

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

Приладобудівний факультет  
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Надія БУРАУ

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024р.

**Дипломний проєкт**  
**на здобуття ступеня бакалавра**  
**за освітньо-професійною програмою**  
**«Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в**  
**приладобудуванні» спеціальності 151**  
**«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»**  
**на тему: «Компактний ширококутний тепловізор»**

Виконала:  
студентка IV курсу,  
групи ПО-01  
Тоцька Вікторія Олегівна

Керівник:  
к. т. н., доцент,  
Сокуренко Вячеслав Михайлович

Рецензент:

Барандич Катерина Сергіївна

Засвідчую, що у цьому дипломному  
проєкті немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.  
Студент (-ка) \_\_\_\_\_

Київ – 2024 року

## ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

| № з/п | Формат | Позначення         | Найменування                 | Кількість листів | Примітка |
|-------|--------|--------------------|------------------------------|------------------|----------|
| 1     | A4     |                    | Завдання на дипломний проєкт | 2                |          |
| 2     | A4     | ПО01.00011.000 ПЗ  | Пояснювальна записка         | 72               |          |
| 3     | A2     | ПО01.000011.000 ЛЗ | Схема оптична принципова     |                  |          |
| 4     | A2     | ПО01.000011.000    | Схема функціональна          | 1                |          |
| 5     | A1     | ПО01.000001.000    | Складальне креслення         | 1                |          |
| 6     | A4     | ПО01.000011.001    | Лінза                        | 1                |          |
| 7     | A4     | ПО01.000011.002    | Лінза                        | 1                |          |
|       |        |                    |                              |                  |          |
|       |        |                    |                              |                  |          |
|       |        |                    |                              |                  |          |
|       |        |                    |                              |                  |          |
|       |        |                    |                              |                  |          |
|       |        |                    |                              |                  |          |

|           |               |       |      |                                 |                                                         |        |
|-----------|---------------|-------|------|---------------------------------|---------------------------------------------------------|--------|
|           |               |       |      | ДП ПО01 14.000.00               |                                                         |        |
|           | ПІБ           | Підп. | Дата | Відомість<br>дипломного проєкту | Лист                                                    | Листів |
| Розробн.  | Тоцька В.О.   |       |      |                                 | 1                                                       | 1      |
| Керівн.   | Сокурєнко В.М |       |      |                                 | КПІ ім. Ігоря<br>Сікорського<br>Каф. КІОНС<br>Гр. ПО-01 |        |
| Консульт. |               |       |      |                                 |                                                         |        |
| Н/контр.  |               |       |      |                                 |                                                         |        |
| Зав.каф.  |               |       |      |                                 |                                                         |        |

**Пояснювальна записка  
до дипломного проєкту  
на тему: «Компактний ширококутний тепловізор»**

Київ – 2024 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Приладобудівний факультет  
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма – «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_Надія БУРАУ

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проєкт студенту**

**Тоцькій Вікторії Олегівні**

1. Тема проєкту «Компактний ширококутний тепловізор», керівник проєкту Сокурєнко Вячеслав Михайлович, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ р. №

2. Термін подання студентом проєкту: 10.06.2024

3. Вихідні дані до проєкту: кутове поле зору – 40, спектральний діапазон - 8...12 мкм.

4. Зміст пояснювальної записки: 1. Огляд та аналіз літератури.

2. Обґрунтування функціональної схеми та принципу роботи приладу. 3.

Конструкторські розрахунки. 4. Розроблення конструкції.

|                       |                |          |        |      |                                                            |            |        |
|-----------------------|----------------|----------|--------|------|------------------------------------------------------------|------------|--------|
|                       |                |          |        |      | <b>ПО01.00011.000 ПЗ</b>                                   |            |        |
| Змін..                | Лист           | № докум. | Підпис | Дата |                                                            |            |        |
| Розроб.               | Тоцька В.О..   |          |        |      | Компактний ширококутний тепловізор<br>Пояснювальна записка | Лім.       | Лист   |
| Перевірив             | Сокурєнко В.М. |          |        |      |                                                            |            | Листів |
|                       |                |          |        |      |                                                            |            | 1      |
| Н. Контр.<br>Затверд. | Сокурєнко В.М. |          |        |      |                                                            | ПБФ, КІОНС |        |

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): 1. Складальне креслення (1л. А1). 2. Оптична схема(1л. А2). 3. Схема функціональна (1л. А2). 4. Лінза (1л. А4). 5. Лінза (1л. А4).

7. Дата видачі завдання: 23.05.2024

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломного проєкту | Термін виконання етапів проєкту | Примітка |
|-------|-------------------------------------------|---------------------------------|----------|
| 1     | Формування завдання проєкту               | 23.05.2024                      |          |
| 2     | Проведення аналітичного огляду            | 26.05.2024                      |          |
| 3     | Розрахунок компонентів                    | 1.06.2024                       |          |
| 4     | Оформлення пояснювальної записки          | 3.06.2024                       |          |
| 5     | Розробка креслеників                      | 6.06.2024                       |          |
| 6     | Подання проєкту до передзахисту           | 7.06.2024                       |          |
| 7     | Підготовка до захисту                     | 10.06.2024                      |          |

Студентка

Вікторія ТОЦЬКА

Керівник

Вячеслав СОКУРЕНКО

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 5    |

## Анотація

Основна увага у цьому дипломному проєкті приділена розробці приладу для спостереження за об'єктами в довгохвильовому інфрачервоному діапазоні (LWIR). Було досліджено актуальні джерела і комерційні зразки, які діють в даному контексті. Результати цього аналізу слугували основою для подальшого проектування та оптимізації оптичної системи.

У дипломній роботі здійснено автоматичний параметричний синтез проєкційного об'єктива, що складається з чотирьох асферичних лінз другого порядку. Проектування оптичної системи була проведено за допомогою методу глобальної оптимізації, зокрема з використанням методу диференційної еволюції.

Обсяг роботи: 72 сторінки пояснювальної записки, 29 рисунків, 7 таблиць, 20 бібліографічних найменувань.

Ключові слова: мікроболометрична матриця, оптична система, приймач ASP-HR640, long-wave infrared (LWIR).

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 6    |

## Annotation

The focus of this thesis project is on the development of a device for observing objects in the long-wave infrared (LWIR) range. The current sources and commercial samples operating in this context were investigated. The results of this analysis served as the basis for further design and optimization of the optical system.

In this thesis, the automatic parametric synthesis of a projection lens consisting of four second-order aspherical lenses was performed. The design of the optical system was carried out using a global optimization method, in particular, using the method of differential evolution.

Scope of work: 72 pages of explanatory note, 29 figures, 7 tables, 20 bibliographic references.

Keywords: microbolometer matrix, optical system, ASP-HR640 receiver, long-wave infrared (LWIR).

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>П001.00014.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 7    |

## ЗМІСТ

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                                                                         | 10 |
| РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ .....                                          | 12 |
| 1.1. Розвиток досліджень у галузі інфрачервоного випромінювання .....               | 12 |
| 1.2. Довгохвильовий інфрачервоний діапазон .....                                    | 15 |
| 1.3. Застосування LWIR-випромінювання .....                                         | 17 |
| 1.4. Матеріали, типи і характеристики приймачів ІЧ випромінювання .....             | 22 |
| 1.5. Сполуки для оптичних елементів LWIR: огляд і характеристика .....              | 23 |
| 1.6. Огляд приймачів для LWIR діапазону .....                                       | 27 |
| 1.7. Огляд мікроболометричних матриць для LWIR-діапазону .....                      | 29 |
| 1.8. Аналіз параметрів LWIR об'єктива .....                                         | 33 |
| 1.9. Висновки до розділу 1 .....                                                    | 34 |
| РОЗДІЛ 2. ГЛЯД ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА<br>ПРИНЦИПУ РОБОТИ ТЕПЛОВІЗОРА ..... | 35 |
| 2.1. Опис тепловізора та принцип дії .....                                          | 35 |
| 2.2. Висновки до розділу 2 .....                                                    | 37 |
| РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТОРСЬКІ РОЗРАХУНКИ .....                                          | 38 |
| 3.1. Вимоги до габаритного розрахунку .....                                         | 38 |
| 3.2. Розрахунок фокусної відстані об'єктива .....                                   | 38 |
| 3.3. Параметричний абераційний синтез та аналіз якості зображення .....             | 39 |
| 3.4. Оцінка якості зображення .....                                                 | 41 |
| 3.5. Енергетичні розрахунки .....                                                   | 50 |
| 3.5.1. Розрахунок коефіцієнту пропускання ОС .....                                  | 50 |
| 3.5.1. Розрахунок опроміненості на площині матриці .....                            | 52 |

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| 3.6. Висновки до розділу 3.....         | 53 |
| РОЗДІЛ 4. КОНСТРУКТОРСЬКІ РОЗРОБКИ..... | 55 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....                 | 57 |
| СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....                  | 59 |
| Додатки.....                            | 62 |
| Додаток А.....                          | 63 |
| Додаток Б .....                         | 71 |

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>П001.00014.000 ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 9    |

## ВСТУП

Відомо, що людське око здатне реєструвати електромагнітне випромінення лише у вузькому діапазоні довжин хвиль, що називається видимим світлом. Однак спектр випромінення, який випускають різні об'єкти, є значно ширшим. Порівняння живих та неживих об'єктів в інфрачервоному спектрі дозволяє виявити численні значущі деталі. Для отримання таких інфрачервоних зображень використовується спеціалізоване обладнання — тепловізори. Ці прилади не лише візуалізують теплові процеси різних об'єктів і здійснюють високоточні вимірювання, але також сприяють ранній діагностиці захворювань і відіграють важливу роль у військовій та метеорологічній галузях.

У сучасній технічній сфері, де точність вимірювань і спостережень є ключовими для розвитку різних галузей, проектування тепловізорів займає важливе місце. Здатність візуалізувати теплове випромінення дозволяє не лише виявляти об'єкти в умовах обмеженого видимого освітлення, але й аналізувати їхні теплові характеристики. У цьому контексті розробка компактного ширококутного тепловізора має особливе значення.

Метою даного дипломного проєкту є розробка та дослідження компактного тепловізора з розширеним полем зору. Такий тепловізор має важливе значення для підвищення ефективності у сферах безпеки, діагностики та наукових досліджень. Завданням роботи є не лише проектування пристрою, але й всебічне вивчення його потенціалу для практичного застосування у вирішенні різноманітних завдань.

Ключовими аспектами цього дослідження є:

1. Аналіз існуючих технологій в області інфрачервоної термографії, що дозволить вибрати найефективніші рішення для реалізації поставлених задач.
2. Розробка оптичної системи тепловізора, яка забезпечить високу роздільну здатність і точність вимірювань при мінімальних розмірах і вазі пристрою.
3. Аналіз якості зображення розробленого тепловізора.
4. Оцінка ефективності розробленого тепловізора в реальних умовах

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 10   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

експлуатації.

Очікувані результати цього проєкту включають створення тепловізора, що відповідатиме сучасним вимогам та стандартам. Особлива увага приділяється компактності пристрою, що забезпечить зручність його використання та транспортування, роблячи його незамінним інструментом у польових умовах та обмеженому просторі.

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 11   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

# РОЗДІЛ 1

## ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ

### 1.1. Розвиток досліджень у галузі інфрачервоного випромінювання

Інфрачервоне випромінювання з довжиною хвилі в межах від 760 нанометрів до 100 000 нанометрів - це форма електромагнітного випромінювання, що широко використовується в різних галузях. Інфрачервоне випромінювання було відкрите Вільямом Гершелем у 1800 році, коли він випадково виявив "незрозумілі промені" за червоним кінцем видимого спектру, що поклало початок дослідженню електромагнітного спектру за межами видимого діапазону. Відкриття Гершеля було фундаментальним, проте в історичних описах це відкриття часто не беруть до уваги, незважаючи на те, що його значення можна порівняти з рентгенівськими променями. Це відкриття заклало основу тепловізійного дослідження інфрачервоної частини електромагнітного спектра, що наголошує на його важливість і в сучасному світі. Спочатку молекулярні дослідження з використанням інфрачервоного світла були обмежені водою і невеликими органічними молекулами до 1940-х років через проблеми з вимірюванням [1]. Детальні описи властивостей інфрачервоного випромінювання в його публікаціях ще більше зміцнили розуміння цієї найважливішої частини електромагнітного спектра.

Вільям Гершель і його сестра Кароліна Гершель були астрономами, які працювали в Баті. Вільям використовував телескопи для спостереження за Сонцем. Звичайно, це небезпечно, тому він використовував темні скляні фільтри, щоб зменшити інтенсивність сонячних променів. Він помітив, що навіть з фільтрами відчуває зігріваючий ефект. Він також звернув увагу на те, що одні фільтри пропускали більше світла, в той час як інші пропускали більше випромінювання, що нагрівало об'єкти. Він писав, що, спостерігаючи за Сонцем, він використовував: «різні комбінації різнокольорових затемнюючих окулярів. Дивовижним виявилось те, що коли я використовував деякі з них, я відчував тепло, хоча світла було дуже

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 12   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

мало; тоді як інші давали багато світла, але майже не давали відчуття тепла».

Гершель почав порівнювати, наскільки добре ці різні скляні фільтри пропускають те, що він назвав "теплом", або інфрачервоним випроміненням. Йому потрібно було дізнатися, чи впливають на його спостереження фільтри, які він використовував.

Провівши серію експериментів, він спостерігав за тим, як різні кольори впливають на термометр. У кожній він спостерігав зростання температури, яке він записував через 8 хвилин. Середній приріст температури у червоному:  $6,9^{\circ}\text{F}$ , у зеленому:  $3,2^{\circ}\text{F}$ , а у фіолетовому:  $2^{\circ}\text{F}$ .

Він прийшов до висновку, що червоні промені сонячного світла мають більший нагрівальний ефект або їх є більше.

Коли Сонце рухалося по небу, спектр переміщувався по столу. Коли центральний термометр був трохи за червоною межею спектра, Гершель помітив, що температура була ще вищою, ніж раніше. Він прийшов до висновку, що існують невидимі промені, що йдуть від Сонця, і заломлюються призмою за червоною межею спектра. На основі своїх експериментів вчений зробив висновок: існує світло за межами видимого спектру, яке має тепловий ефект, але не є видимим для людського ока. Це було першим кроком у відкритті інфрачервоного світла.

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 13   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

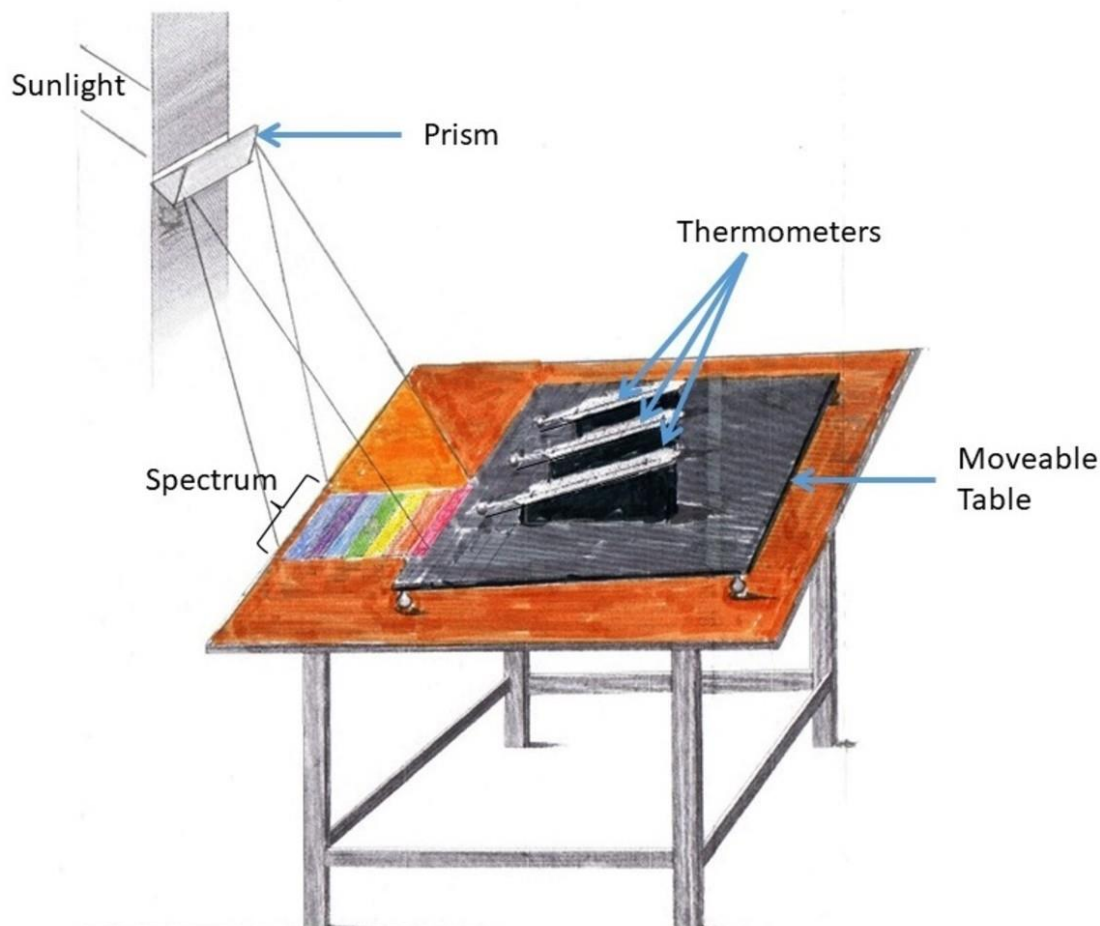


Рис. 1.1 – Експеримент Гершеля [1]

Протягом значного періоду після відкриття інфрачервоного спектру Вільямом Гершелем мало досягнень було досягнуто в цій області. Однією з основних причин цього була відсутність ефективних детекторів, які могли б зареєструвати інфрачервоне випромінення. Однак завдяки винаходам Сера Джона Гершеля, сина Вільяма, ситуація змінилася. Він зосередив свої зусилля на перетворенні інфрачервоного спектру у видиме світло. Для досягнення цієї мети він використовував спеціальний метод, що полягав у зануренні паперу, обкладеного сажею, у спирт. Під час випаровування спирту, ділянки з більшою інтенсивністю випромінення ставали видимими. Цей експеримент довів, що інфрачервоний спектр складається, принаймні, з трьох окремих смуг.

Після цього відкриття інфрачервоні технології отримали широке застосування в різних сферах життя. У період Першої та Другої світових війн вони здобули

значний розвиток і використовувалися для розробки фотонних детекторів і перетворювачів зображень, що були необхідними для військових. Після війни дослідження в цій галузі продовжилися в різних країнах за військовим спонсорством. Інфрачервоні технології також знайшли широке застосування в цивільних галузях, включаючи медицину, промисловість та автомобільну промисловість.

З початку XX століття інфрачервоне випромінення стало ключовим інструментом для вирішення різних завдань і практичних проблем. Інфрачервоні системи стали популярнішими після використання їх Генрі Фордом для швидкого висушування фарбованих автомобілів. У 1933 році були запатентовані перші інфрачервоні обігрівачі, що були винаходом німецького інженера Еміля Фішера. Впровадження цих обігрівачів в різноманітні галузі, включаючи медицину, промисловість та побут, значно покращило якість життя та умови праці людей. Технологія швидко розвивалася, і за 15 років було створено перший керамічний інфрачервоний обігрівач.

У 1969 році французька компанія Noirot виводить на ринок інфрачервоні обігрівачі з новим методом опалення приміщення. В якості нагрівального елемента використовується інфрачервона кварцева трубка, здатна обігріти приміщення за кілька хвилин. Ці інновації в інфрачервоній технології посилили її роль у побуті та промисловості, забезпечуючи ефективне використання енергії та підвищуючи рівень зручності для користувачів. З впровадженням керамічних обігрівачів інфрачервоного типу відбулася значна оптимізація процесу нагрівання, забезпечуючи більш ефективне використання електроенергії та знижуючи витрати на опалення приміщень. Такі технології не лише поліпшили якість життя, а й сприяли збереженню енергоресурсів та зменшенню викидів парникових газів, сприяючи сталому розвитку та збереженню навколишнього середовища.

## 1.2. Довгохвильовий інфрачервоний діапазон

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 15   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

Довгохвильове інфрачервоне випромінення або LWIR - це підмножина інфрачервоного діапазону електромагнітного спектра, що охоплює довжини хвиль від 8 000 до 14 000 нм [2].

На рисунку 1.2. можна побачити ІЧ спектр, який можна розподілити на чотири основні діапазони залежно від їх довжини хвиль:

1. Близькохвильова (NIR) область. Цей діапазон простягається від приблизно 0,85 до 0,9 мкм. Він використовується для різних застосувань, таких як спостереження рослинності, медична діагностика та інші.

