

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____

Кафедра __Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв _____

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Дослідження методів підвищення роздільної здатності тепловізійних систем на основі наноструктур

(тема)

Виконав:

студент 2-го курсу, групи МНПм-21-1 Смирнов
Е.О.

Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна
техніка

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Мікро- та наноелектронні
прилади і пристрої»

Керівник професор кафедри МЕЕПП, Стрілкова Т.
О.

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Бондаренко І.М.
(прізвище, ініціали)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____
 Кафедра _ Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв _____
 Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
 Спеціальність _____ 153 Мікро- та наносистемна техніка _____
 Тип програми _____ освітньо-професійна _____
 Освітня програма _____ « Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої» _____

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
 (підпис)

« _____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Смирнову Едуарду Олександровичу _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження методів підвищення роздільної здатності тепловізійних систем на основі наноструктур _____

затверджена наказом університету від 14 11 _____ 2022 р. № 1437Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 20__ р.

3. Вихідні дані до роботи Тепловізор Dali S253H, Тепловізор HikMicro LYNX Pro LH19, залежності відстані та освітленості при проведенні експериментального дослідження _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1) провести теоретичний аналіз _____

2) провести експериментальні дослідження _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
	Аналіз технічного завдання	04.11.2022	
	Аналітичний огляд джерел	08.11.2022	
	Оформлення пояснювальної записки	16.11.2022	
	Вибір структури приладу, збірка	21.11.2022	
	Розробка та написання програм	22.11.2022	
	Оформлення креслеників	28.11.2022	
	Підготовка презентації	03.12.2022	
	Рецензування, нормоконтроль	08.12.2022	
	Захист роботи	17.12.2022	

Дата видачі завдання _____ 20__ р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис) _____ (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи магістра: 56 сторінок, 32 рисунків, 2 таблиця, 18 посилань.

ТЕПЛОВІЗОР, РОЗДІЛЬНА ЗДАТНІСТЬ, МАТЕРІАЛ, ФОТОПРИЙМАЧ, ХАРАКТЕРИСТИКА, НАНОСТРУКТУРА

Об'єкт дослідження – тепловізор, його фізичні та технічні характеристики, явище роздільної здатності.

Мета роботи – дослідження метода підвищення роздільної здатності тепловізійних систем.

Метод – аналіз літератури, комп'ютерне моделювання та проектування

Актуальність: У дипломному проекті розглянуті типові тепловізійні системи їх основні характеристики та методи збільшення дальності дії тепловізійних систем.

ABSTRACT

Explanatory note of the bachelor's qualification work: 56 pages, 32 figures, 2 table, 18 lines

THERMAL VISOR, RESOLUTION, MATERIAL, PHOTO RECEIVER, CHARACTERISTIC, NANOSTRUCTURE

The object of study - thermal imager, its physical and technical characteristics, phenomenon of resolution

The purpose of the work is to study the method of increasing the resolution of thermal imaging systems.

The method is literature analysis, computer modeling and design

Relevance: The diploma project examines typical thermal imaging systems, their main characteristics and methods of increasing the range of thermal imaging systems

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП.....	8
1 ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	9
1.1 Застосування тепловізійних систем	10
1.2 Тепловізор Dali S253H.....	13
1.2 Тепловізор HikMicro LYNX Pro LH19	15
2 КЛАСИФІКАЦІЯ ТЕПЛОВІЗОРІВ.....	16
2.1 Класифікація ІЧ систем	17
2.3 Скануючі тепловізори.....	19
2.4 Матричні тепловізори	20
2.5 Спектральна характеристика.....	21
2.6 Роздільна здатність тепловізора	22
2.7 Методика розрахунку роздільної здатності тепловізорів	26
3 ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПРИЙМАЧІВ	29
3.1 Матеріали фотоприймачів.....	33
3.2 Темновий струм.....	36
4 НАНОМАТЕРІАЛИ ФОТОПРИЙМАЧІВ ТЕПЛОВІЗОРІВ.....	38
4.1 Аморфний кремній.....	39
4.2 Оксид ванадію.....	40
5 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ТЕПЛОВІЗОРІВ.....	42
5.1 Методика проведення експериментальних досліджень	42
5.2 Експериментальні результати	48
ВИСНОВКИ.....	49
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	50

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І
ТЕРМІНІВ

ІЧ – інфрачервоний

ОС – оптична система коефіцієнт розширення

ТС – тепловізійна система

ПВ – приймач випромінювання

aSi – аморфний кремній

VOx – оксид ванадію

ВСТУП

В магазинах можна знайти тепловізори різного цінового діапазону. Найдорожчі коштують десятки тисяч доларів, але розгляньмо доступніші варіанти. Існують два основні параметри, які найбільшою мірою відрізняють тепловізори. Це діаметр об'єктива та роздільна здатність матриці. Для виготовлення матриць є дві технології, які передбачають використання:

- аморфного кремнію. Старіший варіант, який має більш доступну вартість, але при цьому не настільки чутливий і має менший температурний діапазон;
- оксиду ванадію. Завдяки тому, що такі моделі мають високу чутливість, а також охоплюють більший температурний діапазон, їх використовують у дорогих моделях. По можливості слід обирати саме такі тепловізори, оскільки вони будуть набагато кориснішими.

