.
- R. G. May IR Optical Fiver-Based Noncontact Pyrometer For Drop Tube Instrumentation/ Wesam Saleh, S. Moneyhun, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, May 1989. 346 p.
- Santiuste. C. Modelling thermal effects in machining of carbon fiber reinforced polymer composites/ Díaz-Álvarez, J.; Soldani, X.; Miguélez, M.H. J. Reinf. Plast. Comp. 2014. pp. 758–766.
- Estalote, E. Low-temperature emissivities of copper and aluminum. J. Opt. Soc. Am. 1977. pp. 39–44.
- Müller, B. Radiation Thermometry at a High-Speed Turning Process/ Renz, U.; Hoppe, S.; Klocke, F.; J. Manuf. Sci. Eng. 2004. pp. 488–495.
- 16. Carmen Vázquez Article "Fiber-Optic Pyrometer with Optically Powered Switch for Temperature Measurements"/ Sandra Pérez-Prieto, Juan D. López-Cardona, Alberto Tapetado, Enrique Blanco, Jorge Moreno-López, David S. Montero and Pedro C. Lallana. Electronics Technology Department, University Carlos III of Madrid, 2015. 230 p.
- 17. Müller, B. Development of a fast fiber-optic two-color pyrometer for the temperature measurement of surfaces with varying emissivities. Rev. Sci. Instrum., Article in The Review of scientific instruments, August 2001. 20 p.
- Pujana, J.; Del Campo, L.; Pérez-Sáez, R.B.; Tello, M.J.; Gallego, I.; Arrazola,
   P.J. Radiation thermometry applied to temperature measurement in the cutting process. Meas. Sci. Technol, 2007. 20p.
- 19. Інфрачервона(IЧ)пірометрія.Компанія«laytec»URL:<a href="https://www.laytec.de/key-technologies/metrology-methods/ir-pyrometry">https://www.laytec.de/key-technologies/metrology-methods/ir-pyrometry</a>
- 20. Ю. І. Якименко, Д. М. Заячук, А. Т. Орлов, В. М. Співак, О. В. Богдан, В. М. Коваль «Основи наноелектроніки», підручник в двох книгах, книга 2, К: НТУУ «КПІ», 2016. 350 с.

- T. Bergunde, B. Henninger, M. Lu<sup>"</sup> nenbu<sup>"</sup> rger, M. Heuken, M. Weyers, J.-T. Zettler, J. Crystal Growth 248, 2003. 235 p.
- 22. Emissivity-correcting mid-infrared pyrometry for group-III nitride MOCVD temperature measurement and control / J. R. Creighton та ін. Journal of Crystal Growth. 2008. T. 310, № 6. C. 1062–1068.
- D.D. Koleske, A.J. Fischer, A.A. Allerman, C.C. Mitchell, K.C. Cross, S.R. Kurtz,
   J.J. Figiel, K.W. Fullmer, W.G. Breil, Appl. Phys. Lett. 2020. 81 p.
- 24. Fluke Process Instruments. URL: <u>https://www.flukeprocessinstruments.com/en-us/service-and-support/knowledge-center/infrared-technology/what-emissivity%3F</u>
- 25. National Bureau of Standards. Theory and methods of optical pyrometry. Washington : USEPO, 1962. 18 p.
- 26. Sean M. Stewart, R. Barry Johnson. Blackbody Radiation: A History of Thermal Radiation Computational Aids and Numerical Methods. CRC Press, 9 p., 2016.
- Peter Coates, David Lowe. The Fundamentals of Radiation Thermometers. CRC Press; 1 edition, November 2, 2016. 438 p.
- 28. Блау Г. Г. Сб. «Досліди при високих температурах». Під ред. В. А. Кириллина та А. Е. Шейдлина., 1962. с. 73.
- Новіков Д. Дипломна робота на здобуття ступеню бакалавра, на тему: «Вибір оптимальних параметрів фотодіодів для оптичної пірометрії». Київ, 2020. 77 с.
- Breiland, W. G. Reflectance-Correcting Pyrometry in Thin Film Deposition Applications, 2003. 43 p.
- David P. DeWitt, Gene D. Nutter. Theory and Practice of Radiation Thermometry. Wiley-Interscience; 1 edition December 14, 1988. 1152 p.
- Breiland W. G. Reflectance-Correcting Pyrometry in Thin Film Deposition Applications / W. G. Breiland., Sandia National Labs., CA (United States), 2003.
   85 p.
- 33. Oliviera I. Avalanche Photodiodes, Boston University, December 2022. 7 p.

- 34. The Editors of Encyclopaedia Britannica. Collimator instrument. Encyclopedia Britannica. URL: <u>https://www.britannica.com/technology/collimator</u>.
- 35. Stengl C. Development and characterization of a versatile mini-beam collimator for pre-clinical photon beam irradiation/ Arbes Long-Yang Jan Thai, 2023. 23 p.
- 36. Mikron PhotriX Series, Advanced Energy. URL: <u>https://www.advancedenergy.com/products/temperature-</u> <u>measurement/thermal-measurement-optical-pyrometers-power-controllers/metal-</u> <u>applications-pyrometers/mikron-photrix-series/</u>
- 37. The Editors of Encyclopaedia Britannica. LED: Definition, Lights, Types, & Facts. URL: <u>https://www.britannica.com/technology/LED</u>
- 38. MOCVD systems archives Veeco. URL: <u>https://www.veeco.com/technologies-and-products/mocvd-systems/</u>
- 39. Sekidenko OR4000E, Semiconductor/thin-film pyrometers, Advanced Energy. URL: <u>https://www.advancedenergy.com/products/temperature-</u> <u>measurement/thermal-measurement-optical-pyrometers-power-</u> <u>controllers/semiconductorthin-film-pyrometers/sekidenko-or4000e/</u>