2. Короткохвильова (SWIR) область. З довжиною хвилі від 0,9 до 2,5 мкм, цей діапазон є важливим для багатьох застосувань, зокрема для аналізу матеріалів та спостереження в нічний час.

3. Середньохвильова (MWIR) область. Вона охоплює діапазон від 3 до 5 мкм. Ця область часто використовується для виявлення теплових радіаційних об'єктів, таких як люди, тварини та різні об'єкти в навколишньому середовищі.

4. Довгохвильова (LWIR) область. З довжиною хвилі від 8 до 12 мкм, цей діапазон використовується для виявлення теплових випромінювачів, зокрема для метеорологічних досліджень, медицини та військових застосувань. По ньому також можливе виявлення далеких інфрачервоних діапазонів, що мають довжину хвилі до 1 міліметра.

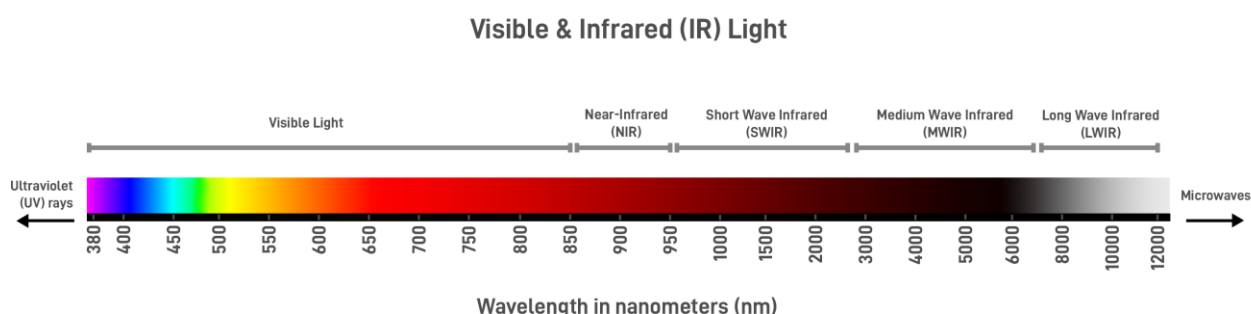


Рис. 1.2 – Інфрачервоний спектр [3]

LWIR – різновид інфрачервоного випромінення, який лежить на більш довгих довжинах хвиль порівняно з SWIR і NIR.

### 1.3. Застосування LWIR-випромінення

Камери довгохвильового інфрачервоного випромінення широко використовуються у різних сферах, включаючи військові, медичні, наукові та промислові застосування. Їхні можливості виявлення теплового випромінення від об'єктів, навіть при низьких рівнях освітлення, роблять їх незамінними для нічного бачення, теплового зображення, виявлення несправностей в електроніці та механізмах, а також інших областей застосування.

Теплове випромінення від будь-яких об'єктів з температурою вище абсолютного нуля (0 K) може бути виявлене у середньо- і довгохвильовому інфрачервоному (MWIR/LWIR) спектральних діапазонах. Це дозволяє термографічним камерам реєструвати зображення, засновані на локальних змінах температури.

LWIR-камери проявляють велику чутливість до навіть незначних змін температури. Вони можуть точно виявляти мінімальні відмінності в теплових сигнатурах, що робить їх ідеальними для застосувань, таких як термографія, обстеження будівель та виявлення тепловтрат. Їхні можливості використовуються не лише для виявлення теплових аномалій, а й для аналізу та вивчення теплового випромінення в реальному часі, що відкриває нові можливості для розвитку наукових досліджень та технологічних інновацій.

На рисунку 1.3. можна побачити одну з особливостей LWIR, а саме – їхню здатність проникати через різноманітні перешкоди, такі як дим, туман, пил і туман, що робить їх ефективними для застосувань у складних умовах.

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 17   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |



Рис. 1.3 – Видиме зображення та зображення через LWIR об'єктів під час невеликої хмарності (вгорі), сильного вітру та дощу (посередині) та снігу (внизу)  
[4]

**LWIR у військовій справі.** У військовій справі технологія LWIR виявляє важливе значення у різноманітних аспектах, включаючи навігацію, виявлення цілей, дальній розвідки, підтримку вогню та забезпечення безпеки військових об'єктів. Особливою областю застосування LWIR-технологій є теплове зображення та нічне бачення.

Теплове зображення базується на здатності LWIR-камер реєструвати теплове випромінювання, що випромінюється об'єктами, навіть у відсутності видимого світла.

Об'єкти, які нагріваються, випромінюють інфрачервоне випромінення, залежно від їхньої температури. LWIR-камера реєструє це випромінення і перетворює його на теплове зображення. Такі зображення дозволяють візуально відтворити теплові різниці між об'єктами та навколишнім середовищем.

Загалом, LWIR-камери надають можливість військовим операторам здійснювати бачення у темряві, що становить перевагу у нічних операціях. Вони також використовуються для проведення дальньої розвідки, дозволяючи збирати інформацію про рух ворожих сил, ідентифікувати цілі та оцінювати потенційні загрози. Це особливо важливо для військових операцій, поліції, пошуково-рятувальних служб та інших ситуацій, де нічне бачення може мати вирішальне значення для виконання життєво важливих завдань.

**LWIR в промислових інспекціях.** Технологія LWIR відіграє життєво важливу роль в промислових інспекціях, особливо в профілактичному обслуговуванні. Виявляючи коливання температури, камери LWIR дозволяють на ранніх стадіях виявляти аномалії в роботі обладнання, забезпечуючи оптимальну функціональність і скорочуючи час простою. Чудовим прикладом є використання цих камер у системах моніторингу електромереж або підстанцій для запобігання пожежам. Крім того, тепловізори LWIR забезпечують оптимізовані рішення для термографічних реалізацій, що дозволяють контролювати температуру об'єкта на місці події. Ця функціональність надає великі переваги у виробничих процесах, де точний контроль температури є ключовим елементом якості [5]. На рисунку 1.5 наведено приклад застосування LWIR для спостереження за тепловими втратами парової системи. (Червоний колір означає більші втрати тепла, ніж жовтий, а зелений - нормально працююче обладнання).

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 19   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

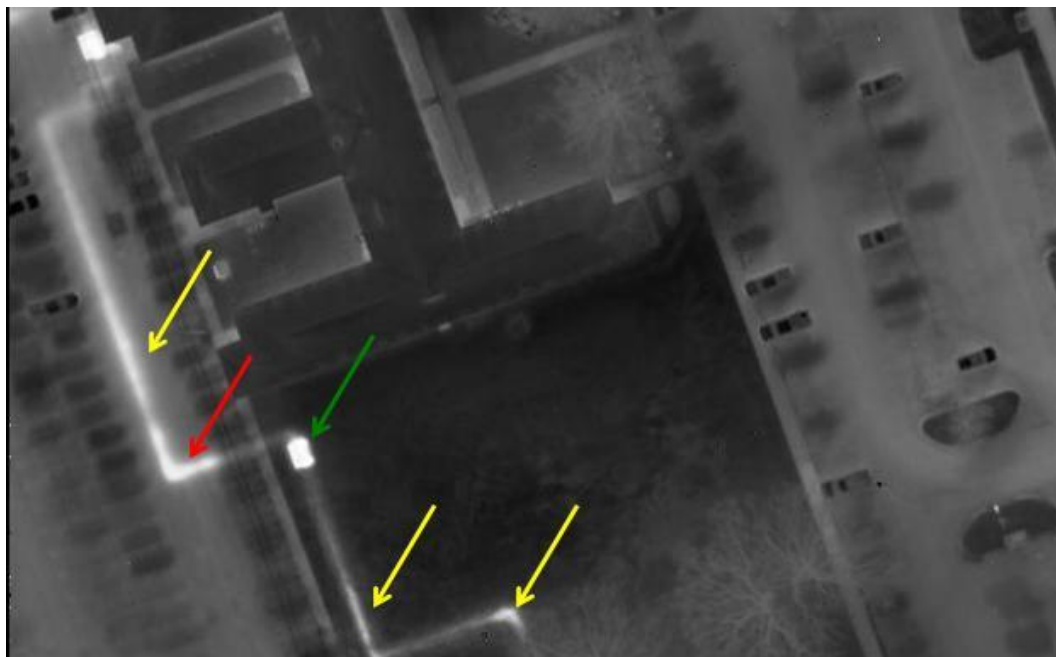


Рисунок 1.4 – Типові теплові втрати парової системи.

(червоний колір означає більші втрати тепла, ніж жовтий, а зелений - нормально працююче обладнання) [6].

**LWIR в медицині.** Літературні дані вказують на широкий спектр застосувань LWIR-камер у медичних дослідженнях. Ці камери знаходять своє застосування в діагностиці різних захворювань, які характеризуються змінами температури тіла, таких як інфекції, запальні процеси та інші медичні стани. Одним з ключових методів, який використовує LWIR-камери, є термографія. Цей метод полягає в застосуванні дуже чутливих медичних цифрових інфрачервоних камер для створення кольорових теплових зображень тіла на комп'ютері.

Принцип роботи термографії ґрунтується на виявленні певних характеристик захворювань, зокрема пухлин, шляхом аналізу теплового випромінення. Це обумовлено тим, що пухлини зазвичай супроводжуються збільшеним кровотоком та зростанням кількості кровоносних судин для забезпечення посилення клітинним ростом. Це призводить до підвищення температури, яка виявляється на термографічних зображеннях. Такі зображення дозволяють лікарям виявити

аномалії температури, що може свідчити про наявність патологічних процесів у пацієнтів.

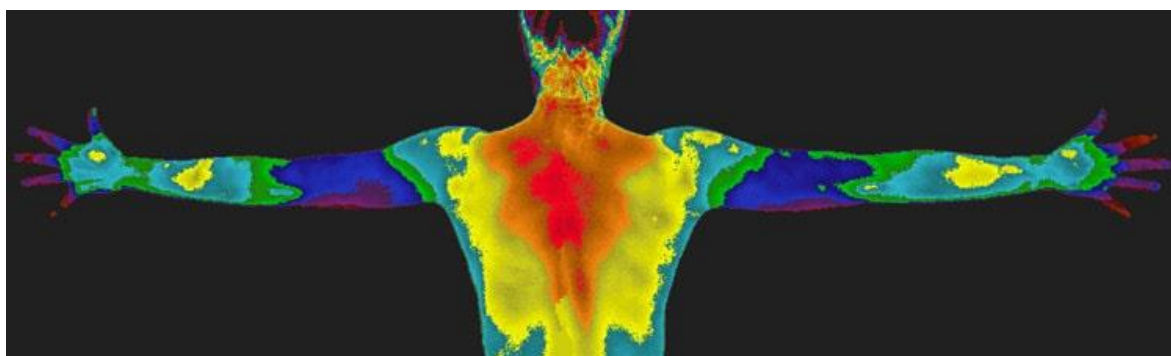


Рис. 1.5 – Тіло людини через LWIR-об'єктив [7]

**LWIR в метеорології.** LWIR-випромінення використовується в метеорологічних дослідженнях для різних цілей. По-перше, воно дозволяє вимірювати температурні градієнти в атмосфері, допомагаючи встановити зони високої та низької температури, як це зображено на рисунку 1.6. Це важливо для розуміння механізмів, що призводять до формування погодних явищ, таких як хмари, тумани та вітри. Використання LWIR-технологій також дозволяє виявляти хмари та тумани, які можуть бути невидимі для звичайних оптичних камер, особливо вночі або в умовах обмеженої видимості.

Крім того, зображення LWIR можуть використовуватися для вивчення довготривалих змін в кліматі, таких як глобальне потепління, зміни в розподілі хмар або зміни в районі розподілу туманів. Це допомагає у вдосконаленні прогнозів погоди та розумінні впливу людської діяльності на кліматичні процеси. Виявлення теплових аномалій, таких як підземні пожежі чи інші джерела тепла, також може бути важливим аспектом метеорологічних досліджень за допомогою LWIR-технологій.

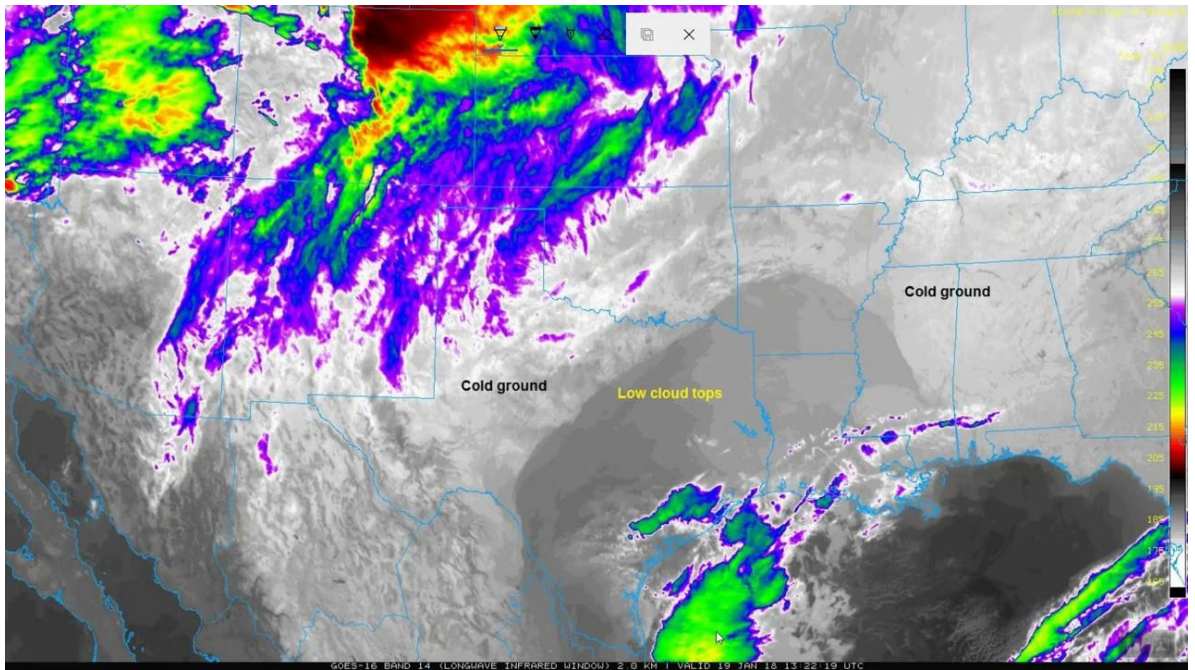


Рис. 1.6 – Поверхня Землі через LWIR-об'єктив [8]

#### 1.4. Матеріали, типи і характеристики приймачів ІЧ випромінення

Два основних типи приймачів інфрачервоного випромінювання можна розподілити на наступні категорії: приймачі фотонного типу та теплові приймачі. Останні включають мікроболометричні та піроелектричні приймачі.

У таблиці 1.1 приведені матеріали, які використовуються для створення інфрачервоних приймачів різних типів.

## Матеріали матриць ІЧ-приймачів різних типів [10]

|   | Типи приймачів інфрачервоного випромінення | Матеріал матриці фотоприймачів, робоча область спектра                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|---|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Фотонні                                    | 1. Халькогенід свинцю (PbS, PbSe), 1.5-6 мкм.<br>2. Сполучення кадмій-ртуть-теллур-HgCdTe <sub>2</sub> (KPT), 1-20 мкм<br>3. Антимонід індію (InSb), 3-5 мкм<br>4. Силіцид платини, структури на бар'єрі Шотткі (PtSi), 1-5 мкм<br>5. Домішковий кремній (Si: x) і германій (Ge: x).<br>6. Багатошарові структури з квантовими ямами на базі GaAs / AlGaAs (QWIP детектори), 8-12 мкм |
| 2 | Теплові<br>Мікроболометричні               | Модифікації оксидів ванадію VxOx, 8-14 мкм<br>Полікристалічний і аморфний кремній, 8-14 мкм                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 3 | Теплові<br>Піроелектричні                  | Цирконат свинцю<br>Ніобат і титанат барію-стронцію трігліцинсульфата<br>Сополімери вініленфторіда                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

## 1.5. Сполуки для оптичних елементів LWIR: огляд і характеристика

Матеріали, призначені для використання у LWIR-діапазоні, відбираються або розробляються з огляду на їхні властивості поглинання та випромінення в цьому спектральному діапазоні. Багато з таких матеріалів відносяться до полімерних або кристалічних сполук, що характеризуються специфічними хімічними структурами, які забезпечують їхні потрібні характеристики.

Оскільки LWIR-випромінення не є видимим для людського ока, тепловізійні камери не можуть використовувати стандартні сенсори на основі кремнію. Замість цього, вони використовують спеціально розроблені датчики, такі як мікроболометри, які здатні виявляти довгохвильове інфрачервоне випромінення, відоме як тепло.

Оскільки LWIR-випромінення не проникає через скло, для тепловізійних камер використовуються спеціальні оптичні елементи, зокрема германієві або однорідні вуглецеві лінзи, які замінюють скло. Це дозволяє зосередити LWIR-випромінення та створити чіткі теплові зображення з високою роздільною здатністю, що дозволяє досягати рівня роздільної здатності до  $640 \times 480$  пікселів з типовою тепловою роздільною здатністю  $< \pm 0,05^\circ\text{C}$ . Обрані матеріали часто піддаються спеціальним обробкам або модифікаціям, щоб забезпечити їхню оптимальну роботу у LWIR-діапазоні. Наприклад, застосування різних покриттів або композитних матеріалів може підвищити їхню ефективність у сприйнятті інфрачервоного випромінення або зменшити втрати енергії.

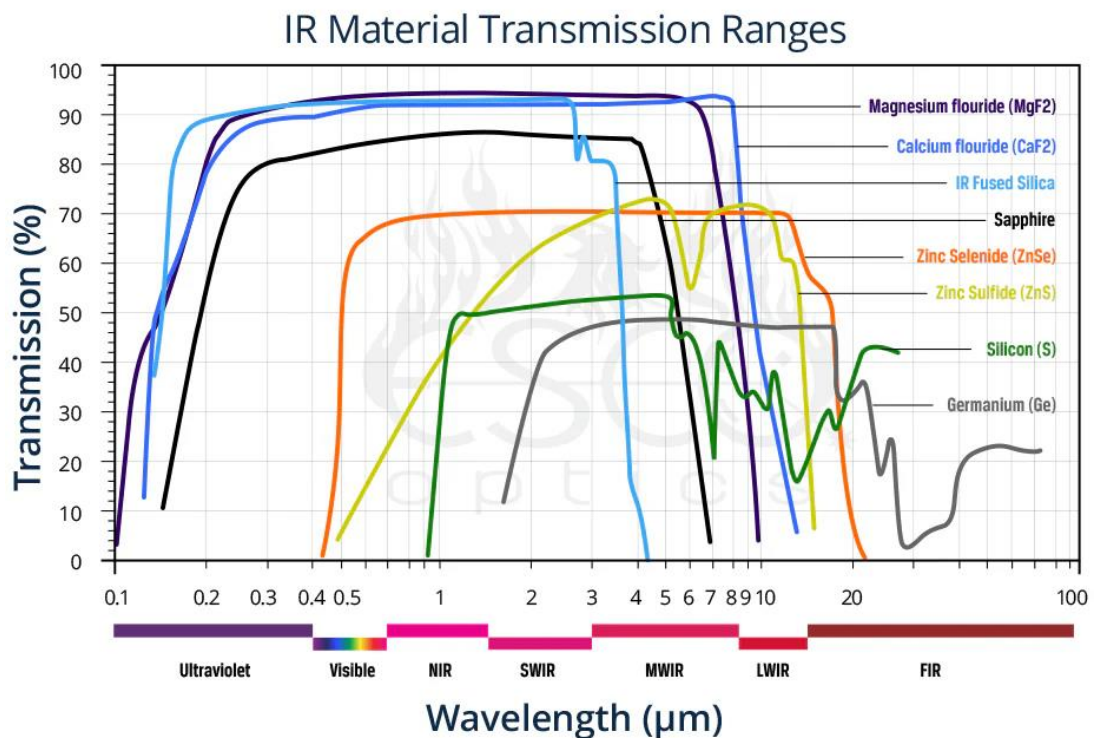


Рис. 1.7 – Сполуки, які пропускають ІЧ випромінення [11]

## Властивості інфрачервоних матеріалів [12]

| Матеріал      | Показник заломлення | Коефіцієнт теплового розширення (ppm/K) | Зміна показника заломлення з температурою (ppm/K) | Жосткість (g/mm <sup>2</sup> ) | Спектр. Діапазон (mm) |
|---------------|---------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Германій      | 4,0243              | 6                                       | 396                                               | 800                            | 2,0-17,0              |
| Кремній       | 3,4255              | 2,7                                     | 150                                               | 1150                           | 1,2-9,0               |
| Сульфід цинку | 2,2523              | 4,6                                     | 54                                                | 230                            | 0,37-14,0             |
| Селенід цинку | 2,4331              | 7,1                                     | 60                                                | 105                            | 0,55-20,0             |
| Фторид магнію | 1,3526              | 8                                       | 20                                                | 415                            | 0,11-7,5              |
| Сапфір        | 1,6753              | 5,6                                     | 13,7                                              | 1370                           | 0,17-5,5              |

- **Германій.** Германій є кристалічним матеріалом, широко застосовуваним в інфрачервоній оптиці, здатним працювати як у MWIR, так і в LWIR діапазонах. Високий показник заломлення ( $n = 4,0243$ ) дозволяє створювати оптичні елементи з великими радіусами кривизни. Проте зміна показника заломлення залежно від температури може призвести до змін фокусу при температурних коливаннях, що ускладнює процес стабілізації зображення. Для компенсації цього ефекту необхідні якісні антивідблискові покриття. Крім того, його висока теплопровідність ( $60 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) допомагає розсіювати тепло, що робить його привабливим для високотемпературних застосувань. Однак германій є дорогим матеріалом.