В даній кваліфікаційній роботі буде проаналізовано методи підвищення роздільної здальності тепловізійних систем .

1 ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД

Умовно можливо окреслити чотири покоління тепловізійної техніки:

- нульове покоління, яке засновано на застосуванні одиничних охолоджуваних приймачів і двовимірної (малої та покадрової) розгортки за допомогою скануючої оптикомеханічної системи;
- перше покоління – на застосуванні малих лінійок приймачів і спрощеної покадрової розгортки;
- друге покоління – на використанні згрупованих декількох лінійок (з тимчасовою затримкою і накопиченням);
- третє покоління тепловізійної техніки – на застосуванні фокально-площинних, двовимірних твердотільних багатоелементних (матричних) приймачів випромінювання.

Останнім часом розвиток тепловізорів йде в більшості шляхом застосування неохолоджуваних багатоелементних матричних приймачів випромінювання, фізичні характеристики яких високі і практично не поступаються системам охолодження. Сучасні тепловізійні системи мають малі вагогабаритні характеристики і енергоспоживання, забезпечують безшумну роботу і високу якість тепловізійного зображення, широкий динамічний діапазон при роботі у режимі мовного телевізійного стандарту, цифрову обробку у реальному масштабі часу, з можливістю обробки інформації з використанням ПЕОМ і поділяються на два основні класи: наглядові, вимірювальні або радіометричні (термографи). Наглядові (пошукові) тепловізійні системи призначені для виявлення, розпізнавання і візуалізації на об'єкті теплових перешкод віддалених тепловипромінюючих об'єктів (цілей). Такі системи можуть доповнюватися різними каналами і містять, як правило, телевізійний канал, канал нічного бачення, канал лазерної локації для виявлення телефотооптики на значних відстанях, вимірювальний канал – лазерний далекомір. Будь-який об'єкт випромінює енергію, причому велика частина енергії припадає на невидиме людському оку ІЧ – випромінювання. Принцип роботи тепловізорів заснований саме на цьому: за інтенсивністю ІЧ – випромінювання можна не тільки визначати та ідентифікувати

об'єкти різної природи і навіть ділянки однорідної на вигляд поверхні, а й досліджувати багато їх прихованих властивостей. Тепловізори повністю незалежні від зовнішнього освітлення та реєструють тільки ІЧ – випромінювання об'єктів. В якості оптичної системи в них використовуються лінзи з германію, оскільки звичайне скло ІЧ – випромінювання не пропускає. З матриці приладу інформація надходить до електронної системи, де зберігається колірна карта температур (кожній температурі відповідає певний колір і його яскравість), обробляється і виводиться на дисплей в окулярі приладу. У більшості систем реалізовано чорно-біле кодування. Чим вища роздільна здатність детектора, тим дорожче тепловізор і тим кращі його технічні та експлуатаційні характеристики. При цьому, роздільна здатність тепловізора прямо залежить від його типу: з охолоджуваною або неохолоджуваною матрицею. Матричні приймачі випромінювання сучасних тепловізорів мають роздільну здатність від 16x16 до 640x480 пікселів і на сьогодні це є однією з найдорожчих частин тепловізійних систем що значною мірою впливають на його ціну

1.1 Застосування тепловізійних систем

Тепловізійні системи орієнтовані на застосування в різних галузях, мають широкий спектр функціональних можливостей. Так, наприклад, застосування ТПВ зумовлено необхідністю пошуку гарячих (іноді – холодних) місць на температурному полі, наявність яких свідчить про порушення нормального режиму експлуатації об'єкту або обладнання, небезпечних дефектів, втрати або надлишкового використання енергії тощо.

Використовуючи ТПВ, фахівців може виявити найрізноманітніші несправності і миттєво визначити проблемну зону на чіткому і яскравому ІЧ-зображенні. Це можуть бути і трубопроводи, і мікросхеми та резистори, і технологічні резервуари. У ТПВ можна побачити ланцюги, що не працюють, обриви і замикання в нагрівальному елементі. Оскільки практично будь-який несправний вузол або агрегат енергообладнання має теплову аномалію, ТПВ прискорює пошук таких вузлів і ділянок, а також може забезпечити додаткову якісну оцінку зроблену ремонту.

Отже, ТПВ застосовується для: різноманітних діагностичних досліджень, виявлення дефектів або порушення теплоізоляції й інших тепловтрат на різноманітних об'єктах, контролю цілісності об'єктів, визначення теплоізоляційних властивостей матеріалів тощо.

Основними сферами застосування ТПВ є: будівництво; електрообладнання та електронна техніка; паливно-енергетичний комплекс; автомобільна, хімічна та авіакосмічна промисловість; металургія; машинобудування; суднобудування; медицина тощо.

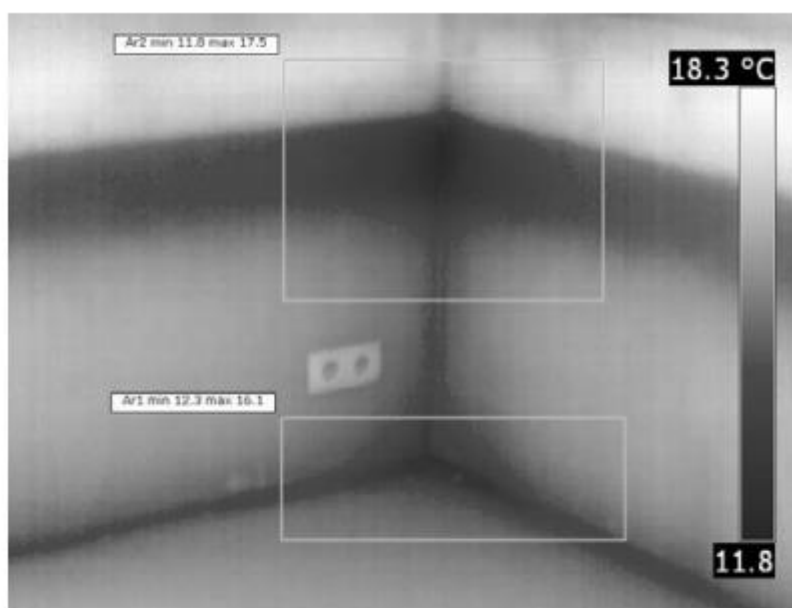


Рисунок 1.1 – Зображення на екрані ТПВ області, де не дотримується нормативний рівень теплоізоляції охолоджуючих конструкцій

Теплобачення може мати і такі варіанти використання, як: науково-дослідна діяльність; контроль автоматичних виробничих процесів, тестування компонентів і оболонок, детекція газу, видобуток корисних копалин, перевірка сонячних панелей, ветеринарія, пошуково-рятувальні роботи, астрономія визначення забруднень, вимір температурних режимів під час виготовлення паперу, виробництво скла, гуми і пластику, бетонних і залізобетонних виробів, вивчення процесів теплопередачі в моделях, які досліджують в аеродинамічних трубах, дефектоскопія матеріалів та окремих конструкцій під час проведення статичних і динамічних випробувань, персональне використання тощо.

Активно зростає попит на використання ТПВ у сфері охорони і безпеки для

охорони периметра урядових будівель і споруд, забезпечення безпеки військових об'єктів, прикордонного патрулювання, митного огляду, спостереження за рухом об'єктів тощо.

Найважливішою сферою, в якій нині застосовуються ТПВ, стала військова справа. Однією зі значних перешкод для військових операцій завжди був нічний час. Також належним чином спостереження неможливе в умовах поганої видимості: в тумані, диму, під час снігопаду та інших подібних явищах. Раніше для виявлення противника в темряві в армії використовували так звані прилади нічного бачення. Проте принцип роботи ТПВ дає йому значні переваги. Справа в тому, що прилад нічного бачення вловлює видиме світло і підсилює сигнал і, таким чином, дає змогу бачити за умов поганого освітлення. Використання такого приладу в зазначених вище складних умовах видимості, на відміну від ТПВ, не дає ефекту – він просто зробить туман яскравіше, а в повній темряві, наприклад, в приміщенні, прилад нічного бачення не покаже нічого.



Рисунок 1.2 – Підозрілий ховається за листям дерев

ТПВ застосовуються збройними силами як приклади нічного бачення для виявлення теплоконтрастних цілей (живої сили і техніки) в будь-який час доби, незважаючи на використання противником засобів оптичного маскування у видимому діапазоні (наприклад камуфляж). Термографічна картина може розповісти оператору ТПВ як про розташування цілі, так і про її розміри, а також параметри об'єкту. Створення термограм з урахуванням теплових зображень знайшло багато застосувань. Наприклад, пожежники використовують їх для

виявлення в умовах задимлення людей та встановлення вогнищ займання.

Сучасні тепловізори найчастіше будуються на основі спеціальних матричних датчиків температури – болометрів. Вони є матрицею мініатюрних тонкоплівкових терморезисторів. Інфрачервоне випромінювання, зібране і сфокусоване на матриці об'єктивом тепловізора, нагріває елемент матриці відповідно до розподілу температури об'єкта, що спостерігається.

Такі досягнення, як технологія детального обстеження, об'єднання ІЧ та візуального зображення, автоматичні налаштування та розвиток програмного забезпечення для інфрачервоних камер дозволяють знайти оптимальне рішення для проведення аналізу температурних показань.

Тепловізори ще тільки на початку свого шляху, але вже зараз їх використання дозволяє створювати технічно та економічно ефективні системи. З часом застосування тепловізорів стане ще економічно вигіднішим, і вони стануть одним з найнадійніших, потіснивши відеокамери та інші технічні засоби безпеки.