- **Кремній.** Кремній також є кристалічним матеріалом, що зазвичай використовується в інфрачервоній оптиці, зокрема в MWIR- та LWIR-діапазоні. Його показник заломлення становить  $n = 3,4255$ , а коефіцієнт зміни показника

заломлення залежно від температури дорівнює 150 ppm/K. Кремній характеризується низькою дисперсією, що робить його придатним для різноманітних оптичних застосувань. Кремній також відомий своєю високою механічною міцністю та стійкістю до радіації, що робить його корисним для космічних застосувань. Обробка кремнію алмазними інструментами можлива, але є досить складною.

- **Сульфід цинку.** Сульфід цинку широко використовується в оптичних системах середньо-довгохвильового (MWIR) та довгохвильового (LWIR) інфрачервоного діапазонів. Його виробляють методом хімічного осадження з газової фази (CVD). Найбільш комерційно доступною формою є Cleartran, який використовується для виготовлення вікон і лінз, що працюють у видимому діапазоні та LWIR. Сульфід цинку також відомий своєю стійкістю до вологи та хімічних речовин, що робить його придатним для жорстких умов експлуатації.

- **Селенід цинку.** Селенід цинку, подібно до сульфиду цинку, має спроможність пропускати інфрачервоне та видиме випромінення. Селенід цинку має трохи вищий показник заломлення за сульфід цинку і структурно є менш стійким. Крім того, селенід цинку має високу термостійкість, що робить його придатним для застосувань, де відбуваються великі температурні зміни. Варто зазначити, що селенід цинку має менший коефіцієнт поглинання за сульфід цинку, хоча він вважається більш дорогим матеріалом.

- **Фторид магнію.** Це кристалічний матеріал, що має широкий спектральний пропуск від ультрафіолетового до середньо-довгохвильового інфрачервоного діапазонів. Фторид магнію також відзначається високою стійкістю до радіаційного впливу, що робить його корисним у космічних і військових застосуваннях. Відносно низька вартість і доступність цього матеріалу компенсується його поганими термічними характеристиками.

- **Сапфір.** Сапфір, який є оксидом алюмінію, відзначається надзвичайною твердістю та широким пропусканням від глибокого ультрафіолету до MWIR. Однак через складний процес виробництва і великі витрати часу, сапфір

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 26   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

виробляється дуже обмежено. Хоча коефіцієнт зміни показника заломлення залежно від температури ( $dn/dT$ ) для сапфіру є низьким для інфрачервоних матеріалів (10 ppm/K), він має дуже низьку теплову емісію при високих температурах. Сапфір має високу стійкість до механічних пошкоджень, що робить його ідеальним для використання в умовах високих навантажень, наприклад в космічній промисловості. Сапфір також володіє двозаломлюючими властивостями, а саме, заломлення змінюється в залежності від площини падіння. Сапфір не піддається обробці алмазними інструментами.

Методи виготовлення інфрачервоних матеріалів, таких як германій, кремній, сульфід цинку та селенід цинку, схожі на ті, що використовуються для звичайної скляної оптики. Важливо відзначити, що багато кристалічних матеріалів є гігроскопічними, що може ускладнити їх обробку та застосування.

Для забезпечення оптимальної якості зображення необхідні високоякісні антивідбиваючі покриття, оскільки інфрачервоні матеріали мають високий показник заломлення, що може спричинити значні віддзеркалення Френеля і зменшити коефіцієнт пропускання. Відповідно, належні захисні покриття необхідні для збереження матеріалів від впливу вологості та забезпечення їхньої довговічності. Крім того, використання нових наноматеріалів для покриттів може значно підвищити ефективність оптичних елементів, забезпечуючи їх тривалу експлуатацію у складних умовах.

Для LWIR діапазону звичайне оптичне скло, яке зазвичай використовується у видимому спектрі, не підходить. Це пов'язано з тим, що звичайне скло (наприклад, боросилікатне або кварцове) має високе поглинання в цьому діапазоні довжин хвиль, що робить його непридатним для використання в об'єктивах для LWIR.

## 1.6. Огляд приймачів для LWIR діапазону

Стандартні довгохвильові інфрачервоні (LWIR) сенсори охоплюють діапазон довжин хвиль від приблизно 8 до 14 мкм (8000-14000 нм).

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 27   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

Основні типи LWIR-приймачів:

1. Мікроболометри
2. Фотопровідникові детектори (зокрема на основі HgCdTe)
3. Квантово-каскадні детектори (QCD)
4. Термоелектричні детектори (Thermopiles)

Мікроболометри вимірюють зміну електричного опору, викликану зміною температури під впливом поглинання інфрачервоного випромінення. Фотопровідникові детектори (наприклад, HgCdTe) використовують зміну електропровідності під впливом інфрачервоного випромінення. Квантово-каскадні детектори (QCD) використовують міжзонні переходи в напівпровідниках для детектування інфрачервоного випромінення. Термоелектричні детектори (Thermopiles) генерують напругу у відповідь на зміну температури, викликану поглинанням інфрачервоного випромінення.

Таблиця 1.3

#### Властивості інфрачервоних матеріалів

| Параметр                    | Мікро-<br>болометри          | Фотопро-<br>відникові<br>детектори        | Квантово-<br>каскадні<br>детектори            | Термо-<br>електричні<br>детектори               |
|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Чутливість                  | Середня                      | Висока                                    | Висока                                        | Низька                                          |
| Роздільна<br>здатність      | Середня                      | Висока                                    | Висока                                        | Низька                                          |
| Час відгуку                 | Повільний                    | Швидкий                                   | Швидкий                                       | Повільний                                       |
| Необхідність<br>охолодження | Ні                           | Так                                       | Так                                           | Ні                                              |
| Вартість<br>виробництва     | Низька                       | Висока                                    | Висока                                        | Низька                                          |
| Типові<br>застосування      | Тепло-<br>візори,<br>охорона | Військові,<br>наукові<br>дослідже-<br>ння | Спектро-<br>скопія,<br>наукові<br>дослідження | Промислові<br>датчики,<br>дешеві<br>тепловізори |

Вибір LWIR-приймача залежить від конкретних вимог застосування:

- Для споживчих та комерційних тепловізорів найчастіше використовують мікроболометри через їх низьку вартість і простоту експлуатації без необхідності охолодження.
- Для високочутливих та високороздільних застосувань, таких як військові або наукові дослідження, більше підходять фотопровідникові детектори на основі HgCdTe, хоча вони вимагають охолодження.
- Квантово-каскадні детектори ідеальні для застосувань, де потрібна висока чутливість та швидкість, але вони також дорогі і потребують охолодження.
- Термоелектричні детектори підходять для простих промислових застосувань, де вимоги до чутливості та швидкості не є високими.

### 1.7. Огляд мікроболометричних матриць для LWIR-діапазону

Було розглянуто декілька компактних прикладів неохолоджуваних мікроболометричних матриць для діапазону інфрачервоного випромінення 8-12 мкм та розміром пікселя 12 мкм.

- Модель GST1212M

Неохолоджуваний інфрачервоний детектор GST1212M - це різновид мікроболометра VOx з сучасним розміром пікселя 12 мкм і великою роздільною здатністю 1280x1024. Неоохолоджуваний інфрачервоний датчик в металевому корпусі має характеристики значно покращеної чутливості, меншу відстань між пікселями і більший розмір матриці.

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 29   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |



Рисунок 1.8 – Зовнішній вигляд матриці GST1212M [13]

Таблиця 1.4

Параметри мікроболометричної матриці GST1212M [13]

| Параметр                | Значення      |
|-------------------------|---------------|
| Матеріал                | VOx           |
| Розширення              | 1280x1024     |
| Розмір пікселя          | 12μm          |
| Діапазон хвиль          | 8~14μm        |
| Температурна чутливість | <30mK         |
| Час теплового відгуку   | <12ms         |
| Часта кадрів            | 50/60Hz       |
| Споживана потужність    | <350mW        |
| Розмір (мм)             | 45x28.5x8     |
| Робоча температура      | -40°C ~ +85°C |

- Модель АТТО1280-02

У цьому інфрачервоному детекторі квадратної форми з габаритами 29,5×29,5 мм в керамічному корпусі використовується 12-мікронний неохолоджуваний тепловізійний датчик VOx з роздільною здатністю 1280×1024

пікселів. Він відрізняється поєднання високої чутливості та надійності, що відповідає вимогам до зображень високої чіткості.

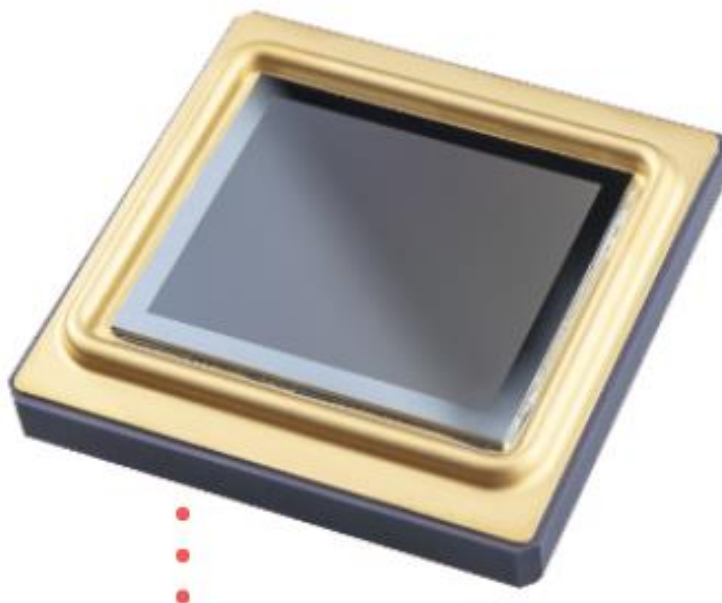


Рисунок 1.9 – Зовнішній вигляд матриці АТТО1280-02 [14]

Таблиця 1.5

Параметри мікроболометричної матриці АТТО1280-02 [14]

| Параметр                | Значення      |
|-------------------------|---------------|
| Матеріал                | VOx           |
| Розширення              | 1280x1024     |
| Розмір пікселя          | 12 $\mu$ m    |
| Діапазон хвиль          | 8~14 $\mu$ m  |
| Температурна чутливість | <50mK         |
| Час теплового відгуку   | <12ms         |
| Часта кадрів            | 60Hz          |
| Споживана потужність    | <350mW        |
| Розмір (мм)             | 29.5 x 29.5   |
| Робоча температура      | -40°C ~ +85°C |

- Модель ASP-HR640

Ці неохолоджувані інфрачервоні модулі з діапазоном від 8 до 12 мікрон мають високу чутливість і адаптовані для широкого спектру застосувань. Ці датчики мають високу вихідну частоту та роздільну здатність 640×480, що підходить для спостереження за великими площами. Розмір пікселя – 12 мкм, що відповідає сучасним вимогам.



Рисунок 1.10 – Зовнішній вигляд матриці ASP-HR640 [15]

Таблиця 1.6

Параметри мікроболометричної матриці ASP-HR640 [15]

| Параметр                | Значення |
|-------------------------|----------|
| Матеріал                | VOx      |
| Розширення              | 640×480  |
| Розмір пікселя          | 12μm     |
| Діапазон хвиль          | 8~14μm   |
| Температурна чутливість | <30mK    |
| Час теплового відгуку   | <12ms    |
| Часта кадрів            | 50Hz     |
| Споживана потужність    | 3W       |

|                    |               |
|--------------------|---------------|
| Розмір (мм)        | 45x28.5x8     |
| Робоча температура | -40°C to 70°C |

### 1.8. Аналіз параметрів LWIR об'єктива

Ринок LWIR камер активно розвивається і демонструє значний потенціал для зростання. Ринок рухається у напрямку зменшення розмірів і ваги камер, збільшення автономності та інтеграції з іншими системами (наприклад, дронів). Зростає популярність рішень, що пропонують можливості підключення до Інтернету та дистанційного моніторингу. Ринок включає в себе таких відомих виробників, як FLIR Systems, Fluke Corporation, Testo SE, Seek Thermal, і Axis Communications. Розглянемо комерційну модель Teledyne Flir Boson 640×512 18mm 24° Hfov - Lwir Thermal Camera Core

Teledyne Flir Boson 640×512 18mm 24° Hfov - Lwir Thermal Camera Core [16] ма призначена для роботи в довгохвильовому діапазоні від 8 до 12 мкм та має такі характеристики [17]:

- Роздільна здатність: 640×512 - 24° HFoV
- Розмір пікселя: 12 μm
- Температура: -40 °C to +80 °C
- Спектральний діапазон: 8 - 12 мкм (LWIR)
- Дисторсія: ≤ 1%



Рисунок 1.11 – Зовнішній вигляд камери Teledyne Flir Boson 640×512 18mm 24°  
Hfov - Lwir Thermal Camera Core [16]

### 1.9. Висновки до розділу 1

1. Розроблення LWIR-об'єктивів має велике значення через їх широкий спектр застосування. Вони використовуються для різних задач: від спостереження теплових втрат в будівлях та інфраструктурі до виявлення теплових плям у медицині та пошуку об'єктів на великих відстанях.

2. Оптичні елементи LWIR-об'єктивів виготовляють з різних матеріалів, таких як германій, кремній, кальцій фторид та селенід цинку. Кожен матеріал має свої унікальні властивості, тому вибір матеріалу залежить від конкретної оптичної схеми.

3. Для спостережень в LWIR-діапазоні найчастіше використовують мікроболометричні матриці, як забезпечують ефективний збір інфрачервоного випромінення в LWIR-діапазоні та знаходять застосування у різних областях, від медицини до військової справи. Мікроболометричні матриці дозволяють створювати зображення з високою чутливістю та роздільною здатністю в інфрачервоному діапазоні, що робить їх корисними для тепловізійних систем, систем нагляду та контролю, а також для медичних діагностичних пристроїв.

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 34   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

## РОЗДІЛ 2

### ОГЛЯД ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ПРИНЦИПУ РОБОТИ ТЕПЛОВІЗОРА

#### 2.1. Опис тепловізора та принцип дії

Прикладом для проектування цієї моделі стали комерційні зразки, що були представлені у першому розділі. Для створення оптичної системи було обрано чотирилінзовий об'єктив, виготовлений з оптичного скла зі спектральним діапазоном 8-12 мкм. Об'єктив демонструє відмінні показники дисторсії та МПФ. Для приймача випромінювання було обрано сенсор ASP-HR640. Функціональна схема зображена на рис. 2.1.

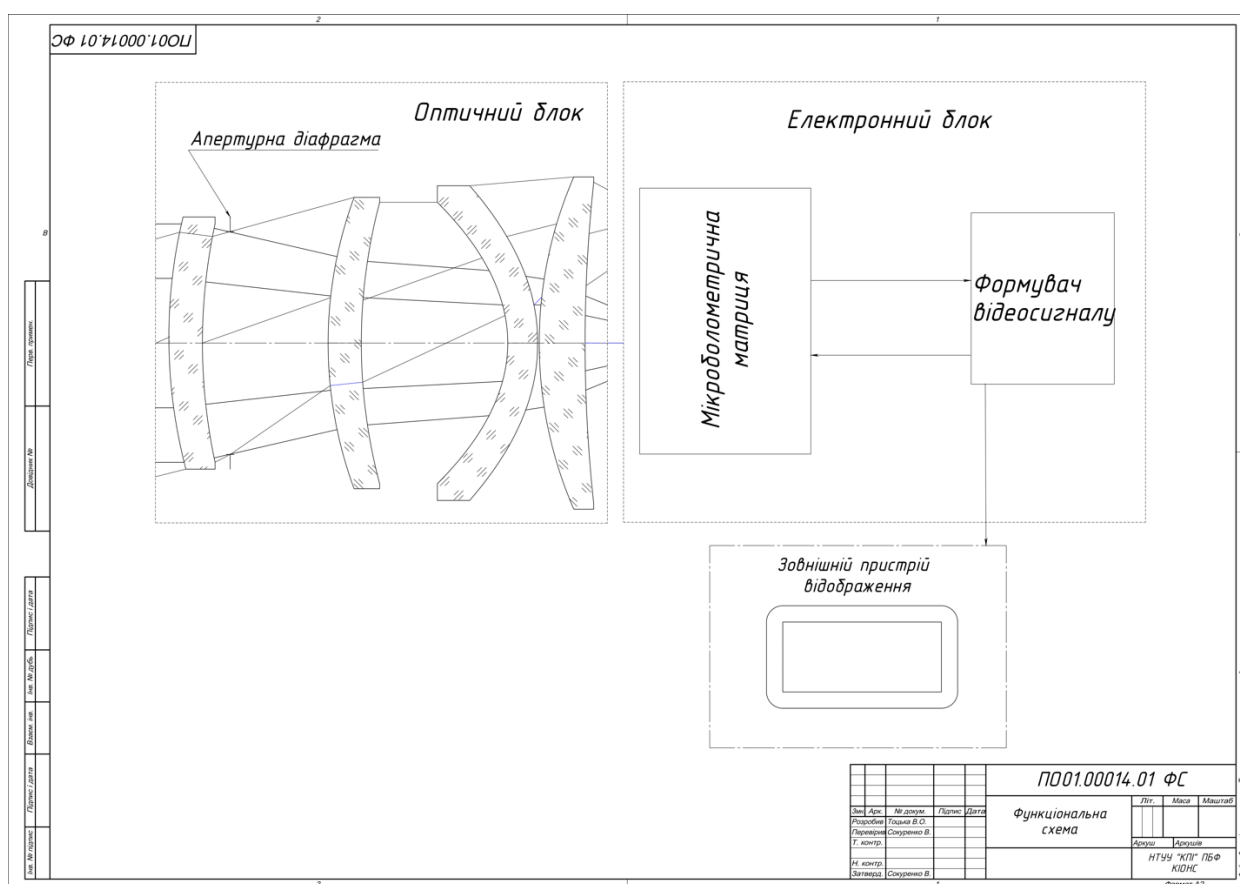


Рис.2.1. – Функціональна схема об'єктива

LWIR камера функціонує на основі проєкційної оптичної системи, спеціально розробленої для довгохвильового інфрачервоного діапазону. Ця оптична система фокусує інфрачервоне випромінення на задній елемент, де розташований сенсор LWIR. Сенсор LWIR реагує на довгохвильове інфрачервоне випромінення, перетворюючи його на електричні сигнали. Камера здатна проєктувати відображене зображення на екран комп'ютера.

Цей прилад призначений для використання у сфері безпеки та спостереження, а також у наукових дослідженнях у лабораторних умовах.

У сфері безпеки він забезпечує надійний та ефективний моніторинг об'єктів в умовах поганої видимості, таких як нічний час або складні погодні умови. Камера дозволяє виявляти людей і транспортні засоби, що допомагає запобігати несанкціонованому доступу та підвищувати загальну безпеку об'єктів.

Цей прилад дає змогу проводити детальний аналіз теплових властивостей матеріалів, проводити дослідження у галузі спектроскопії та теплових процесів. Завдяки чутливості до довгохвильового інфрачервоного випромінення, камера може виявляти температурні аномалії та зміни, які не видимі у видимому спектрі.

Сучасна роздільна здатність мікроболометричної матриці 640×480 пікселів та розміру пікселя 12 мкм, LWIR камера здатна забезпечити докладне зображення об'єктів навіть в умовах обмеженого освітлення. Це особливо важливо у сферах спостереження та військового застосування, де важливо точно ідентифікувати об'єкти та виявляти потенційні загрози.