Системи управління будівлею незабаром почнуть користуватися бюджетними тепловізорами. Управління системами опалення та кондиціонування стане більш інтелектуальним та енергоефективним. Крім температури в приміщеннях, тепловізори дають інформацію про наявність і кількість людей, їх переміщення і скупчення. Охоронні та пожежні датчики отримають нові можливості для аналізу обстановки та суміщення своїх функцій з відеоспостереженням, у тому числі у повній темряві навіть без ІЧ-підсвітки, оскільки тепловізори працюють лише на принципі прийому теплового випромінювання в діапазоні від 3мкм до 15 мкм. Важко передбачити, які нові алгоритми та інтелектуальні можливості будуть відкриті при інтегруванні тепловізорів у системи безпеки будівель та системи управління енергоефективністю будівель. на його ціну

1.2 Тепловізор Dali S253H

Dali S253H - тепловізійний монокуляр від відомого китайського виробника, що спеціалізується на складних технічних рішеннях в області систем тепловізійного бачення - Dali Technology CO., LTD. Модель оновленої серії IRtech-

S25X II побудована на передових теплочуттєвих сенсорах VOx 384x288 піх. @ 17 мкм (NETD) < 40мК, 50 Гц власного виробництва. Тепловізор володіє значними можливостями щодо виявлення теплоконтрастних цілей. Тварина або об'єкт розміром з людину можна виявити з дистанції 1600 метрів. Фокусований ширококутний об'єктив дозволяє ідеально налаштувати видимість цілі на всьому діапазоні дистанцій. Модель оснащена передовими алгоритмами обробки зображень, які порушують якість зображення на новий рівень. Потоківне відео доступно на кольоровому повнорозмірному HD дисплеї в дозволі 1280x960. Опції запису відео допоможуть зібрати відео і фото докази вдалих моментів спостережень.



Рисунок 1.3– Тепловізор Dali S253H

Прилад не потребує ІЧ-підсвічування і чудово «бачить» крізь атмосферні перешкоди у вигляді опадів, туману, пилової суспензії або задимлення території. Теплий об'єкт буде добре помітний крізь нещільну рослинність. Додатково є опції відстеження самої гарячої точки і стадіометричний далекомір для обчислення відстані. Тепловізор створювався для мисливців, працівників охоронних структур, рятувальників, туристів та ін. Це хороший помічник на нічних типах полювань, прилад дозволить помітити тварину з безпечної відстані.

Технічні характеристики:

- сенсор Vox Ceramic (оксид ванадію);
- тип Uncooled FPA;
- роздільна здатність, крапок 384×288 пікс;
- крок пікселя 17мкм;
- частота оновлення кадрів 50Гц;
- температурна чутливість (NETD) <40 мК;
- ;дальність виявлення тепло-контрастних цілей —1600 м;
- германієвий об'єктив F35/1.0 з фокусуванням від 1 м;
- поле зору, градусів/м на 100м–10,7°×8°/18,7 x 14;
- кольоровий HD дисплей 1280x960 пікс;
- діапазон робочих температур: від -20до +50°С;
- габарити 200×1×71 мм, вага 0,45 кг;

1.2 Тепловізор HikMicro LYNX Pro LH19

Тепловізійний монокуляр HikMicro (Hikvision) HM-TS03-19XG/W-Lh19 – середня модель лінійки LYNX Pro LH, яка була випущена в другій половині 2020 року. Виробник – один з найбільших гравців ринку систем відеоспостереження на основі тепловізійних приладів. Продукція Hikvision представлена на ринках більше 150 країн по всьому світу. Всі моделі побудовані на базі тепловізійних модулів власного виробництва, і мають цілий ряд передових технологічних рішень в області обробки зображень. В середньому ціновому сегменті прилади бренду Хіквіжн не мають конкурентів у категорії «ціна/якість». Монокуляри серії LYNX Pro LH зібрані на основі неохолоджуваних мікроболометрів нового покоління 384x288 пікс. @ 12 мкм, NETD<35мк (HikMicro Technology) спостережень.



Рисунок 1.4 – Тепловізор HikMicro LYNX Pro LH19

Технічні характеристики:

Приймач теплового випромінювання 384x288 пік. @ 12 мкм (HikMicro Technology);

- тип матриць - VOx (оксид ванадію);
- температурна чутливість (NETD) << 35 мк;
- частота оновлення кадрів тепловізора - 50 Гц;
- германієвий об'єктив F19/1.0 з фокусуванням від 5 м;
- оптичне збільшення 1.86 – 14.88;
- цифровий зум: x2, x4, x8;
- поле зору, градусів/м на 100м – 13.8°&Times;10.4°/24,2 x 18,2;
- дальність виявлення тепло-контрастних цілей—897 м;
- кольоровий HD LCOS дисплей 1280x960 пікс.

2 КЛАСИФІКАЦІЯ ТЕПЛОВІЗОРІВ

Технологія інфрачервоного теплобачення перетворює невидиме інфрачервоне теплове випромінювання у відповідний електричний сигнал та формує інфрачервоне теплове зображення для спостереження неозброєним оком після збільшення та обробки зображення.

«Інфрачервоний детектор є основним компонентом усієї інфрачервоної тепловізійної системи, і він є ключем до виявлення, розпізнавання та ідентифікації інфрачервоної характеристичної інформації мети. Характеристики інфрачервоного детектора визначають якість інфрачервоного теплового зображення. З різних точок зору існує безліч різних методів класифікації інфрачервоних детекторів:

2.1 Класифікація ІЧ систем

За принципом роботи інфрачервоного детектора він ділиться в основному на теплові детектори і детектори фотонів. До теплових детекторів відносяться піроелектричні, термобатарейні, мікроболометри і таке інше. Фотонні детектори включають фотопровідні, фотоелектричні, квантові ями, надгратки та інші детектори з різними фотонними ефектами.

Відповідно до довжини хвилі відгуку інфрачервоного детектора його можна розділити на детектор короткохвильового інфрачервоного випромінювання (1-3 мкм), детектор середнього діапазону хвиль (3-5 мкм) та детектор довгохвильового інфрачервоного випромінювання (8-14 мкм). Вищезгадані три смуги також називають трьома атмосферними вікнами інфрачервоного випромінювання.

Uncooled detector	Cooled detector
Low sensitivity	High sensitivity, clear image
Small size and light weight	The volume is too large and the weight is heavier
Low power consumption	High power consumption
Short range	Long range
Partially portable applications	Partial system application

Рисунок 2.1 – Класифікація ІЧ систем

За структурою його можна розділити на детектор блоку, детектор ліній та детектор фокальної площини. Якщо для візуалізації використовуються блоковий детектор і лінійний детектор, він має бути обладнаний механізмом оптичного сканування, а детектор фокальної площини може реалізувати візуалізацію погляду.

За робочою температурою його можна розділити на детектор, що охолоджується, і детектор, що не охолоджується. Звичайні детектори фотонів повинні працювати при низькій температурі, тому всі вони типу, що охолоджується. Однак тепловий сповіщувач зазвичай працює в діапазоні кімнатної температури, і поліпшення характеристик не є очевидним при зниженні робочої температури.

Дослідження просторових розподілів температури по одній або двох координатах вимагає сканування поверхні об'єкта, яке здійснюють або механічно, або електронним способом. Тепловізори для реєстрації теплового випромінювання діляться на два основних класи побудови зображення.

Сканування зображення. Для формування зображення, отримують точкове значення температури и записують у пам'ять. Точність зображення з тепловізора прямо залежить від швидкості побудови такого зображення. В скануючих системах тепловачення використовуються різні типи сканування, а саме:

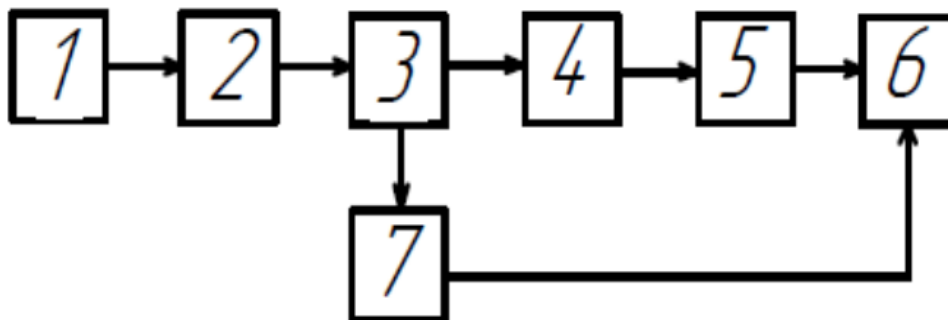
- одноелементне;
- паралельне;
- послідовне.

Насамперед, сканування проводиться, як у просторі об'єктів, так і в їх зображеннях. Розрізняють типи сканування по закону сканування, траєкторії сканування та низкою інших ознак.

Проектування зображення. Реєстрація теплового зображення це миттєви знімок теплової картинки, який переводиться у двовимірне зображення, що в свою чергу і є температурною картинкою. Проектування зображення це зображення, яке реєструється поширення теплового випромінювання в діапазонах інфрачервоного спектра та переводить його у видимий

2.3 Скануючі тепловізори

Для отримання видимого зображення з випромінюваного об'єкта скануючим тепловізором здійснюється розгортка об'єкта на деякі елементарні майданчики. Кожен майданчик, ще називають елементом розкладання, є найменшою деталлю, яку може відтворити дана система. Приймач випромінювання (ПВ) аналізує потужність теплового випромінювання окремих розкладених елементів об'єкта. Послідовно з часом знімаються сигнали з ПВ, які зберігають інформацію про тепловипромінюючий об'єкт та навколишній фон. На рис 2.2 представлена спрощена структурна схема скануючого тепловізора.



1- ОК; 2 -оптична система; 3 - блок сканування; 4- приймач випромінювання (ПВ); 5 –охолоджуюча система та підсилювач; 6 – відео-контрольний пристрій(ВКП); 7– пристрій синхронізації

Рисунок 2.2 – Спрощена структурна схема скануючого тепловізора

Алгоритмічний опис роботи тепловізора з оптико-механічним скануванням включає три пункти, а саме:

- теплове випромінювання об'єкта контролю та навколишній фон, пройшовши через шари атмосфери, віддалений тепловізором та спостережуваним об'єктом, фокусується оптичною системою;
- скануючий пристрій(3) здійснює розгортку об'єкта та послідовно направляє на ПВ(4) зображення різних елементів об'єкта;
- після підсилення та перетворення тепловізійного сигналу підсилювачем, сигнал потрапляє на відео-контрольний пристрій, де формується зображення видиме зображення об'єкта та записується

сигнал будь-яким реєстратором. В даному пункті алгоритму на ВКП надходять сигнали від пристрою, який в свою чергу синхронізує сигнали ВКП зі скануючим пристроєм.