Роздільна здатність 640×480 пікселів дозволяє отримувати зображення з високим рівнем деталізації, що дозволяє користувачам отримувати докладну інформацію про стан об'єктів та їх навколишнє середовище. Завдяки цій роздільності, користувачі можуть виявляти навіть невеликі деталі в зоні спостереження.

Розмір пікселя 12 мкм гарантує високу чутливість камери до інфрачервоного випромінення, що дозволяє виявляти теплові різниці навіть у далеких відстанях. Це особливо корисно в військових застосуваннях, де важливо виявляти теплові сліди

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 36   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

ворожих об'єктів або осіб у різних умовах, таких як нічний час або погана видимість.

У сфері спостереження та військового застосування, висока роздільна здатність та чутливість LWIR камери роблять її незамінним інструментом для забезпечення безпеки, виявлення загроз і вирішення завдань навігації в умовах обмеженого видимого світла.

## 2.2. Висновки до розділу 2

Під час аналізу моделі, що розробляється, було визначено, що LWIR камера може забезпечити високоякісні зображення об'єктів у довгохвильовому інфрачервоному діапазоні. Вона використовує проєкційний об'єктив для фокусування інфрачервоного випромінення, яке потім конвертується в електричні сигнали за допомогою матричного приймача випромінення. Отримані зображення можуть бути відображені для подальшого аналізу та обробки. Розглянута LWIR камера може знайти у широкому спектрі галузей, включаючи спостереження, військове застосування та теплові дослідження.

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 37   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

## РОЗДІЛ 3

### КОНСТРУКТОРСЬКІ РОЗРАХУНКИ

#### 3.1. Вимоги до габаритного розрахунку

Розрахунки габаритів та параметрів важливі у процесі проектування об'єктива. Вони визначають ключові характеристики і параметри лінзи. З урахуванням обраного приймача проводимо аналіз параметрів оптичної системи пристрою.

Згідно з технічним завданням:

- кутове поле зору – 40 градусів;
- спектральний діапазон – 8...12 мкм.

#### 3.2. Розрахунок фокусної відстані об'єктива

Фокусну відстань визначимо за допомогою схеми, яка показана нижче на рис. 3.1:

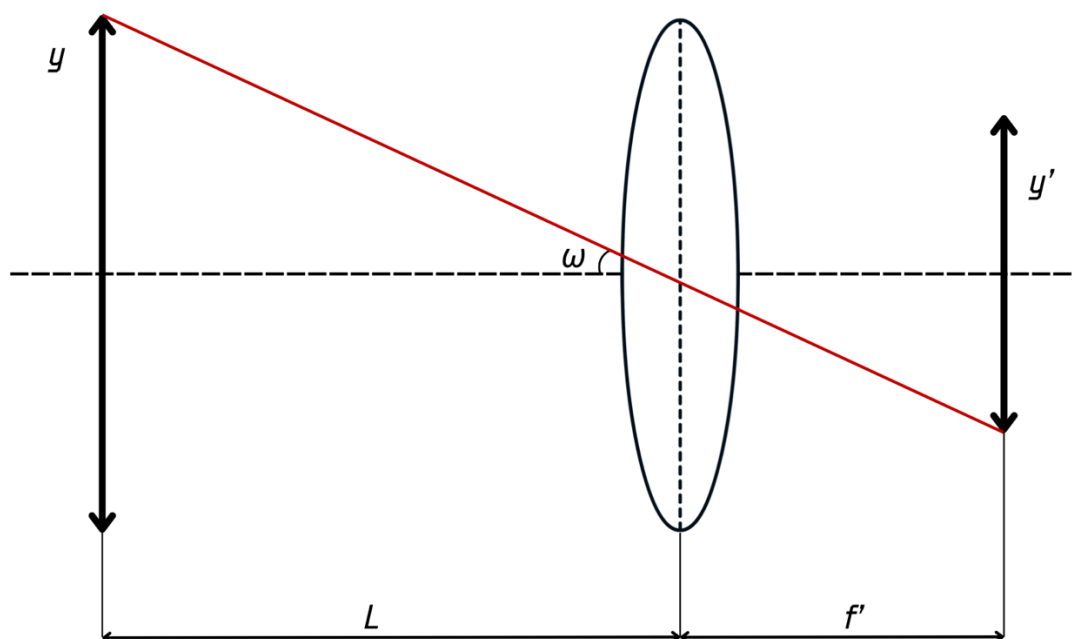


Рис. 3.1 – Спрощена схема формування зображення

Значення діагоналі чутливої площадки приймача SP-HR640 з роздільною здатністю 640×480 та розміром пікселя 12 мкм:

$$2y' = \sqrt{(12 * 640)^2 + (12 * 480)^2} = 10,53 \text{ мм}; \quad (3.1)$$

$$y' = \frac{10,527}{2} = 5,26 \text{ мм}. \quad (3.2)$$

де  $y'$  – половина максимального розміру зображення.

Для визначення фокусної відстані використаємо числове значення кутового поля, яке було задане в технічному завданні –  $2\omega = 40^\circ$ :

$$\omega = 20^\circ$$

$$f' = \frac{y'}{\operatorname{tg} \omega} = \frac{5,264}{\operatorname{tg}(20^\circ)} = 14,46 \text{ мм}. \quad (3.3)$$

Відносний отвір системи встановимо рівним:

$$\frac{1}{F} = \frac{D}{f}; = 1:1. \quad (3.4)$$

### 3.3. Параметричний абераційний синтез та аналіз якості зображення

Параметричний синтез та аналіз якості зображення мають на меті оптимізувати параметри оптичної системи, такі як фокусна відстань, діаметр апертури, параметри оптичних елементів тощо, для досягнення заданих вимог щодо якості зображення.

У цій роботі було проведено автоматизований параметричний синтез чотирилінзового проєкційного об'єктива, розрахованого на довгохвильовий інфрачервоний діапазон LWIR від 8 до 12 мкм. Цей об'єктив спроектований для використання з матричним приймачем випромінення, який має діагональ чутливої площадки 14,8 мм.

Для автоматизованого проєкційного синтезу був використаний модифікований адаптивний алгоритм диференційної еволюції, вбудований в програмне забезпечення PODIL.

Сутність цього алгоритму полягає в тому, щоб знайти оптимальні значення параметрів оптичної системи, які відповідають вимогам та критеріям оптимальності. Алгоритм зберігає значення двох параметрів диференційної еволюції для кожної точки популяції та використовує їх для створення нових точок. Завдяки

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 39   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

використанню розподілу Коші, алгоритм дозволяє вивчити багатовимірний простір можливих рішень і уникнути надто ранньої збіжності до локальних мінімумів.

Однією з переваг цього методу є можливість розпочати розрахунок системи з простих структур та глибоке розуміння оптичних основ, знання оптичних матеріалів та володіння програмним забезпеченням для аналізу результатів.

Для розрахунку ОС були встановлені такі параметри та обмеження:

- відносний отвір: 1:1;
- спектральний діапазон: 8...12 мкм;
- основна довжина хвилі: 10 мкм;
- кутове поле зору: 40°;

У табл. 3.1 представлені конструктивні параметри розробленої ОС об'єктива. ОС містить 4 асферичні лінзи 2-го порядку. Загальна довжина шляху по осі – 33,3 мм. Максимальна висота (світловий радіус) поверхні – 10,5 мм.

Таблиця 3.1

Конструктивні параметри розрахованого об'єктива

| № пов   | Радіус Y   | Товщина    | Середовище | Висота | Конічний коеф. Y |
|---------|------------|------------|------------|--------|------------------|
| Предмет | Нескінчен. | Нескінчен. |            | 0,000  | 0                |
| 1       | 33,48268   | 2,004      | Germanium  | 7,844  | -9,8076          |
| 2       | 35,823169  | 1,750      |            | 7,411  | -14,8127         |
| 3(АД)   | Нескінчен. | 6,183      |            | 6,914  | 0,0000           |
| 4       | 26,589696  | 2,096      | Germanium  | 9,164  | -1,1843          |
| 5       | 34,618999  | 9,250      |            | 8,856  | -1,6724          |
| 6       | -6,579409  | 1,878      | ZnSe       | 8,854  | -1,7398          |
| 7       | -8,497362  | 0,105      |            | 9,799  | -1,8484          |

|         |            |       |           |        |          |
|---------|------------|-------|-----------|--------|----------|
| 8       | 26,317626  | 2,9   | Germanium | 10,466 | -3,4772  |
| 9       | 94,903884  | 6,124 |           | 10,134 | -43,9750 |
| 10      | Нескінчен. | 0,5   | Germanium | 5,805  | 0        |
| 11      | Нескінчен. | 0,5   |           | 5,724  | 0        |
| Зображ. | Нескінчен. | 0     |           | 5,320  | 0        |

Марки скла об'єктива були автоматично підібрані програмою з каталогу "INFRARED".

Схема розрахованої ОС об'єктива представлена на рис. 3.2.

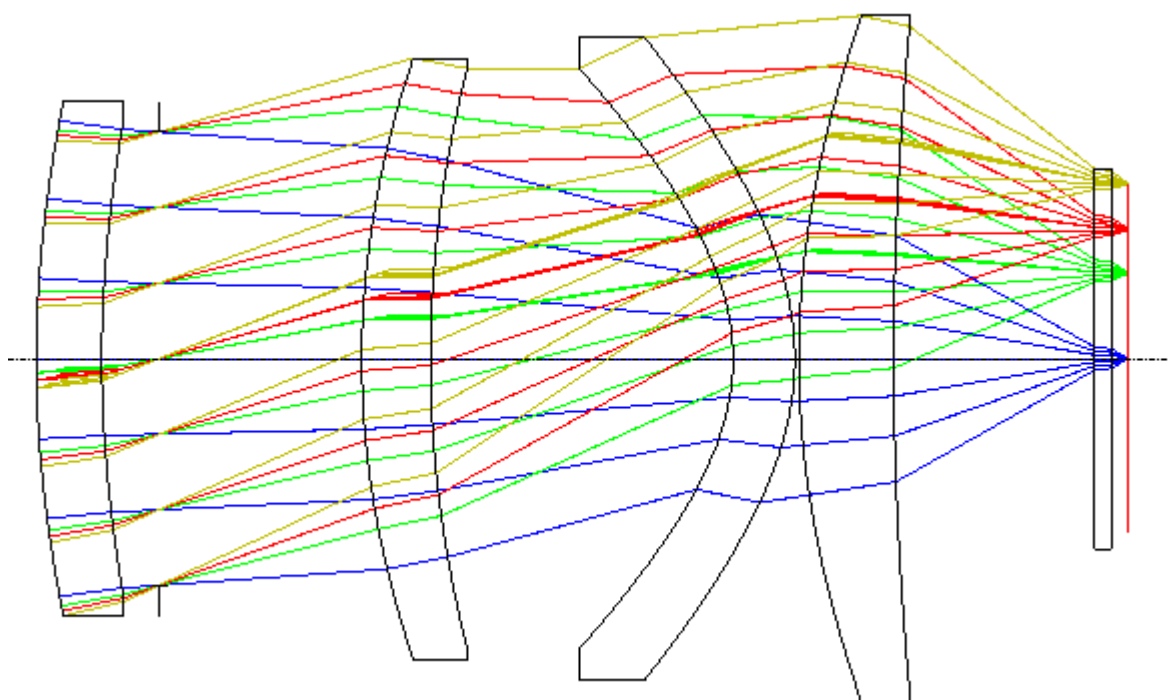


Рис. 3.2 – Оптична схема розробленого об'єктива

### 3.4. Оцінка якості зображення

Аналіз якості зображення був виконаний за допомогою програмного забезпечення Aber.

На рис. 3.3 зображена класична точкова діаграма для розробленої ОС. Вона дозволяє візуалізувати відхилення від ідеального фокусування та показує, як світло від точкового джерела фокусується в різних точках зображення. В ідеальній оптичній системі, яка не має аберацій і де всі світлові промені правильно фокусуються в одній точці, усі точки від різних джерел зібрані в одну точку на площині фокусування. Це означає, що система має ідеальну роздільну здатність і немає спотворень зображення. Ідеальна точкова діаграма є однією точкою або дуже малою, симетричною плямою. Розмір точки визначається дифракційною межею оптичної системи і залежить від довжини хвилі світла та діаметру апертури.

У реальних оптичних системах існують різні види аберацій і недосконалостей, що призводить до відхилень у точковій діаграмі. Точки, які повинні були б зібратися в одну точку, розкидані по певній області на площині фокусування.

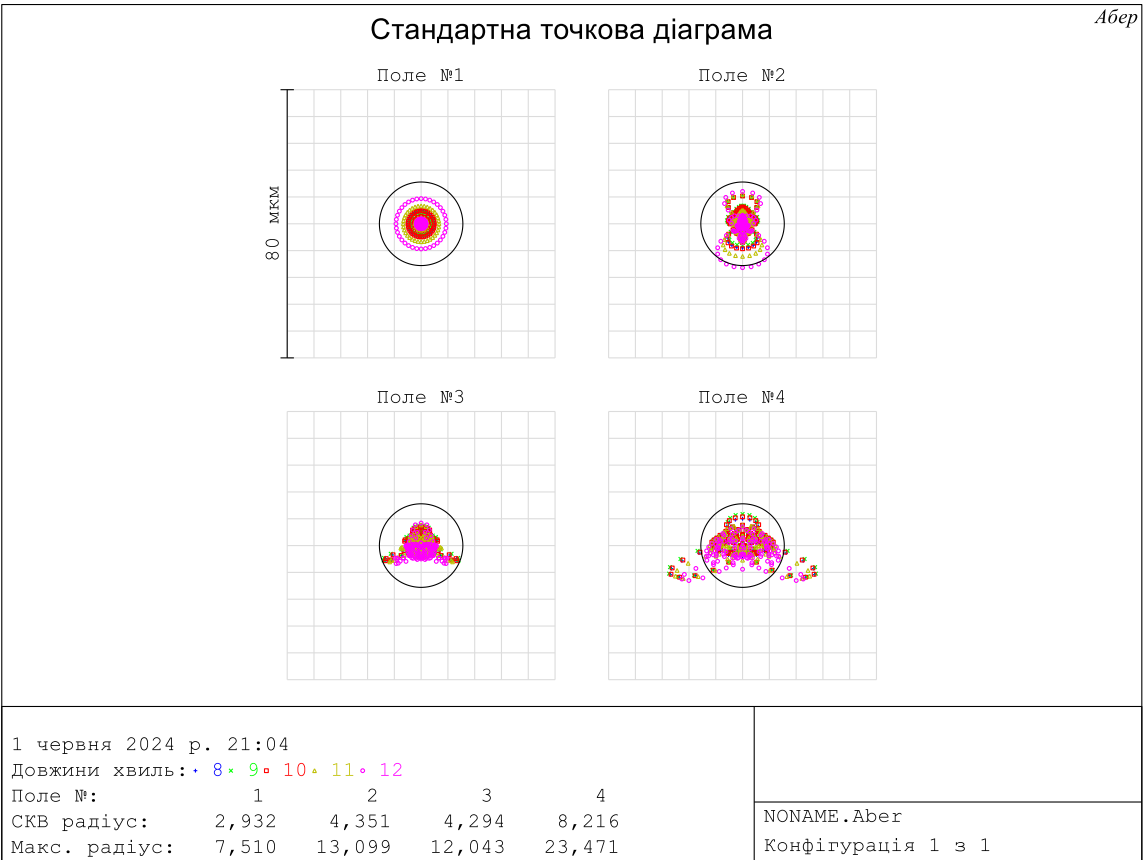


Рис. 3.3 – Класична точкова діаграма

У визначеному діапазоні (8-12 мкм) максимальні значення радіусів світлових плям не перевищують 8,22 мкм у центральній зоні та 23,5 мкм на периферії поля зору.

Проведемо аналіз аберацій розробленої ОС, що дозволяє визначити та оцінити відхилення від ідеального зображення. Аберації впливають на якість зображення, що створюється оптичною системою. Вони призводять до різних видів спотворень, які можуть зменшити чіткість, точність і загальну роздільну здатність зображення.

На рис. 3.4-3.11 представлені різні аберації даної ОС.