На рисунку 2.3 представлено методи сканування, що застосовуються в скануючих тепловізорах.



Рисунок 2.3 – Методи сканування. Паралельне сканування, послідовно-одноелементне, послідовно-лінійне, послідовно-паралельне

Оптико-механічні системи містять більшу кількість рухливих деталей, тоді як матричні тепловізори фактично є передавальними тепловізійними системами ІЧ-діапазону

2.4 Матричні тепловізори

На сьогоднішній день, сучасна тепловізія знаходиться на межі двох етапів свого розвитку, коли існують тепловізори 3-го покоління з матричними детекторами замінюють тепловізори 2-го покоління на оптико-механічні системи сканування. Технічні характеристики тепловізорів 2-го і 3-го поколінь подібні, але тепловізори 2-го покоління значно поступаються візуаторам 3-го покоління за вартістю, розміром та енергоспоживанням. Тому перспективи розвитку тепловізійних систем, як правило, пов'язані з матричним детектором.

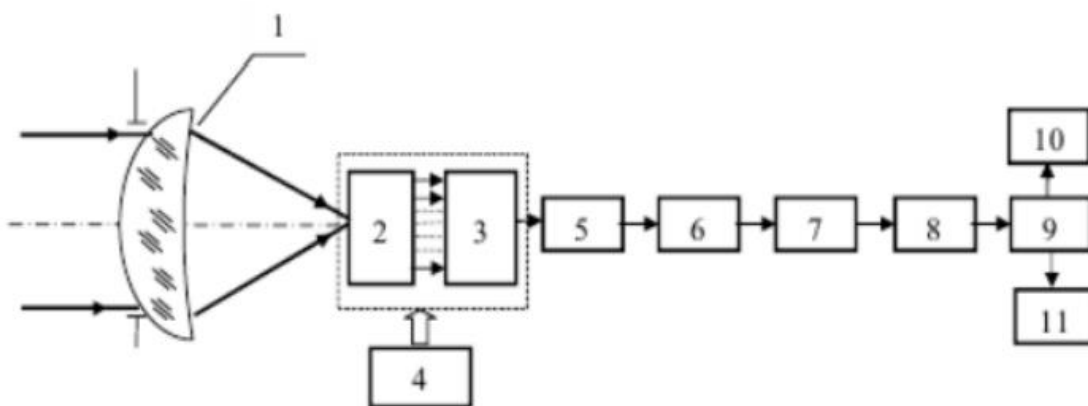


Рисунок 2.4 – Узагальнена функціональна схема тепловізора з фокальною матрицею

На рисунку представлено функціональну схему тепловізора з фокальною матрицею, який включає в склад охолоджуючі пристрої, мультиплексор, підсилювачі, коректор неоднорідності характеристик чутливих елементів, аналого-цифровий перетворювач, блоки цифрової обробки та формувачі вихідних сигналів. З виходу сигнал інфрачервоного випромінювання може надходити до мікроконтролера, або процесора, для наступних маніпуляцій над зображенням, а також виведення отриманих значень температури кожної елементарної частинки на дисплей або збереження даних на окремому сервері. Загалом тепловізори третього покоління в однакових умовах використання виграють у скануючих систем теплобачення, але недоліком обмежена ефективність дискретизації зображення матрицею детектора, що призводить до спотворення зображення.

2.5 Спектральна характеристика

Спектральний діапазон тепловізора для тепловізійної зйомки будівель чи споруд складає 3-5,5 або 8-14,0 мкм. Оптимальний спектральний діапазон приймачів випромінювання тепловізорів при тепловізійному обстеженні визначається формулою закону зміщення Вина, згідно з яким обчислюють довжину хвилі λ_m , що характеризується максимальним значенням спектральної поверхневої щільності потоку випромінювання фізичного об'єкта: $\lambda_m = 2898/T$, де λ_m – виражена в мкм - У градусах Кельвіна К. Для тепловізійного контролю огорожувальних конструкцій, відповідно до закону усунення Вина, доцільно

використовувати тепловізори, що працюють у довгохвильовому спектральному діапазоні 8-14,0 мкм. Однак, у цьому діапазоні вищий коефіцієнт відображення інфрачервоного випромінювання від конструкцій, виконаних зі скла, близько 20%. Для них краще вибирати тепловізор, що працює в короткохвильовому діапазоні 3-5,5 мкм, але в цьому випадку вище коефіцієнт пропускання - близько 8%. Таким чином, для проведення тепловізійного обстеження можна використовувати й ті та інші тепловізори, з урахуванням особливостей їх застосування, у зазначених спектральних діапазонах для тепловізійного контролю різних типів конструкцій, що захищають. При налаштуванні тепловізора, а також, у випадках отримання неоднозначних результатів слід орієнтуватися на контактні вимірювання температур в тих самих точках, як на більш точні.

2.6 Роздільна здатність тепловізора

Роздільна здатність - величина, що характеризує кількість елементів зображення, що зчитуються, на одиницю довжини. Зазвичай розмірність цієї величини вказують у точках на дюйм. Розрізняють фізичний (апаратний) дозвіл та інтерполяційний дозвіл сканера.

Фізична роздільна здатність характеризує конструктивні можливості сканера в дискретизації зображення по горизонталі та вертикалі. Горизонтальна оптична роздільна здатність планшетних (площинних) сканерів, що мають фіксовану фокусну відстань, визначається як відношення кількості окремих світлочутливих елементів в лінійці (або лінійках) фотоприймача до максимальної ширини робочої області сканера. Високе значення оптичної роздільної здатності досягається за рахунок збільшення щільності реєструючих елементів або одночасного використання декількох фотоприймачів. В останньому випадку окремі частини зображення, що вводиться, об'єднуються автоматично або вручну. Відстань, на яку за допомогою крокового механізму зміщується головка, що сканує, визначає роздільну здатність сканера по вертикалі. Роздільна здатність вводиться зображення у вертикальному напрямку визначає швидкість переміщення фотоприймача щодо оригіналу (або навпаки). При зменшенні дозволу збільшується швидкість сканування.

У проєкційних сканерах, а також у цифрових фотоапаратах оптична роздільна здатність зазвичай виражається в загальній кількості точок у знімку, оскільки ступінь деталізації зафіксованого зображення залежить від віддаленості об'єкта сканування від камери, що реєструє. Оптична роздільна здатність барабанних сканерів залежить від характеристик крокового двигуна та апертури об'єктива, а також від яскравості використовуваного джерела світла та максимальної частоти обертання барабана. У багатьох сканерах передбачається можливість програмного підвищення роздільної здатності — інтерполяції. Проте це підвищує ступеня деталізації уявлення зображення, лише знижує його зернистість. При інтерполяції сканер зчитує з оригіналу графічну інформацію межі свого фізичного дозволу і включає формований образ зображення додаткові елементи, присвоюючи їм усереднені значення кольору сусідніх, реально лічених точок. Застосування інтерполяції у деяких випадках дозволяє досягати добрих результатів: згладжуються межі растрових об'єктів і чіткіше опрацьовуються дрібні деталі.

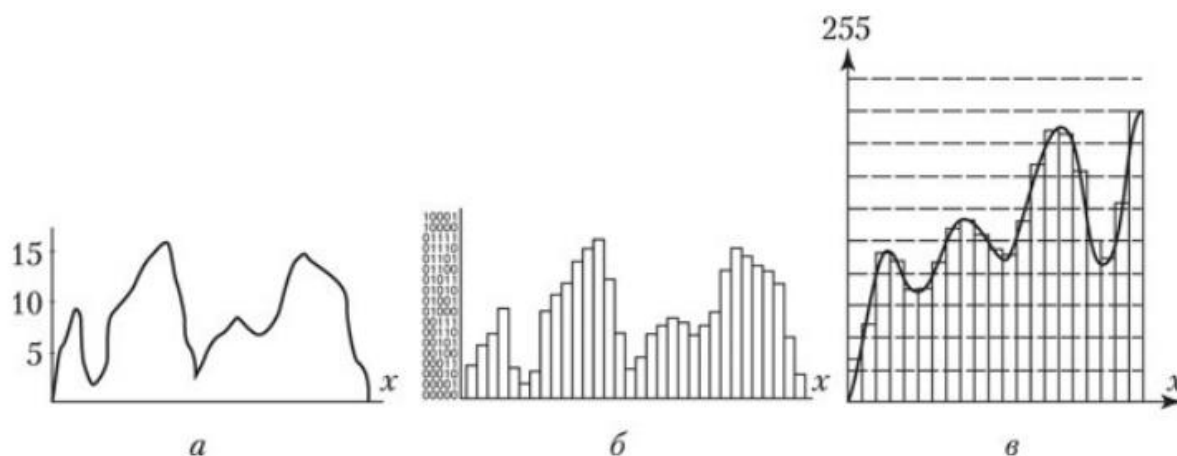


Рисунок 2.5 – Приклад сигналу, що характеризує розподіл оптичної густини в точках (x) лінії сканування

Саме цей показник впливає на чіткість зображення, а також значною мірою на ціну, якщо взяти 2 ідентичних тепловізора одного бренду, але які розрізняються тільки інфрачервоним дозволом.

Про які цифри йдеться? У недорогих камерах початкового рівня, роздільна здатність становить 30x30, або 60x60. Можна провести аналогії зі смартфонами.