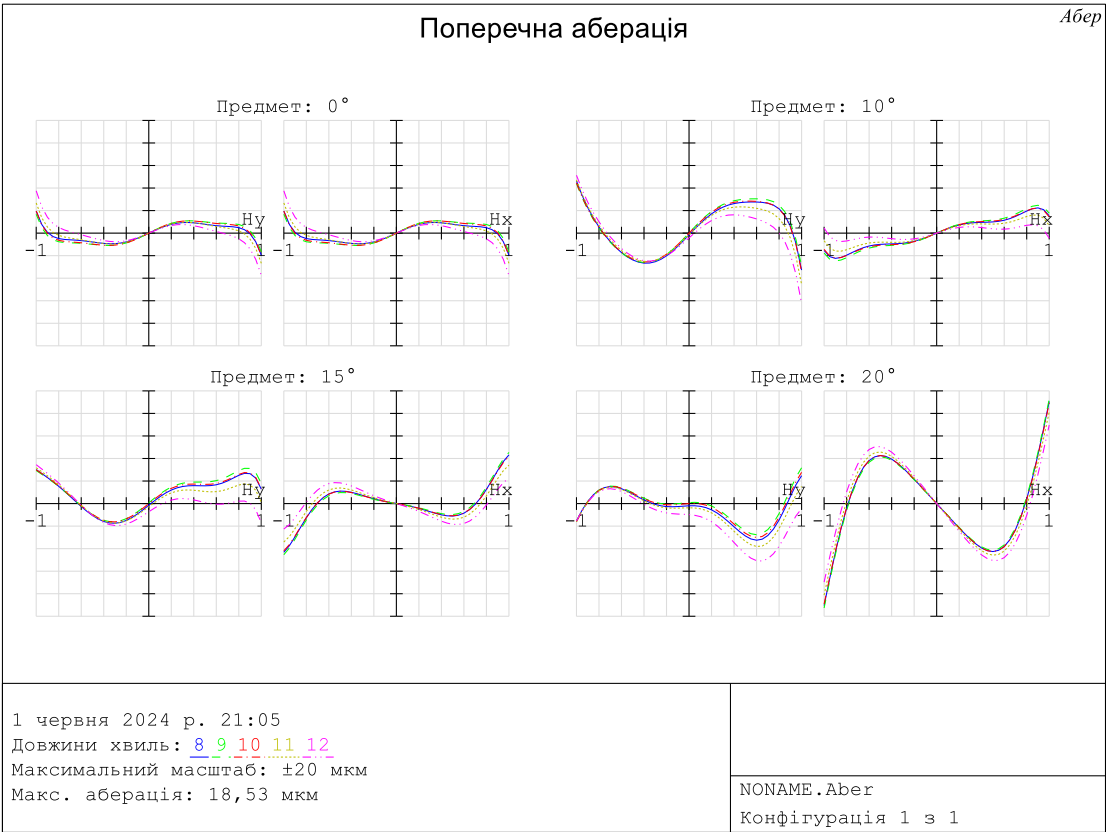


Рис. 3.4 – Графіки поперечної аберації

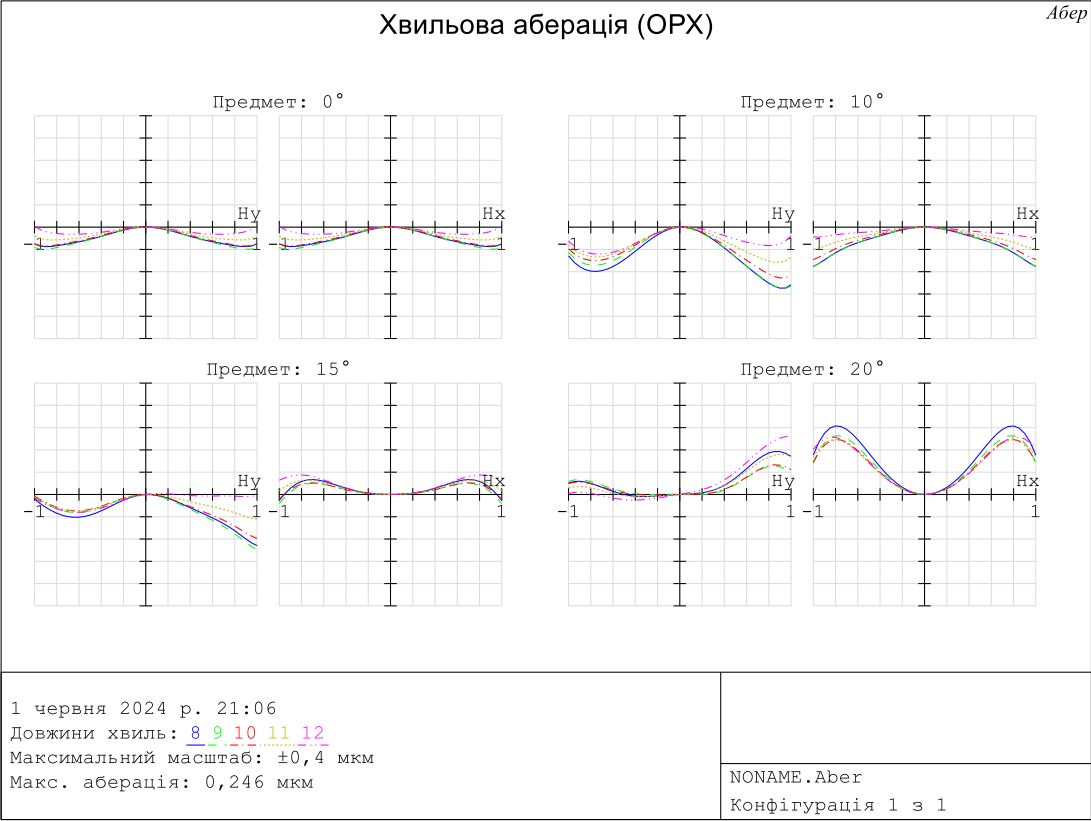


Рис. 3.5 – Графіки хвильової аберації

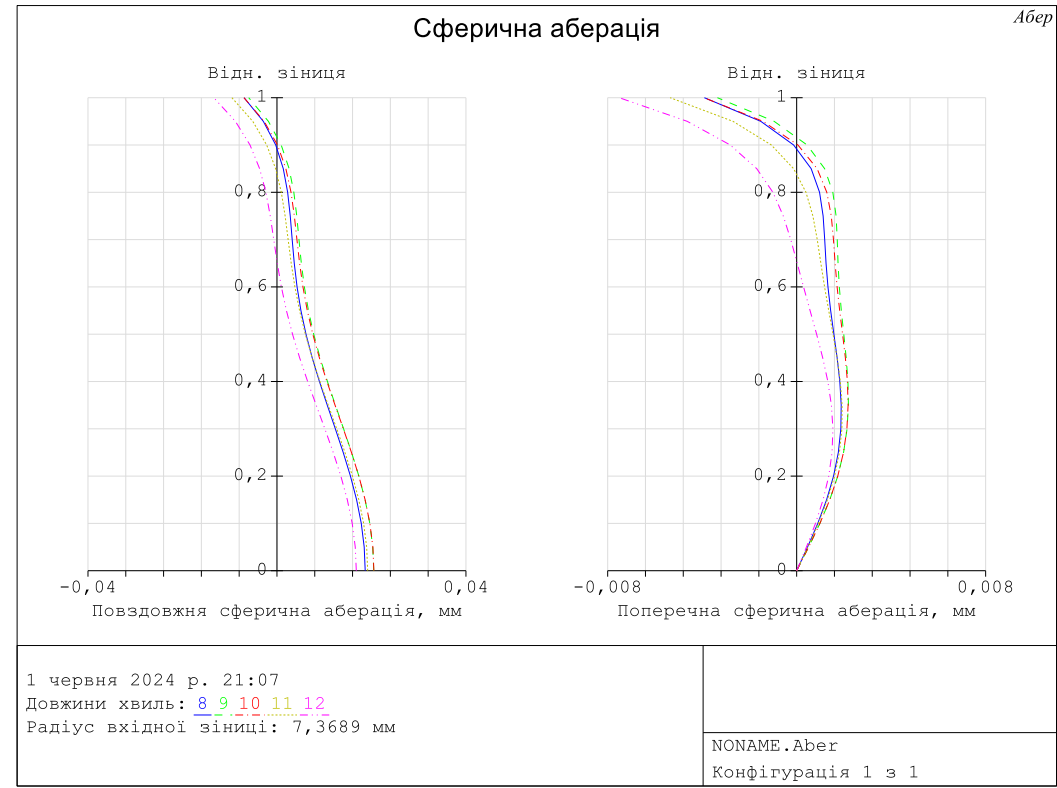


Рис. 3.6 – Графіки сферичної аберації

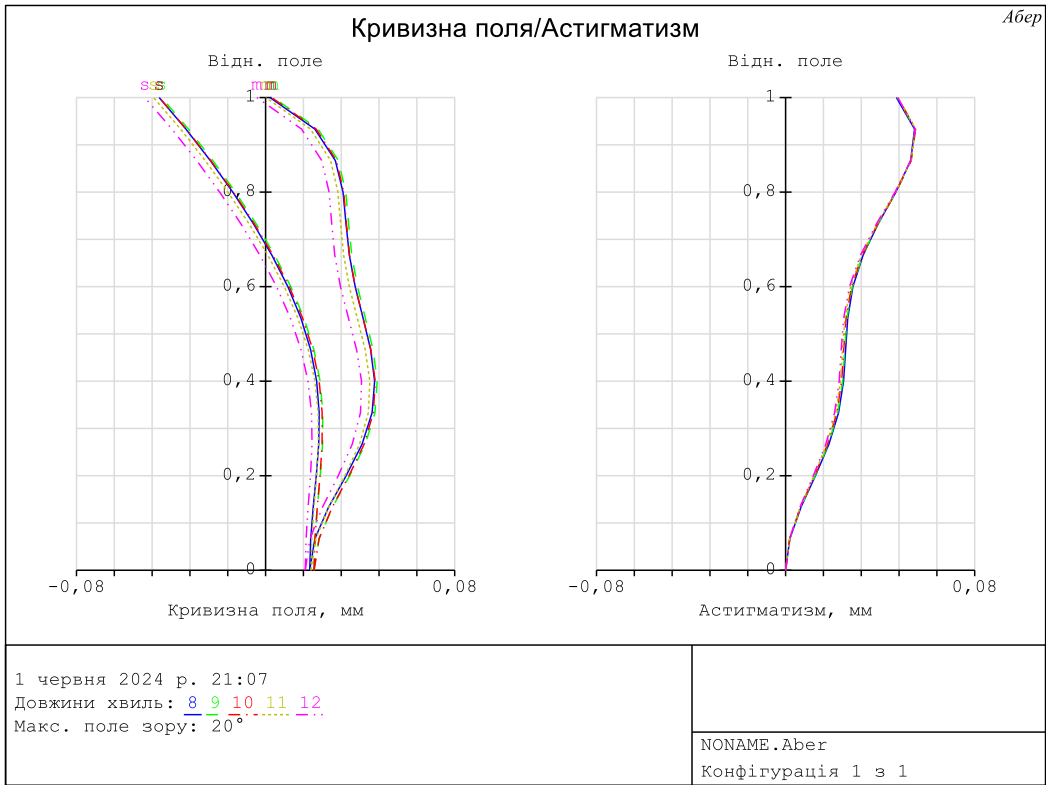


Рис. 3.7 – Графіки кривизни поля/астигматизму

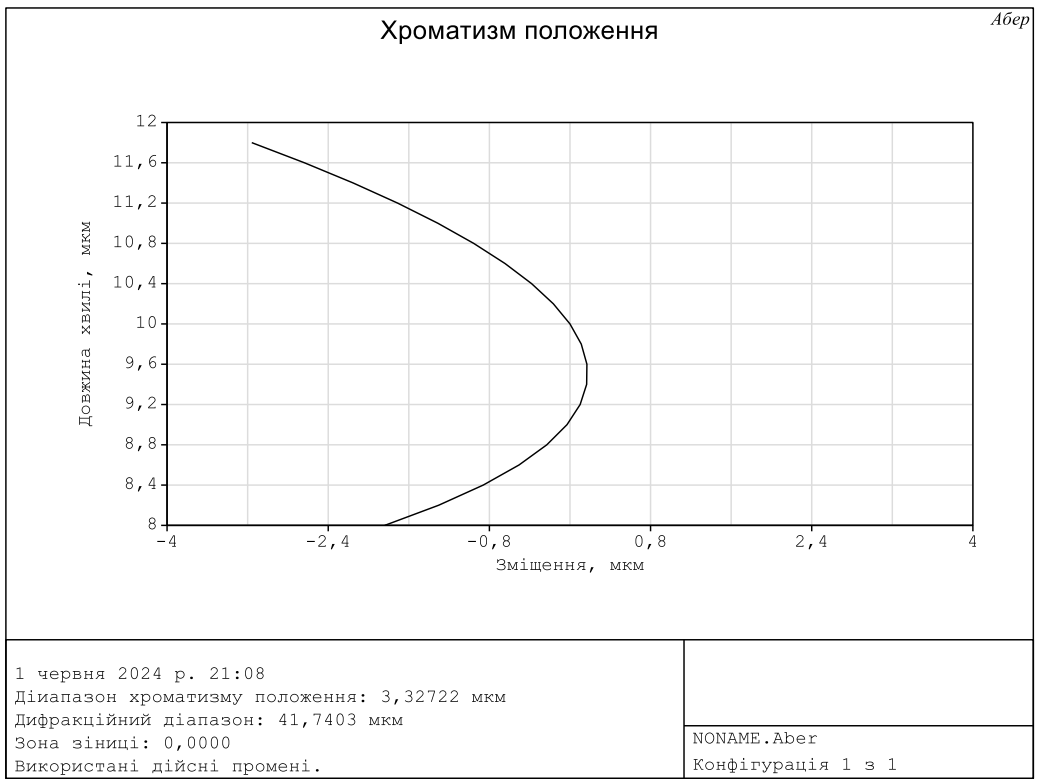


Рис. 3.8 – Графік хроматичного положення

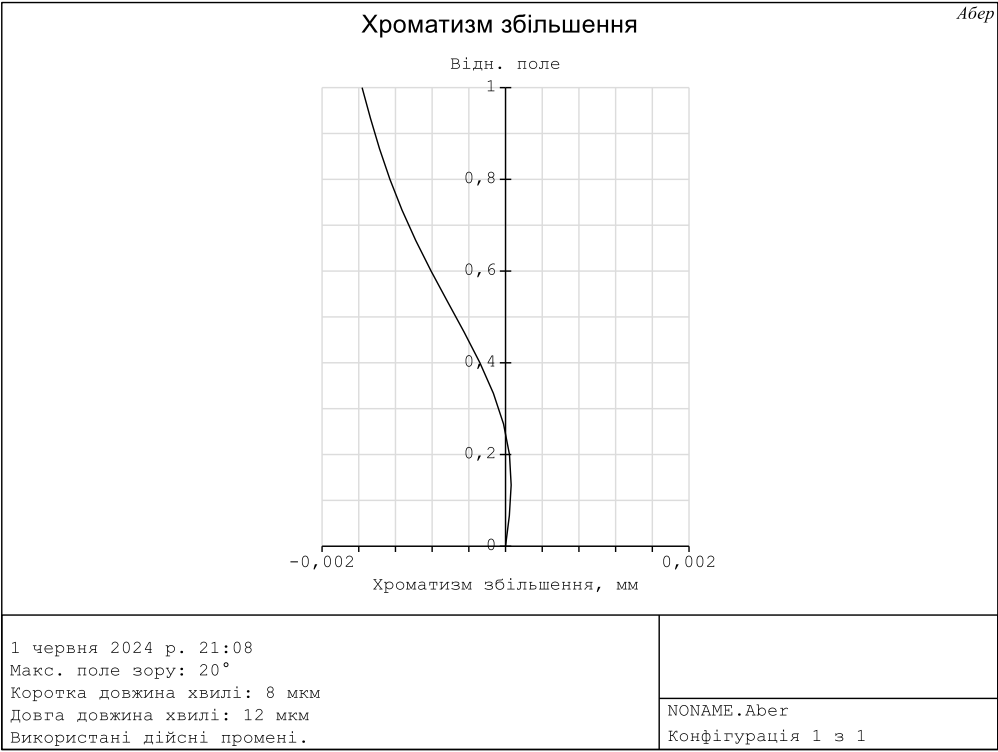


Рис. 3.9 – Графік хроматичного збільшення

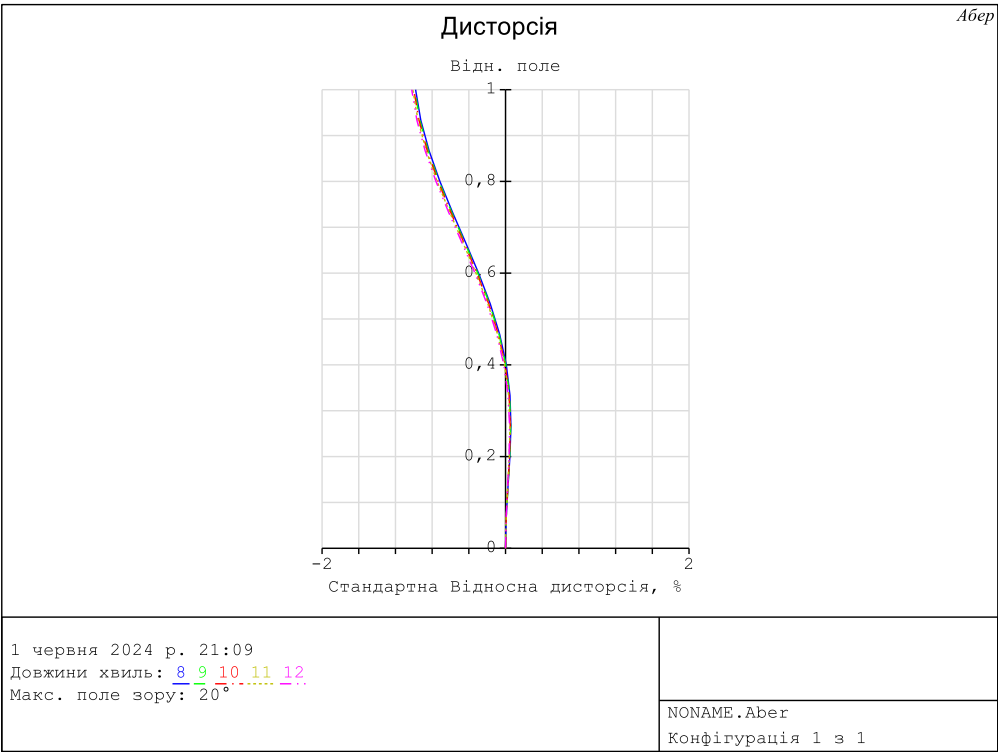


Рис. 3.10 – Графік дисторсії

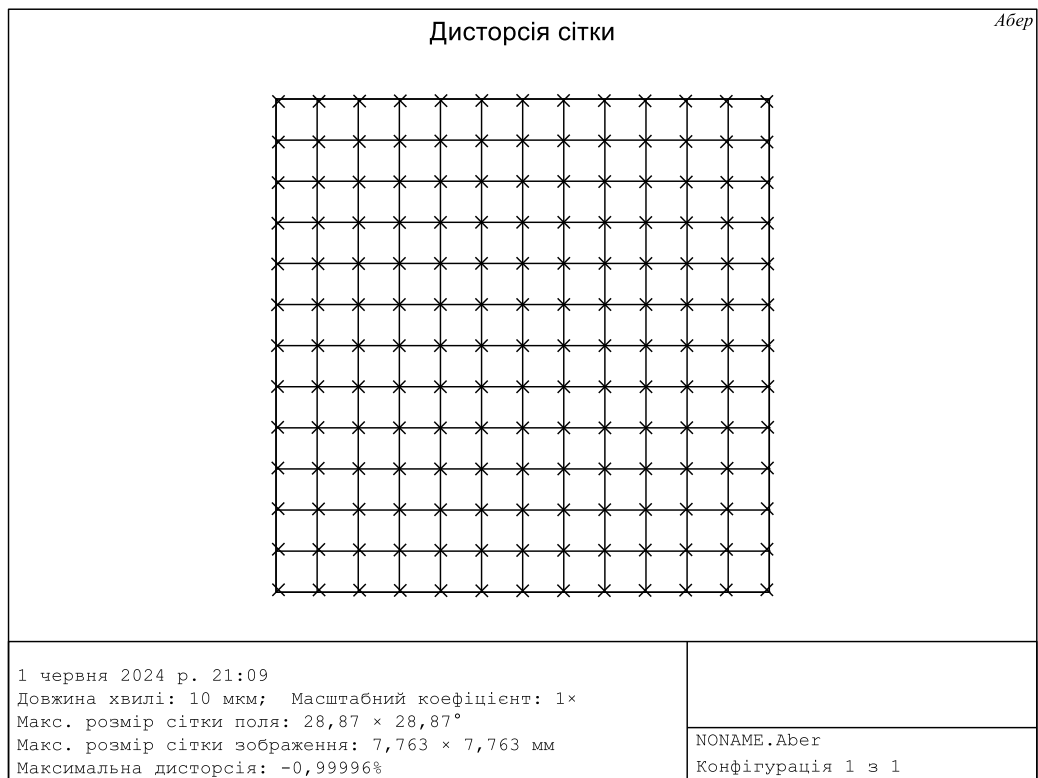


Рис. 3.11 – Дисторсія сітки

Аналіз аберацій допоміг оцінити, що дана модель ОС має високу якість зображення. Відносна дисторсія об'єктива не перевищує 1% та є непомітною людському оку (рис. 3.11).

Для визначення здатності оптичних систем розрізняти деталі об'єктів застосовуються критерії Релея і Марешаля.

Критерій Релея визначає роздільну здатність оптичної системи на основі дифракційних ефектів. Згідно з цим критерієм, дві точкові світлові джерела вважаються розрізняваними, якщо максимум дифракційної картини одного джерела збігається з першим мінімумом дифракційної картини іншого джерела. За критерієм Релея перепад хвильового фронту в дифракційно-обмеженій системі має бути меншим за  $0,25 \lambda$ . В розрахованому варіанті видно, що перепад хвильового фронту дорівнює  $0,067 \lambda$  (рис. 3.12).

Критерій Марешаля є більш суворим порівняно з критерієм Релея і враховує вплив аберацій на якість зображення. Він визначає, наскільки зображення об'єкта відхиляється від ідеального (абераційного) зображення.

За критерієм Маршаля, оптична система вважається близькою до дифракційної межі, якщо СКВ-значення деформації хвильового фронту в дифракційно-обмеженій системі не перевищує  $0,072 \lambda$ .

СКВ деформації хвильового фронту дорівнює  $0,018 \lambda$  (рис. 3.12).

Отримані значення показують, що оптична система за даними критеріями є ідеальною (дифракційно-обмеженою) системою.

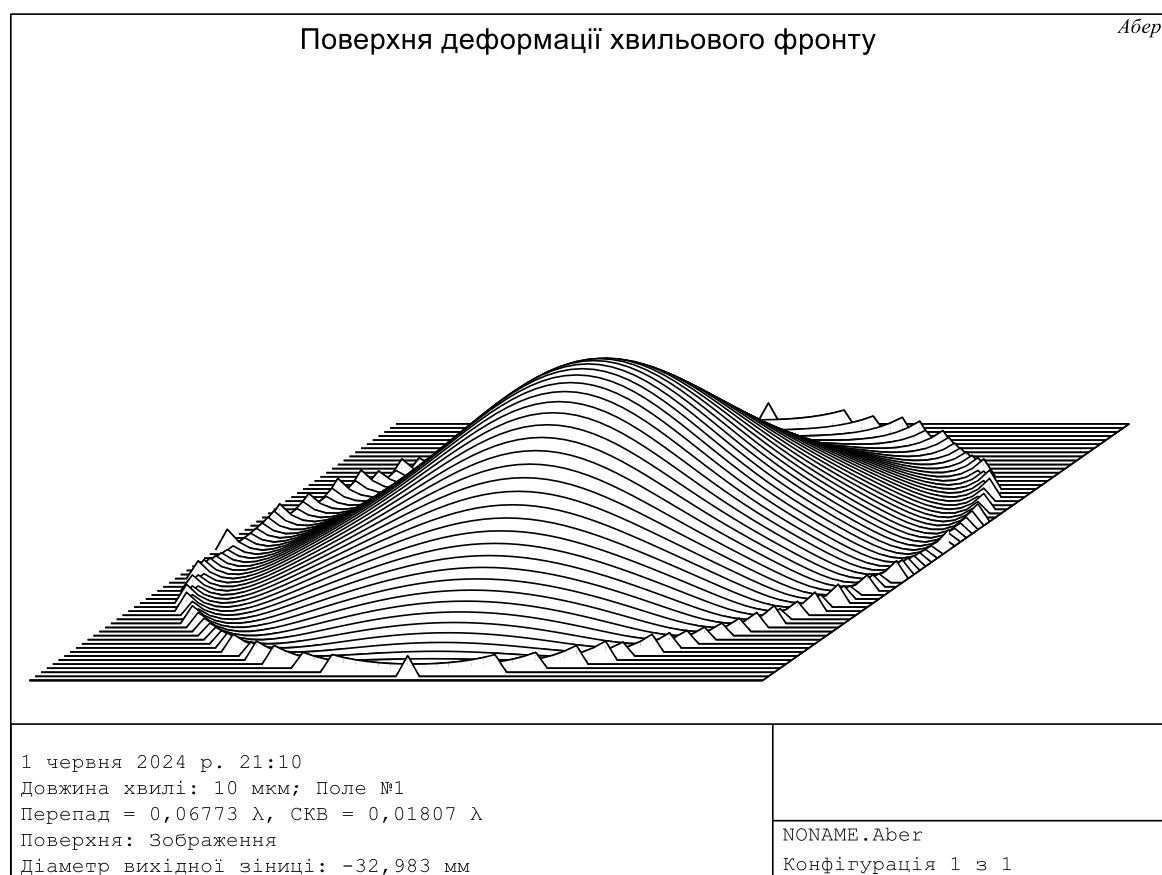


Рис. 3.12 – Поверхня деформації хвильового фронту

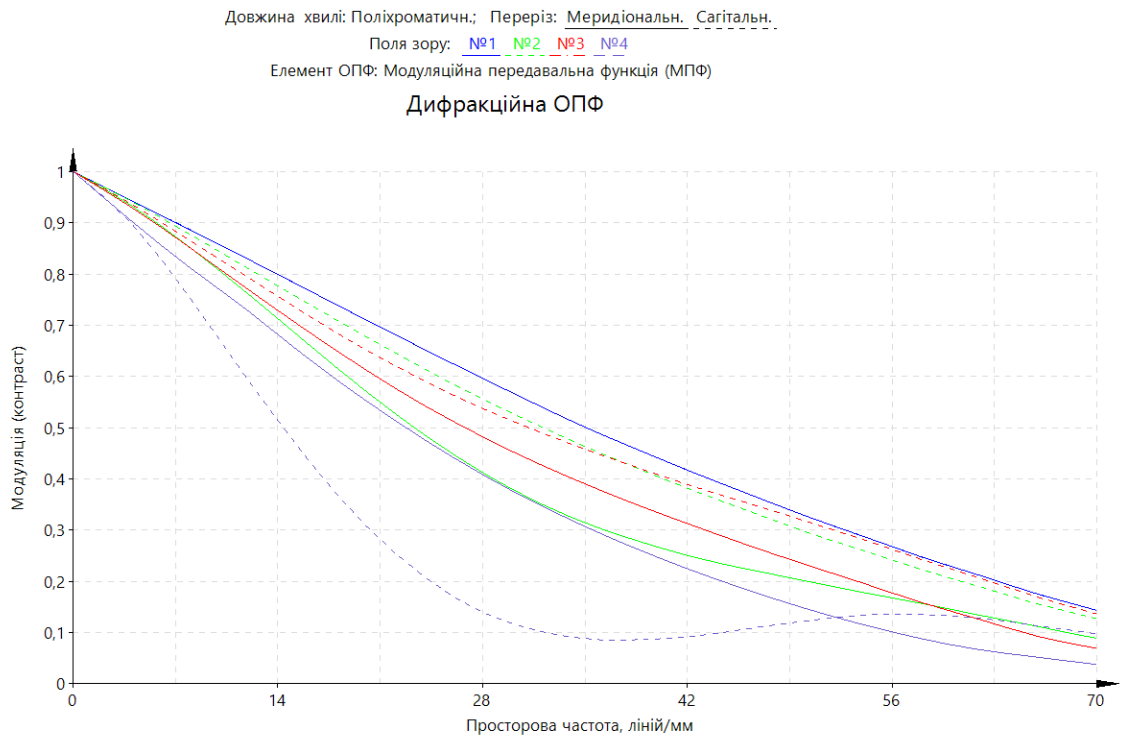


Рис. 3.13 – МПФ розробленого LWIR-об'єктива

Графік модуляційної передавальної функції показує, що при низьких просторових частотах (див. рисунок 3.13), всі криві починаються з високого значення (близько 1). Це означає, що об'єктив добре передає великі структури з високим контрастом. Зі збільшенням просторової частоти (рухаючись вправо по графіку), контрастність зменшується для всіх кривих. Це типова поведінка, оскільки високі просторові частоти відповідають дрібним деталям, які важче передати з високим контрастом. Графік показує, що всі криві наближаються до нуля при високих просторових частотах ( $>70$  ліній/мм), що є ознакою дифракційної межі об'єктива. Це максимальна просторова частота, при якій об'єктив може передавати деталі з певним рівнем контрасту.

3D модель синтезованої ОС показана на рисунку 3.14:

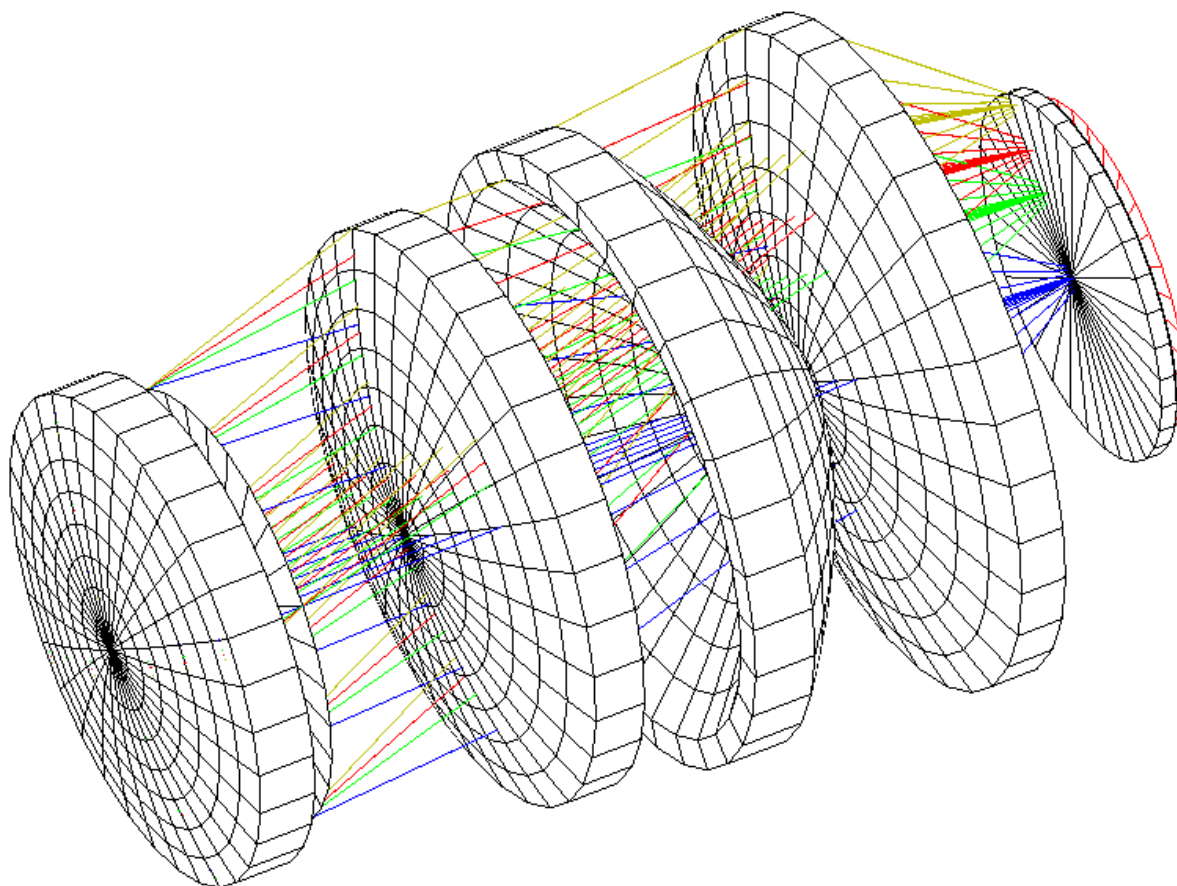


Рис. 3.14 – 3D модель синтезованого LWIR-об'єктива

### 3.5. Енергетичні розрахунки

Енергетичні розрахунки для оптичних систем важливі для оптимізації передачі світла, оцінки втрат енергії, вибору матеріалів і покриттів, забезпечення безпеки, підвищення чутливості та роздільної здатності, контролю теплових ефектів, а також корекції кольорів. Вони допомагають зменшити втрати, покращити якість зображення, забезпечити безпеку при роботі з потужними джерелами світла, і забезпечити точність діагностики та спостереження. Наприклад, у телескопах вони дозволяють виявляти слабкі об'єкти, а в медичних приладах — забезпечують чітке і контрастне зображення.

#### 3.5.1. Розрахунок коефіцієнту пропускання ОС

Коефіцієнт пропускання оптичної системи (ОС) є важливим параметром, який характеризує здатність системи пропускати світлове випромінення через себе. Коефіцієнт пропускання розробленої ОС розраховується як добуток втрат світла через поверхневі покриття та втрат світла через поглинання.

$$\tau_{oc} = T_R * T_K, \quad (3.5)$$

де

$T_R = \prod_{i=1}^M (1 - R_i)$  – коефіцієнт пропускання лінз за рахунок втрат на відбивання;

$M$  – кількість поверхонь в оптичній системі;

$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2$  – френелівське відбиття на межі поділу;

$T_K = (1 - \alpha)^d$  – коефіцієнт пропускання лінз за рахунок втрат на поглинання;

$\alpha$  – коефіцієнт поглинання світла;

$d$  – товщина оптичних елементів системи в сантиметрах.

При використанні просвітлюючого покриття GEVBAR-2-14-25 коефіцієнт відбиття  $R$  може бути зменшено до 0,04 у спектральному діапазоні 8-12 мкм [18]:

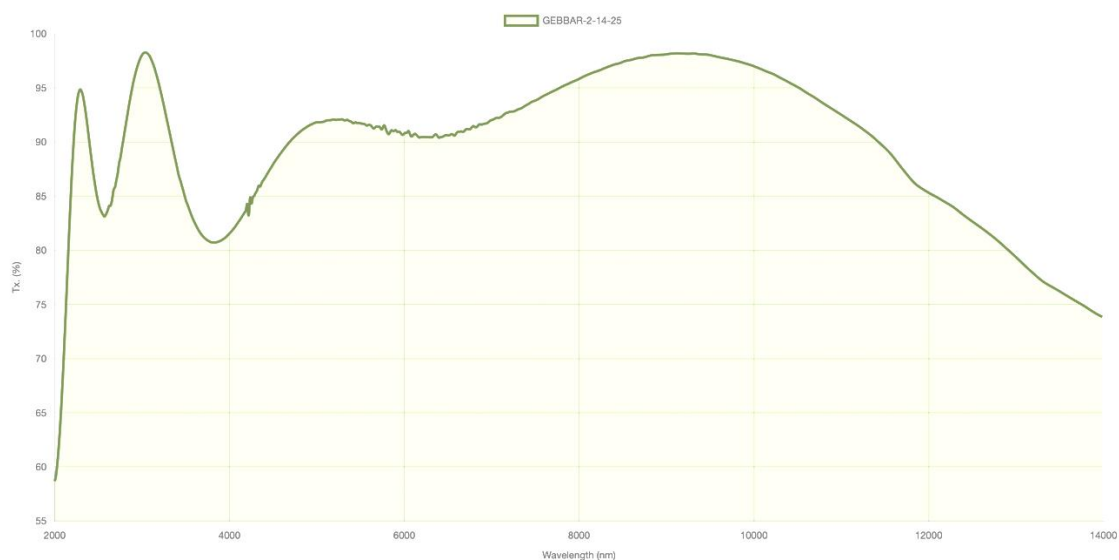


Рис.3.15 – Просвітлююче покриття GEVBAR-2-14-25 для діапазонів 2000-14000 нм [18]

$$T_R = (1 - 0,04)^{11} = 0,64; \quad (3.6)$$

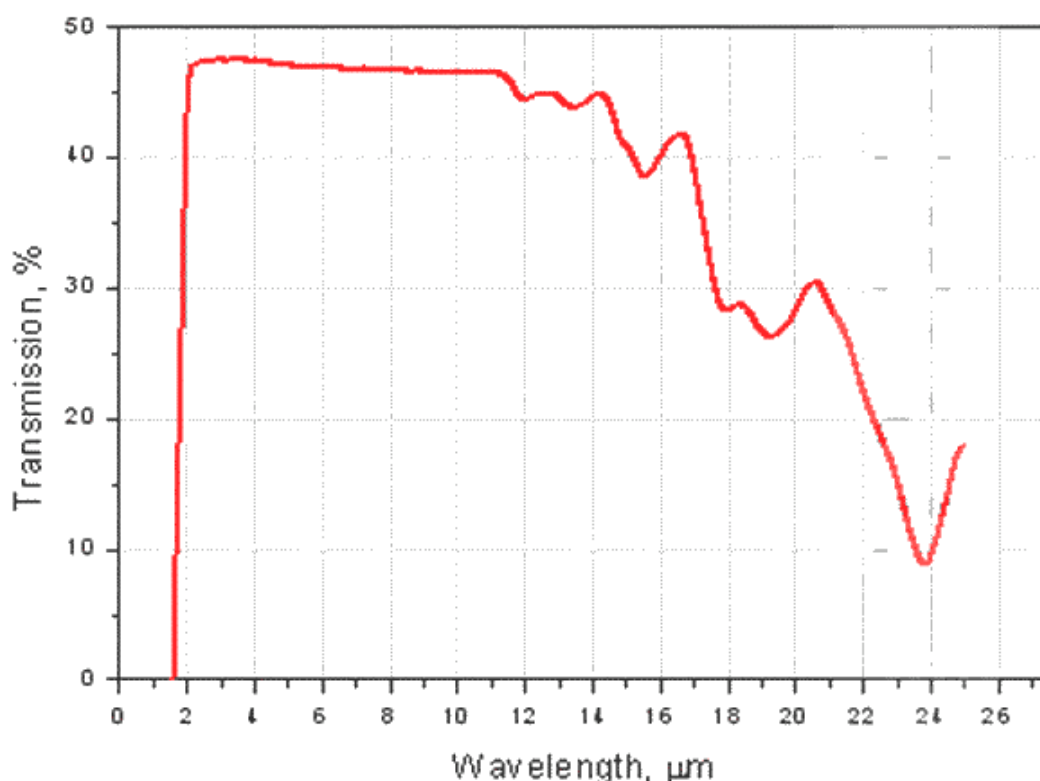


Рис.3.15 – Коефіцієнт пропускання для германію для діапазону 0-24000 мкм [19]

$$T_K = (1 - 0,5)^{0,44} = 0,74; \quad (3.7)$$

$$\tau_{oc} = 0,64 * 0,74 = 0,5 \quad (3.8)$$

Таким чином, використання багатошарового просвітлювального покриття призведе до того, що коефіцієнт пропускання становитиме приблизно 50%.

### 3.5.1. Розрахунок опроміненості на площині матриці

Розрахунок опроміненості на поверхні матриці камери допомагає визначити, як світло розподіляється на поверхні матриці. Ці дані допомагають покращити якість зображень, що фіксуються камерою, та оптимізувати роботу камери в цілому. Нижче приведена формула розрахунку опроміненості на поверхні:

$$E = \frac{1}{4} \pi \tau_{oc} L \left( \frac{D}{f_i} \right)^2, \text{ де}$$

$\tau_{oc}$  – коефіцієнт пропускання для ОС;

$L$  – енергетична яскравість (променистість) предмета;

$\frac{D}{f_i}$  – відносний отвір.

Значення енергетичної яскравості для навколишнього середовища в діапазоні довжин хвиль 8-12 мкм для середніх умов при температурі близько 300 К (27 °С) можна розрахувати за формулою Планка:

$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} * \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \text{ де} \quad (3.10)$$

$L(\lambda, T)$  – енергетична яскравість на довжині хвилі  $\lambda$  при температурі  $T$ ,

$h$  – стала Планка ( $6,626 * 10^{-34}$  Дж\*с),

$c$  – швидкість світла ( $3 * 10^8$  м/с),

$\lambda$  – довжина хвилі,

$k$  – стала Больцмана ( $1,381 * 10^{-34}$  Дж/К)

$T$  – абсолютна температура (в Кельвінах).

При основній довжині хвилі 10 мкм енергетична яскравість становить:

$$L(\lambda, T) = 0,004 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{ср}}$$

$$E = \frac{1}{4} * \pi * 0,5 * 0,004 * \frac{1^2}{1} = 0,002 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (3.10)$$

Опроміненість на площині матриці приладу становить  $0,002 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ . Для покращення цього результату за потреби можна розглянути покращення коефіцієнта пропускання (використання більш якісних оптичних компонентів) або збільшення інтенсивності світла на вході оптичної системи.

### 3.6. Висновки до розділу 3

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 53   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

1. У результаті виконання параметричного синтезу було створено чотирилінзовий LWIR-об'єктив, призначений для використання в інфрачервоному спектральному діапазоні від 8 до 12 мкм. Цей об'єктив має фокусну відстань 14,8 мм і відносний отвір 1:1. Для розрахунку цієї системи використовувався метод глобальної оптимізації, а саме метод диференційної еволюції в програмному забезпеченні PODIL.

2. Проведений в програмі Aber абераційний аналіз дозволив встановити, що знайдена ОС забезпечує дифракційно-обмежену якість зображення: об'єктив відмінно передає структури з низькі та високими просторовими частотами в кутовому полі 40°.

3. У всій області зображення спостерігається відносна дисторсія об'єкту, що не перевищує 1%.

4. Застосування багатошарового просвітлювального покриття призведе до того, що коефіцієнт пропускання становитиме приблизно 50%, а опроміненість на площині матриці приладу –  $0,002 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 54   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

## РОЗДІЛ 4

### КОНСТРУКТОРСЬКІ РОЗРОБКИ

Тепловізор як пристрій містить два вузли: розрахований ширококутний об'єктив і приймача SP-HR640 -T-SI. Пристрій має можливість підключатися до комп'ютера.

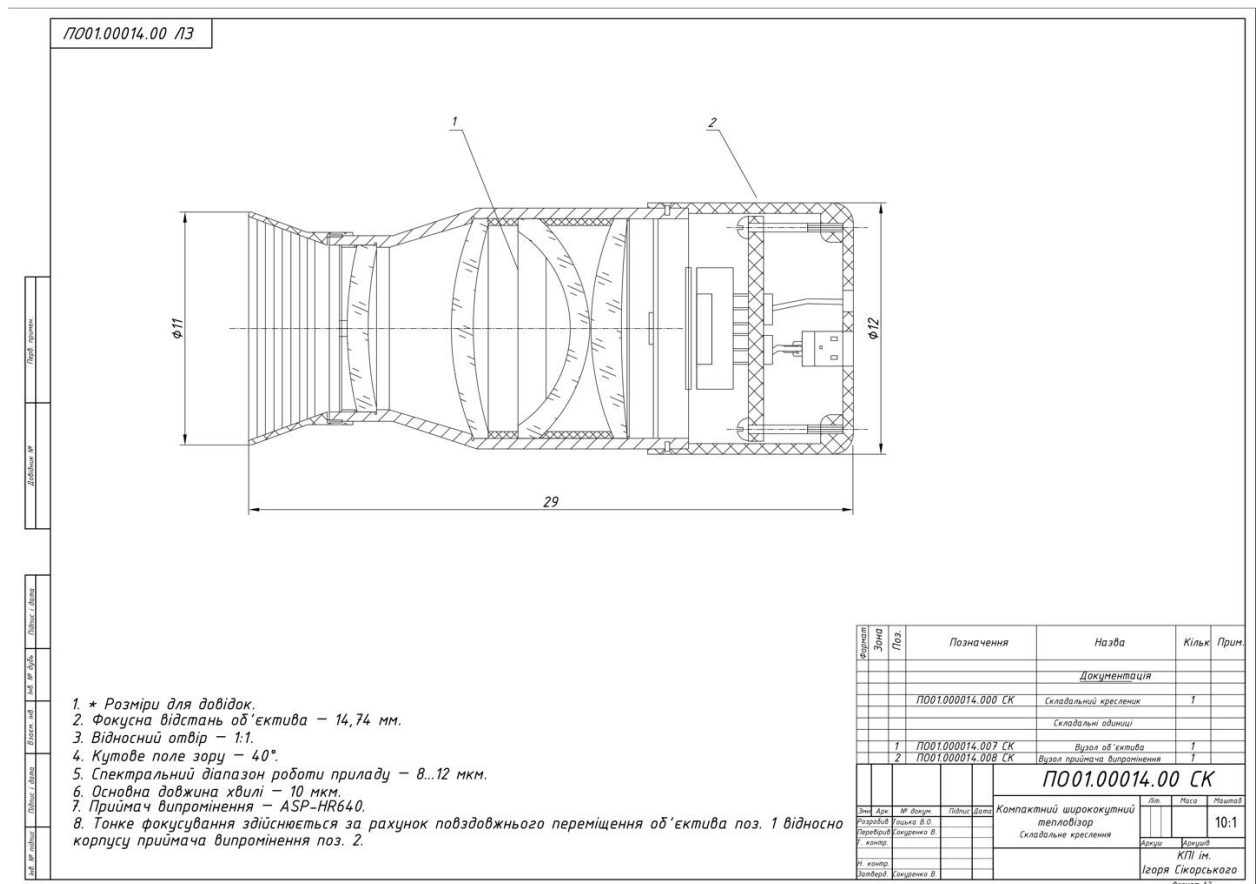


Рис. 4.2 – Складальне креслення об'єктива, створене в програмі AutoCAD

Особливості конструкції корпусу об'єктива включають наступне:

- лінзи оптичної системи закріплюються в корпусі за допомогою притискних та різьбових кілець, що гарантує їх стабільну фіксацію та правильне позиціонування;
- корпус приймача випромінювання включає в себе датчик SP-HR640 та

електронний блок, що забезпечує обробку та передачу отриманих сигналів. ASP-HR640;

- задня частина корпусу фотоприймача оснащена роз'ємом USB та має роз'єм для живлення, що дозволяє забезпечити зручний інтерфейс для передачі даних та живлення пристрою.

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 56   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У результаті виконання даного дипломного проєкту було розроблено прилад для спостереження за об'єктами в довгохвильовому інфрачервоному (LWIR) діапазоні спектра, що охоплює довжини хвиль від 8 до 12 мкм.
2. На основі проведеного аналізу сучасної науково-технічної літератури було визначено типові комерційні моделі довгохвильових інфрачервоних об'єктивів та відповідних приймачів випромінення, що використовуються в різних галузях. Цей аналіз дозволив ідентифікувати найкращі практики та технологічні рішення, що забезпечують високу ефективність і надійність роботи приладів у зазначеному діапазоні.
3. У другому розділі роботи здійснено обґрунтування функціональної схеми приладу та детально описано принцип його дії. Як приймач випромінення була обрана матриця ASP-HR640 з роздільною здатністю  $640 \times 480$  пікселів та розміром пікселів 12 мкм, що забезпечує високу чутливість та точність реєстрації інфрачервоного випромінення в умовах низької освітленості.
4. Габаритний розрахунок приладу дозволив визначити параметри оптичної системи, зокрема фокусну відстань та відносний отвір параметричного об'єктива. Ці параметри були обрані з урахуванням вимог до компактності, зручності використання та високої якості зображення.
5. В ході автоматизованого параметричного синтезу системи було створено оптичну систему, що складається з чотирьох асферичних лінз 2-го порядку з фокусною відстанню 14,7 мм, відносним отвором 1:1 та кутовим полем зору  $40^\circ$ .
6. Оцінка якості зображення показала достатньо високі значення контрасту зображення дифракційної МПФ. Об'єктив добре передає великі структури з високим контрастом для всіх полів зору, але його ефективність зменшується при передачі дрібних деталей. По всьому полю зображення відносна дисторсія не перевищує 1 %.

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 57   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

7. Використання багатошарового просвітлювального покриття забезпечує коефіцієнт пропускання на рівні 50%, а опроміненість на площині матриці дорівнює  $0,002 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

8. Отже, всі вимоги, визначені в технічному завданні, були виконані в повному обсязі.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>П001.00014.000 ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 58   |

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. The Herschel Experiment [Електронний ресурс] // Research Gate – Режим доступу до ресурсу: [https://www.researchgate.net/figure/The-Herschel-experiment-432\\_fig38\\_312493700](https://www.researchgate.net/figure/The-Herschel-experiment-432_fig38_312493700)
2. Довгохвильовий діапазон інфрачервоного випромінення. [Електронний ресурс] // InfinityOptics – Режим доступу до ресурсу: [https://www.infiniioptics.com/glossary/lwir-long-wave-infrared#:~:text=Long%2Dwave%20infrared%20or%20LWIR,\(8%2C000%20to%2014%2C000nm\).](https://www.infiniioptics.com/glossary/lwir-long-wave-infrared#:~:text=Long%2Dwave%20infrared%20or%20LWIR,(8%2C000%20to%2014%2C000nm).)
3. Довгохвильовий діапазон інфрачервоного випромінення. [Електронний ресурс] // ClearView – Режим доступу до ресурсу: [https://www.clearview-imaging.com/en/blog/non-visible-imaging-thermal-cameras-long-wave-infrared-lwir#:~:text=Long%2Dwave%20infrared%20\(LWIR\)%20refers%20to%20the%20specific%20range,rather%20than%20non%2Dvisible%20light](https://www.clearview-imaging.com/en/blog/non-visible-imaging-thermal-cameras-long-wave-infrared-lwir#:~:text=Long%2Dwave%20infrared%20(LWIR)%20refers%20to%20the%20specific%20range,rather%20than%20non%2Dvisible%20light)
4. Видимі та LWIR зображення [Електронний ресурс] // Research Gate – Режим доступу до ресурсу: [https://www.researchgate.net/figure/Visible-and-LWIR-images-during-slight-overcast-top-strong-wind-and-rain-middle-and\\_fig2\\_4301279](https://www.researchgate.net/figure/Visible-and-LWIR-images-during-slight-overcast-top-strong-wind-and-rain-middle-and_fig2_4301279)
5. Вивчення технології довгохвильового інфрачервоного випромінення (LWIR) та її тепловізійних переваг [Електронний ресурс] // Exosens – Режим доступу до ресурсу: <https://www.exosens.com/technologies/longwave-infrared-technology#:~:text=In%20military%20and%20security%20operations,%2C%20recognition%2C%20and%20target%20acquisition.>
6. Переваги повітряного інфрачервоного теплового картографування [Електронний ресурс] // Anchorelite – Режим доступу до ресурсу: [https://www.anchorelite.com/IR/papers/The\\_Benefits\\_of\\_Aerial\\_Infrared\\_Thermal\\_Mapping.htm](https://www.anchorelite.com/IR/papers/The_Benefits_of_Aerial_Infrared_Thermal_Mapping.htm)
7. LWIR в медицині [Електронний ресурс] // Medthermography – Режим доступу до ресурсу: <https://medthermography.com/thermography/what-is-it/>

8. LWIR в метеорології [Електронний ресурс] // Learning Weather – Режим доступу до ресурсу: <https://learningweather.psu.edu/node/48>
9. LWIR-датчики [Електронний ресурс] // Electronicsforu – Режим доступу до ресурсу: <https://www.electronicsforu.com/technology-trends/learn-electronics/ir-led-infrared-sensor-basics>
10. «Тепловизионная биомедицинская диагностика», Скрипаль А.В., Сагайдачний А.А., Усанов Д.А. 19-26 с. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/viax>.
11. Матеріали для оптики [Електронний ресурс] // Escooptics – Режим доступу до ресурсу: <https://escooptics.com/blogs/news/what-optical-materials-work-best-in-the-ir-infrared>
12. Матеріали для оптики [Електронний ресурс] // WP Optics – Режим доступу до ресурсу: <https://wp.optics.arizona.edu/optomech/wp-content/uploads/sites/53/2016/10/Saayman-521-Tutorial.pdf>
13. Мікроболометрична матриця [Електронний ресурс] // Infrared Core – Режим доступу до ресурсу: <https://www.infraredcore.com/sale-14156909-1280x1024-12-m-uncooled-fpa-detector-for-thermal-surveillance-camera.html>
14. Мікроболометрична матриця [Електронний ресурс] // Shyongjia – Режим доступу до ресурсу: <https://shyongjia.en.made-in-china.com/product/REUYXWsdancG/China-Lwir-1280-1024-12um-Uncooled-Vox-Microbolometer-Long-Wave-Infrared-Focal-Plane-Array.html>
15. Мікроболометрична матриця [Електронний ресурс] // Allied Scientific Pro – Режим доступу до ресурсу: <https://www.alliedscientificpro.com/shop/uncooled-lwir-infrared-sensor-8-to-14-microns-6661#attr=>
16. TELEDYNE FLIR BOSON 640 X 512 18MM 24° HFOV - LWIR THERMAL CAMERA CORE [Електронний ресурс] // OEM Cameras – Режим доступу до ресурсу: <https://www.oemcameras.com/flir-boson-640x480-18mm.htm>
17. FLIR Boson Engineering Datasheet (pdf) [Електронний ресурс] // OEM Cameras – Режим доступу до ресурсу:

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 60   |

[https://www.oemcameras.com/index.php?route=extension/module/advanced\\_downloads/download&product\\_id=882&download\\_id=1684](https://www.oemcameras.com/index.php?route=extension/module/advanced_downloads/download&product_id=882&download_id=1684)

18. Infrared Anti-Reflective Coating [Електронний ресурс] // Andover Corporation – Режим доступу до ресурсу:

<https://www.andovercorp.com/products/infrared-filters/antireflective-coatings/>

19. Germanium [Електронний ресурс] // Tydex – Режим доступу до ресурсу:

[https://www.tydexoptics.com/materials1/for\\_transmission\\_optics/germanium/](https://www.tydexoptics.com/materials1/for_transmission_optics/germanium/)

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 61   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

# Додатки

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | ПО01.00014.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 62   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

## Параметри об'єктивів Boson LWIR Lens компанії FLIR



Boson Product Data Sheet

## 2 KEY SPECIFICATIONS

Unless otherwise stated, all specifications apply to all Boson configurations.

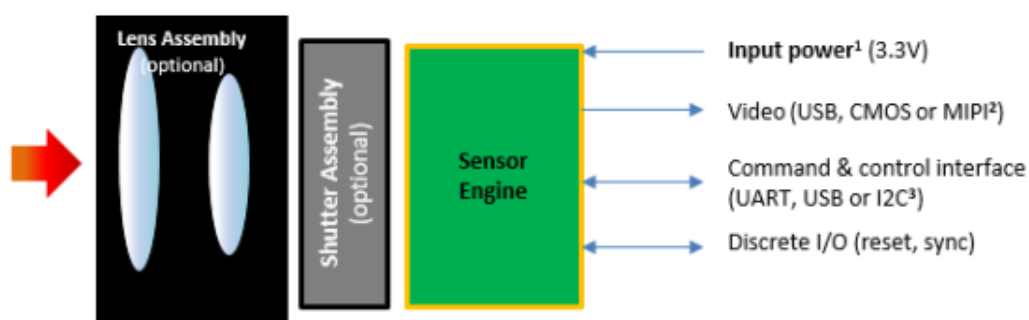
TABLE 2: BOSON KEY SPECIFICATIONS

| SPECIFICATION                                                 | DESCRIPTION                                                                                                                                                                                                                                                  |                               |                                        |                    |
|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|--------------------|
| Overview                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                              |                               |                                        |                    |
| Sensor technology                                             | Uncooled microbolometer                                                                                                                                                                                                                                      |                               |                                        |                    |
| Pixel size                                                    | 12 μm                                                                                                                                                                                                                                                        |                               |                                        |                    |
| Spectral range                                                | Longwave infrared, nominally 8 μm to 14 μm                                                                                                                                                                                                                   |                               |                                        |                    |
| Array format                                                  | 320x256 or 640x512                                                                                                                                                                                                                                           |                               |                                        |                    |
| Effective frame rate                                          | Varies by configuration, Averager mode (see Section 7.3), and Frame Skip mode (see Section 7.4) <ul style="list-style-type: none"><li>Fast Configuration: 60Hz (default). As low as 4.3Hz</li><li>Slow (for export out of the USA):8.6Hz (default)</li></ul> |                               |                                        |                    |
| Thermal time constant                                         | Nominally 8 msec                                                                                                                                                                                                                                             |                               |                                        |                    |
| Thermal sensitivity                                           | Boson                                                                                                                                                                                                                                                        |                               | Boson+                                 |                    |
| Varies by configuration<br>(see Section 11.1 for more detail) | Industrial grade<br>Professional grade<br>Consumer grade                                                                                                                                                                                                     | < 40 mK<br>< 50 mK<br>< 60 mK | Industrial grade<br>Professional grade | < 20 mK<br>< 30 mK |
| Radiometric Accuracy                                          | Radiometric Capable Cameras only. ~ ±5°C accuracy, depending upon operating conditions. (See Section 11.5)                                                                                                                                                   |                               |                                        |                    |
| Operability                                                   | Varies by configuration (see Section 11.3 for more detail) <ul style="list-style-type: none"><li>Industrial grade: &gt;99%</li><li>Professional grade: &gt;98.5%</li><li>Consumer grade: &gt;98%</li></ul>                                                   |                               |                                        |                    |
| Non-uniformity corrections (NUC)                              | Shuttered configuration capable of automatic flat-field correction (FFC); all configurations capable of Teledyne FLIR's Silent Shutterless NUC (SSN)™ suite of scene-based NUC algorithms (see Section 6.6)                                                  |                               |                                        |                    |
| Electronic zoom                                               | 1X to 8X zoom (see Section 6.9)                                                                                                                                                                                                                              |                               |                                        |                    |
| Symbol overlay                                                | Alpha blending for translucent overlay<br>Not available in Boson+                                                                                                                                                                                            |                               |                                        |                    |
| Bootup Time (see note 1)                                      | ~2.5 seconds for the 320 configuration<br>~2.0 seconds for fast-boot 320 configuration (reduced feature set)<br>~3.0 seconds for the 640 configuration<br>~2.5 seconds for fast-boot 640 configuration (reduced feature set)                                 |                               |                                        |                    |

Note 1: Bootup times are approximate and can be lowered for high-volume OEM configurations by removing support for symbol overlays. Please contact support through your sales channel for more information.

### 3 SYSTEM ARCHITECTURE

A simplified architectural diagram of the thermal imaging core is shown in Figure 6.



1. Only essential interface is power. All others are optional.
2. MIPI video channel is an alternate digital output
3. For MIPI variants, both USB and I2C support the Boson SDK

**FIGURE 6: SIMPLIFIED ARCHITECTURE**

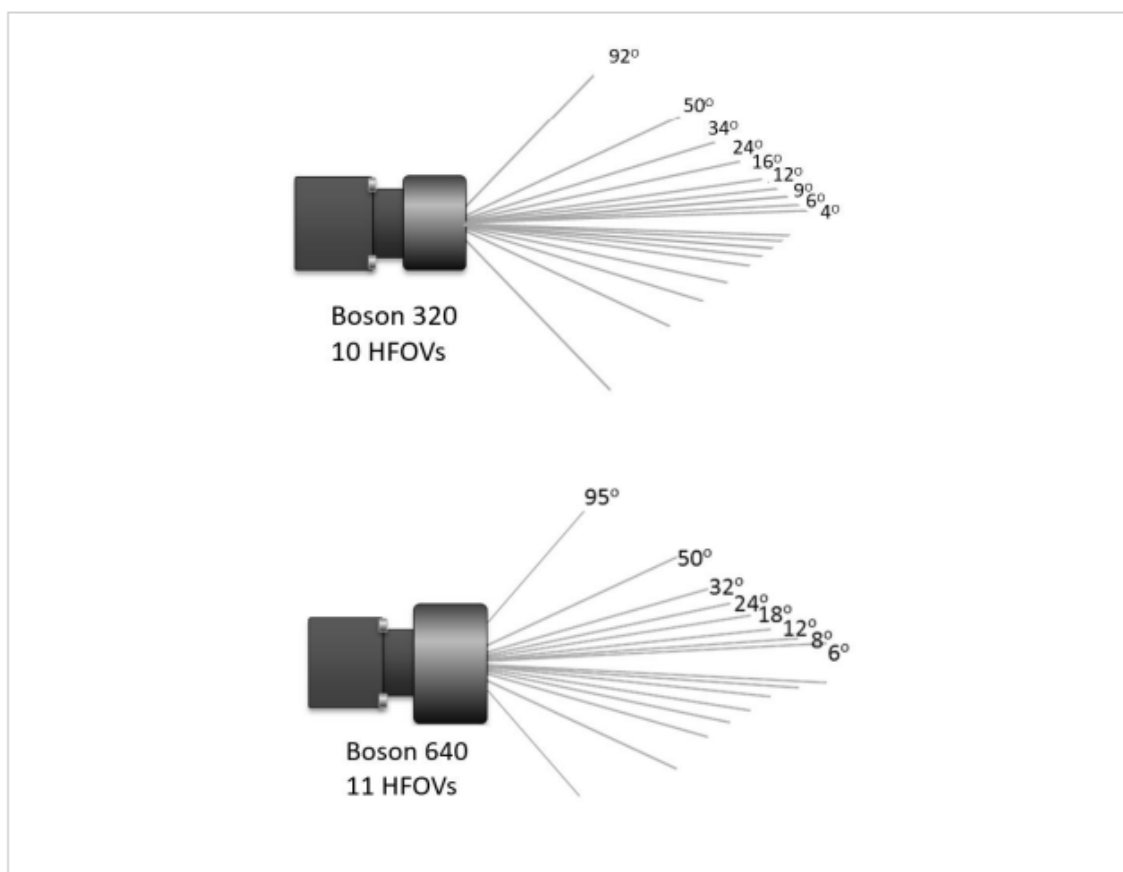
The lens assembly focuses infrared radiation from the scene through the shutter aperture onto the sensor engine. The shutter assembly periodically blocks radiation from the scene, presenting a uniform thermal signal to the sensor array. This uniform input signal allows internal correction terms to be updated, improving image quality. For applications in which there is little to no movement of the Boson core relative to the scene (for example, fixed-mount security applications), the shutter assembly is highly recommended. For applications in which there is ample scene movement (for example, handheld applications), the shutter is less essential due to Teledyne FLIR's Silent Shutterless NUC (SSN)<sup>TM</sup> technology, further described in Section 5.4. That said, the shutter is capable of improving image quality in all applications and is always recommended, especially at start-up.

The sensor engine consists of a focal plane array (FPA) integrated with a System on a Chip (SoC). The FPA is a two-dimensional array of microbolometers with 12-micron pitch. The QVGA configuration provides 320x256 pixels while the VGA configuration provides 640x512. The temperature of each microbolometer varies in response to incident flux. The temperature change causes a proportional change in the detector's resistance. The bolometer utilizes a high temperature coefficient of resistance (TCR) and low 1/f noise material, resulting in excellent thermal sensitivity and highly stable uniformity. The microbolometer array is grown monolithically on top of a readout integrated circuit (ROIC). Once per frame, the ROIC senses the resistance of each detector by applying a bias one row at a time. The resulting signal is digitized and processed by the SoC, which provides signal conditioning and output formatting. The SoC is also responsible for all camera logic as well as the Command and Control Interface (CCI). The signal pipeline is fully defined in Section 5 while the output interfaces are defined in Section 8.2.

## 10 OPTICAL CHARACTERISTICS

As summarized in

**Figure 61** and more fully described in table 10 and table 11, numerous lens options are provided for both QVGA and VGA, ranging from very wide field of view (FOV) to very narrow. All lens assemblies are athermalized for stable focus quality across the full operating temperature range. Note that in some cases, there are two VGA configurations providing identical or nearly identical field of view. That situation is due to the introduction of several newer lens designs smaller than the original designs, usually resulting in higher cost and/or slightly reduced performance, as summarized in table 10 and table 11. For example, the smaller version of the 24-deg lens has slightly slower f/#. All of the smaller lens configurations are denoted with a s preceding the FOV in the part number (e.g. 21640as32 instead of 21640a032).



**FIGURE 61: SUPPORTED HORIZONTAL FIELDS OF VIEW**

**TABLE 13: LENS OPTICAL SPECIFICATIONS**

| CONFIG.<br>SEE NOTE 1 | FOV (HXV)<br>(DEG) | FOV<br>(DIAG)<br>(DEG) | F/#  | FOCAL<br>LENGTH<br>(MM) | NEAR-FOCUS<br>DISTANCE<br>W/OUT<br>REFOCUS &<br>WITH REFOCUS<br>(M) SEE NOTE 2 | AVG.<br>TRANSMISSION, $\tau$ | MTF<br>(NOMINAL<br>AT<br>NYQUIST,<br>ON-AXIS,<br>20C) | DISTORTION (%) |
|-----------------------|--------------------|------------------------|------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------|
| 20320 H092            | 91.9 x 74.0        | 124.8                  | 1.00 | 2.3                     | 0.55 / 0.03                                                                    | 87%                          | 42%                                                   | < 43%          |
| 20320 A050            | 50.0x40.0          | 65.9                   | 1.00 | 4.3                     | 1.9 / 0.10                                                                     | 93%                          | 42%                                                   | < 12%          |
| 20320 AS50            | 50.0x40.0          | 65.0                   | 1.10 | 4.5                     | 1.0 / 0.10                                                                     | 93%                          | 31%                                                   | < 14%          |
| 20320 A034            | 34.1x27.3          | 43.6                   | 1.01 | 6.3                     | 4.0 / 0.20                                                                     | 94%                          | 43%                                                   | < 1%           |
| 20320 A024            | 24.1x19.2          | 30.6                   | 1.02 | 9.1                     | 8.5 / 0.30                                                                     | 82%                          | 42%                                                   | < 1%           |
| 20320 A016            | 16.0x12.8          | 20.4                   | 1.01 | 13.8                    | 19 / 0.50                                                                      | 84%                          | 46%                                                   | < 3%           |
| 20320 A012            | 12.2x9.7           | 15.7                   | 1.04 | 18.0                    | 33 / 1.0                                                                       | 90%                          | 43%                                                   | < 1%           |
| 20320 A009            | 9.0x7.2            | 11.6                   | 1.00 | 24.3                    | 58 / 1.5                                                                       | 89%                          | 41%                                                   | < 2%           |
| 20320 A006            | 6.1x4.9            | 7.9                    | 1.00 | 36.0                    | 130 / 4.0                                                                      | 90%                          | 40%                                                   | < 1%           |
| 20320 A004            | 4.0x3.2            | 5.2                    | 1.01 | 55.0                    | 300 / 10                                                                       | 86%                          | 40%                                                   | < 1%           |
| 20640 A095            | 95.0x77.0          | 126.3                  | 1.10 | 4.9                     | 2.5 / 0.10                                                                     | 88%                          | 38%                                                   | < 50%          |
| 20640 AS95            | 95.0x77.0          | 130.5                  | 1.10 | 4.9                     | 2.5 / 0.10                                                                     | 90%                          | 34%                                                   | < 56%          |
| 20640 AS50            | 49.9x39.3          | 65.9                   | 1.01 | 9.2                     | 7.5 / 0.3                                                                      | 90%                          | 42%                                                   | < 18%          |
| 20640 A050            | 50.0x40.0          | 64.0                   | 1.00 | 8.7                     | 7.5 / 0.3                                                                      | 90%                          | 43%                                                   | < 11%          |
| 20640 A032            | 32.0x25.6          | 42.0                   | 1.00 | 14.0                    | 20 / 0.50                                                                      | 92%                          | 42%                                                   | < 3%           |
| 20640 AS32            | 32.0x25.6          | 40.7                   | 1.01 | 13.6                    | 20 / 0.50                                                                      | 90%                          | 42%                                                   | < 3%           |
| 20640 A024            | 24.3x19.5          | 31.3                   | 1.04 | 18.0                    | 33 / 1.0                                                                       | 90%                          | 43%                                                   | < 2%           |
| 20640 AS24            | 24.3x19.2          | 31.3                   | 1.09 | 18.0                    | 33 / 1.0                                                                       | 90%                          | 42%                                                   | < 2%           |
| 20640 A018            | 18.0x14.4          | 23.1                   | 1.00 | 24.0                    | 58 / 1.5                                                                       | 89%                          | 41%                                                   | < 2%           |
| 20640 A012            | 12.2x9.8           | 15.7                   | 1.00 | 36.0                    | 130 / 4.0                                                                      | 90%                          | 40%                                                   | < 1%           |
| 20640 A008            | 8.0x6.4            | 10.3                   | 1.01 | 55.0                    | 300 / 10                                                                       | 89%                          | 40%                                                   | < 2%           |
| 20640 A006            | 6.0x4.8            | 7.7                    | 1.05 | 72.8                    | 550 / 17                                                                       | 89%                          | 38%                                                   | < 1%           |

Note 1: Lens configurations shown in red are available as radiometry capable.

Note 2: Shutterless configurations (IE, 21640A032) have the same optical specification as their shuttered counterparts.

Note 3: the first value in the column represents the closest distance at which objects will be in good focus on new cameras. This distance is slightly further away than a typically calculated hyperfocal distance. The second value represents the closest

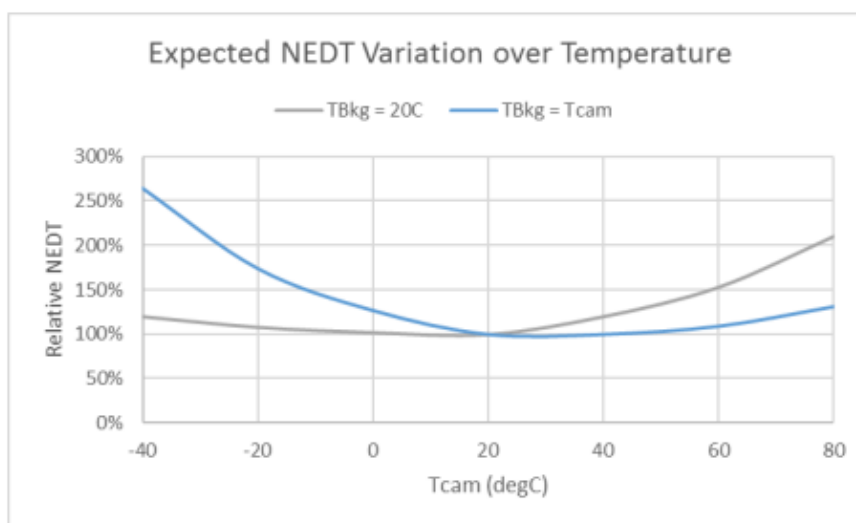


FIGURE 62: BOSON EXPECTED NEDT VARIATION OVER TEMPERATURE

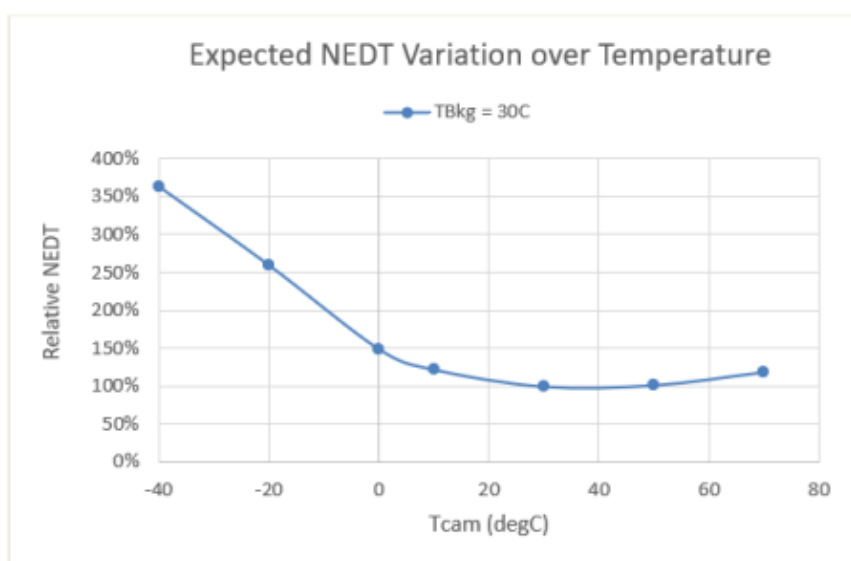


FIGURE 63: BOSON+ MEASURED RELATIVE NEDT VARIATION OVER TEMPERATURE

## 11.2 Intrascene Temperature

Intrascene temperature refers to the span of scene temperatures which map to the camera's 16-bit output range (i.e., the temperatures which can be imaged without railing the output). Figure 64 shows the maximum scene temperature of the 320 configuration as a function of camera temperature when in high-gain state, and Figure 65 shows the same for the 640 configuration. Both figures depict typical values as well as the worst-case value expected of every camera. Maximum scene temperature in low-gain state is shown for the 320 configuration in Figure 66 and for the 640 configuration in Figure 67. Radiometry enabled cameras output is not capped in high or low gain mode and will generally follow these trends.

Minimum scene temperature is at least -40C for both configuration in both gain states across the full operating temperature range. (While Teledyne FLIR has not tested Boson with scene temperatures below -40C , analysis supports a capability to image temperatures approaching absolute zero when in low-gain state.)

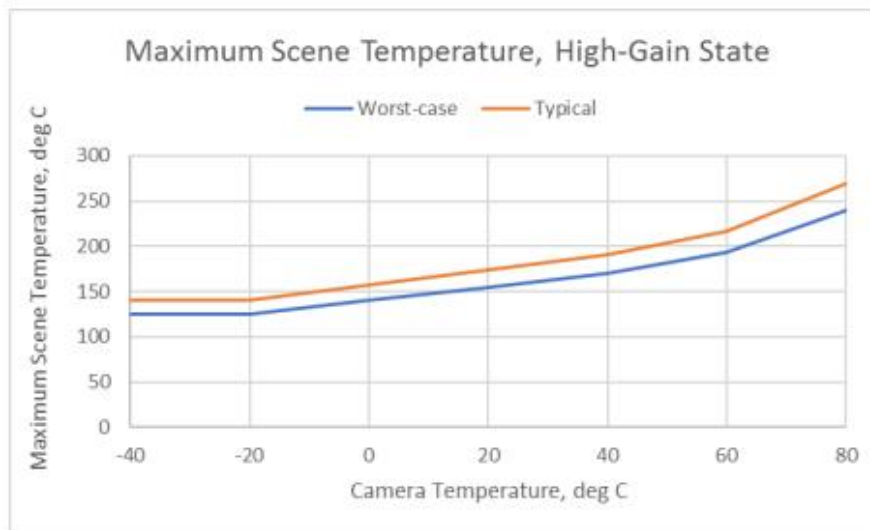


FIGURE 64: EXPECTED MAXIMUM SCENE TEMPERATURE VS. CAMERA TEMPERATURE, HIGH-GAIN STATE, BOSON 320 CONFIGURATION

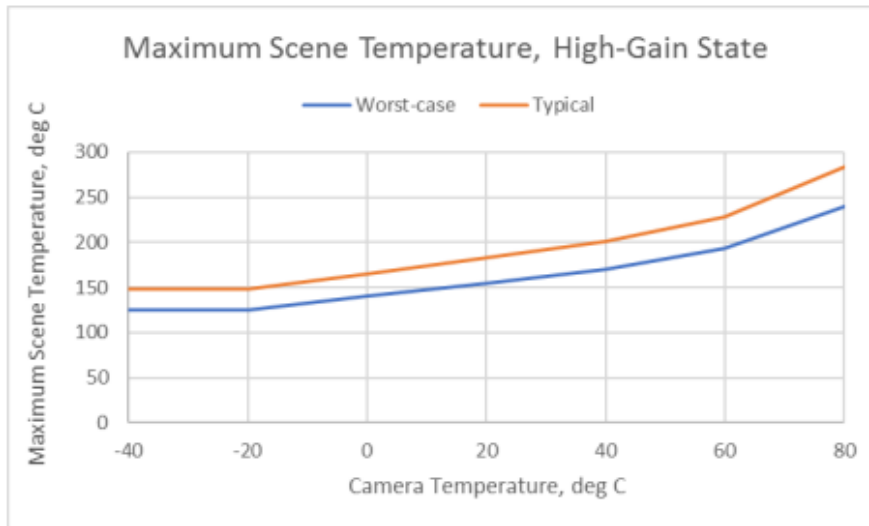


FIGURE 65: EXPECTED MAXIMUM SCENE TEMPERATURE VS. CAMERA TEMPERATURE, HIGH-GAIN STATE, BOSON 640 CONFIGURATION

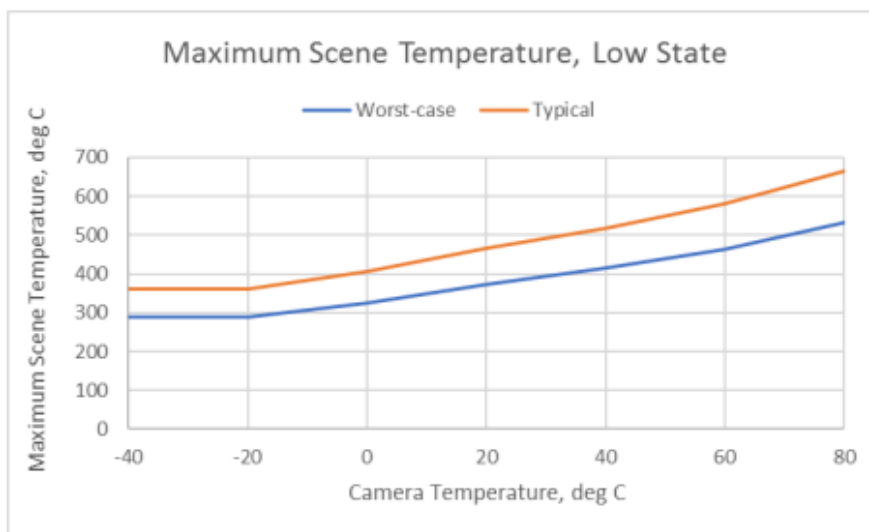


FIGURE 66: EXPECTED MAXIMUM SCENE TEMPERATURE VS. CAMERA TEMPERATURE, LOW-GAIN STATE, BOSON 320 CONFIGURATION

8

7

6

5

4

3

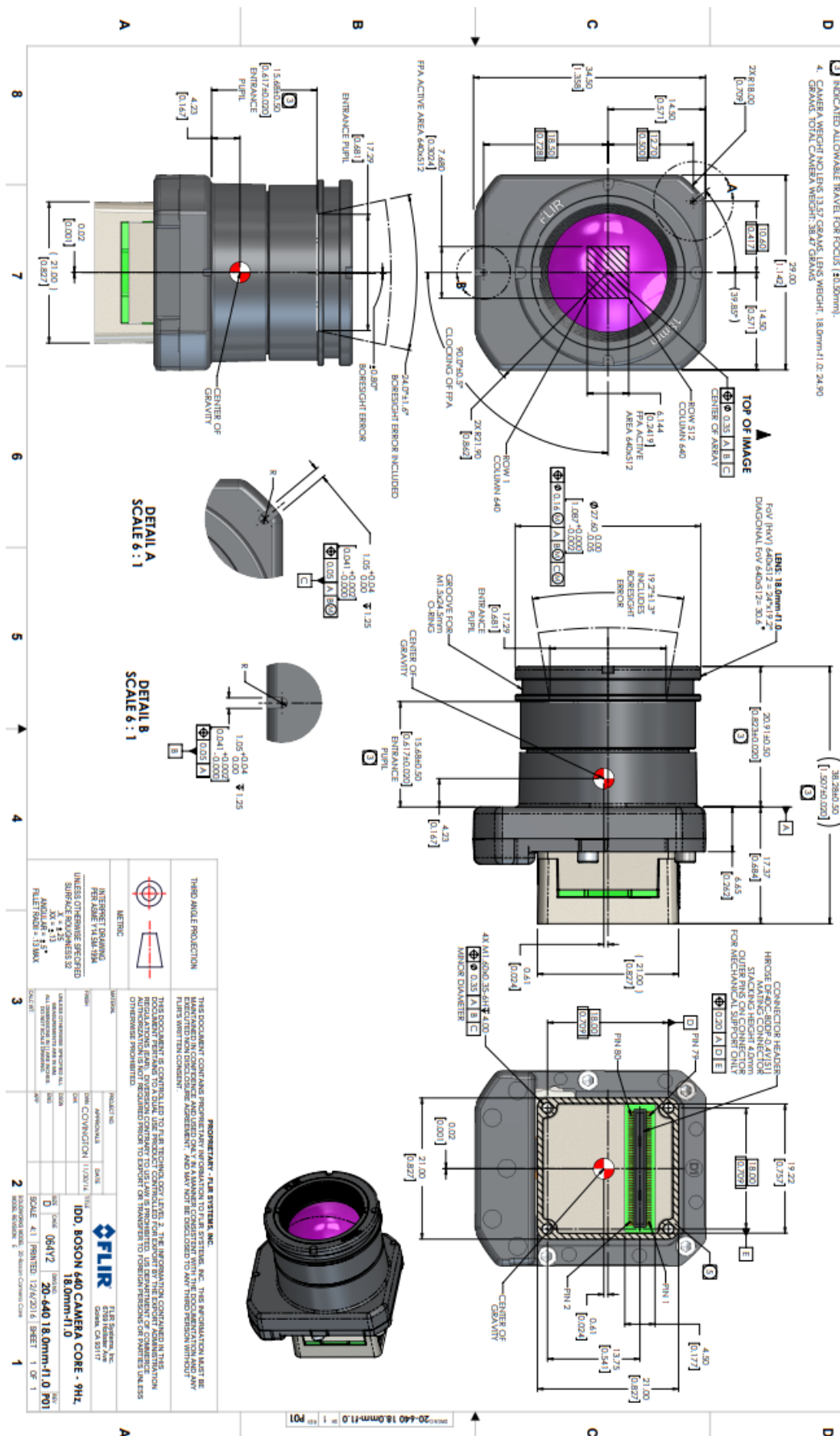
2

1

NOTES: UNLESS OTHERWISE SPECIFIED

1. INDICATED DIMENSIONS ARE FOR AN ARRAY SIZE OF 400x128x12um.
2. CONNECTOR INTERFACE, HORSE PNOIC, 800x0.4V151, MATING CONNECTOR, HORSE PNOIC, 800x0.4V151, FOR PNOIC DESIGNATIONS SEE BOSON CAMERA USER MANUAL.
3. INDICATED ALLOWABLE TRAVEL FOR FOCUS:  $\pm 0.50$ mm.
4. CAMERA WEIGHT NO LENS: 13.57 GRAMS, LENS WEIGHT: 18.00mm  $\pm 1.0$  24.90 GRAMS, TOTAL CAMERA WEIGHT: 38.47 GRAMS.

THE INDICATED SURFACE IS THE MOST OPTIMAL MOUNTING/HEATING SURFACE IN ORDER TO PROVIDE THE BEST THERMAL PERFORMANCE OF THE BOSON CAMERA CORE.



## Параметри матриці UnCooled LWIR Infrared sensor ASP-HR640 640×480



**Resolution:** The camera cores vary in size enabling the customer to choose the most suitable type according to their own requirements.

**Compact, light and tiny:** The camera core is about 50g (not including lens) and exceptionally small facilitating target integration.

**Control functions:** Parameters, including brightness, contrast, auto-gain can be set by the user. The customer can also establish parameters via the RS232 interface.

**Digital zoom:** Our camera core has 2X/4X zoom function. Digital zoom will be of great help when the target is too small to identify.

**NTSC & PAL video output:** We supply PAL or NTSC, 16-bit parallel digital signal or analog signal. Video format must be specified at time of order. [Contact Us](#) for more details or to get an official quote.

### Applications:

- Thermology
- Thermal Imaging for Automation
- Night Vision
- Surveillance
- Security of Nuclear Plan
- Law Enforcement
- Infrared Camera for Building Diagnostics
- Automotive Night Vision
- Aviation and Maritime Enhance Vision
- Electrical and Mechanical Thermal Imaging
- Thermal Imaging for Gas Detection
- Furnace and Boiler Inspection
- Medical/Biology
- Maritime
- Power plants
- Metal Production
- Petrochemicals

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <b>П001.00014.000 ПЗ</b> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 71   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

### Specifications:

| Type                        | ASP-HR160                                                                                                      | ASP-HR320   | ASP-HR640             |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------|
|                             | Imaging Performance                                                                                            |             |                       |
| Detector Type               | FPA, Uncooled Microbolometer                                                                                   |             |                       |
| Resolution                  | 160 x 120                                                                                                      | 384 x 288   | 640 x 480             |
| Spectral Range              | 8-14 um                                                                                                        |             |                       |
| Thermal Sensitivity         | 80mK @ 300K                                                                                                    | 50mK @ 300K | 60mK @ 300K           |
| Field of View               | Lenses are optional, FOV varies according to different lenses                                                  |             |                       |
| Focus                       | Manual/Automatic                                                                                               |             |                       |
| Image Frequency             | 60 Hz @ NTSC or 50 Hz @ PAL                                                                                    |             |                       |
|                             | Image Presentation                                                                                             |             |                       |
| Video Output                | PAL or NTSC, 14-bit parallel digital signal or analog signal. Video format must be specified at time of order. |             |                       |
|                             | Power                                                                                                          |             |                       |
| Working Voltage             | DC 7 - 12 V                                                                                                    |             |                       |
| Power Consumption           | < 2W                                                                                                           | <2.5 W      | < 3 W                 |
|                             | Environmental Specifications                                                                                   |             |                       |
| Operating Temperature Range | -40°C to 60°C                                                                                                  |             |                       |
| Storage Temperature Range   | -40°C to 70°C                                                                                                  |             |                       |
| Humidity                    | <95%, non-condensing                                                                                           |             |                       |
|                             | Physical Characteristics (without lens, core only)                                                             |             |                       |
| Size (L x W x H)            | 40 mm x 40 mm x 30 mm                                                                                          |             | 45 mm x 45 mm x 37 mm |
| Weight                      | 50g                                                                                                            |             |                       |
|                             | Interface                                                                                                      |             |                       |
| RS232                       | Command and Control Functions                                                                                  |             |                       |