Навіть якщо їх дисплей більше за площею в 2 рази (близько 6 дюймів), то кількість пікселів в сучасних моделях складає 1000 на 2000. Зрозуміло, що порівняння не зовсім коректне, тому що в тепловізорах мова йде про інфрачервоні пікселі, але все ж дає уявлення про те, що 30x30 або 60x60 це дуже мало. Лампа на стелі або світильник зіллється в одну яскраву пляму і виявити проблемний об'єкт, особливо дрібний з геометричними розмірами в сантиметри або міліметри, не представляється можливим. На сьогоднішній день існує три прийняті стандарти роздільної здатності зображень (можуть відрізнятися у різних виробників):

- низька роздільна здатність – до 19600 пікселів (160x120 пікселів);
- середня роздільна здатність – до 76800 пікселів (320x240 пікселів);
- висока роздільна здатність – до 307200 пікселів (640x480 пікселів).

Потрібна роздільна здатність визначається, в першу чергу, використовуваним додатком для обробки зображення та рівнем якості, що встановлюється вами вручну в установках. При оцінці якості зображення камер з матрицями розміром 5 мегапікселів і 10 мегапікселів, більшість користувачів не помітять жодної різниці, оскільки надрукувати зображення з таким дозволом досить проблематично. У тому випадку, якщо ви збираєтеся завжди роздруковувати та демонструвати повну роздільну здатність, одержувану тепловізором, то вам достатньо використовувати прилад з більш скромними параметрами. Навіть при роздільній здатності 640x480 пікселів, отримуване теплове зображення займатиме лише частину дисплея сучасного комп'ютера і при виведенні на друк необхідну якість буде реалізовано повною мірою. Тому при оцінці якості зображень, одержуваних за допомогою інфрачервоних камер – число пікселів матриці є важливим параметром, але найбільш значущим є рівень роздільної здатності зображення.



Рисунок 2.6 – Роздільна здатність 160x120 пікселів



Рисунок 2.7 – Роздільна здатність 320x240 пікселів



Рисунок 2.8 – Роздільна здатність 640x2480 пікселів

Ще однією перевагою високої роздільної здатності є можливість масштабування зйомки без втрати якості зображення. Основна частина тепловізорів оснащена стандартною оптичною системою із горизонтальним кутом огляду близько 25°. Незалежно від числа пікселів, якість зображення приладу з роздільною здатністю 640x480 пікселів, встановленого на дворазове збільшення, еквівалентно якості, одержуваному ІЧ-камерою з роздільною здатністю 320x240 пікселів, з дорогою додатковою лінзою з кутом огляду 12°. Якщо виникає необхідність у тестуванні об'єктів на відстані більше 20 футів, то необхідно зробити ціновий вибір між покупкою ІЧ-камери з роздільною здатністю 320x240 пікселів з додатковою оптикою та камери з роздільною здатністю 640x480 пікселів, для отримання зображень однакової якості.



Рисунок 2.9 – Роздільна здатність 160x120 пікселів, 4-кратне збільшення.



Рисунок 2.10 – Роздільна здатність 320x240 пікселів, 4-кратне збільшення.

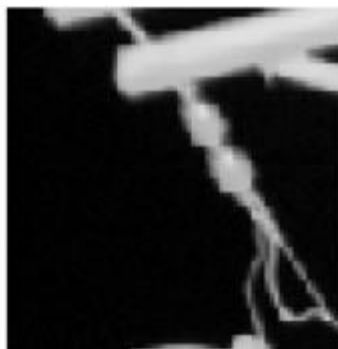


Рисунок 2.11 – Роздільна здатність 640x480 пікселів, 4-кратне збільшення.

2.7 Методика розрахунку роздільної здатності тепловізорів

Кутова роздільна здатність - мінімальний кут між лініями, точками, які може розрізнити оптична система (найменша лінійна або кутова відстань між двома точками, починаючи з якої їх зображення зливаються). Зворотна величина зазвичай служить кількісною мірою роздільної здатності. Внаслідок дифракції світла на краях оптичних деталей навіть в ідеальній оптичній системі зображення точки є не крапка, а кружок з центральною світлою плямою, оточеною кільцями (поперемінно темними та світлими в монохроматичному світлі, райдужно забарвленими – у білому світлі). Теорія дифракції дозволяє обчислити найменшу відстань, що визначається системою, якщо відомо, при яких розподілах освітленості приймач (око, лінза) сприймає зображення окремо. Згідно Релею зображення двох точок однакової яскравості ще можна бачити окремо, якщо центр дифракційної плями кожного з них перетинається краєм одного темного кільця іншого. У випадку точок, що світяться та випускають некогерентні промені, при виконанні цього

критерію Релея найменша освітленість між зображеннями точок, що розрізняються, становитиме 74% свого максимального значення. деталі.



Рисунок 2.12 – Максимальна відстань, на якій дві точки ще не зливаються



Рисунок 2.13 – Відстань на якій дві точки починають зливатись одна в одну



Рисунок 2.14 – Відстань, на якій дві точки зливаються одна в одну

Усі типи фотоприймачів, незалежно від фізичної природи та конструкції цих приладів, описуються певною сукупністю основних параметрів та характеристик.

Чутливість. У загальному випадку чутливість фотоприймача відображає зміну електричного стану на виході фотоприймача при подачі його вхід одиничного оптичного сигналу. Кількісно чутливість визначається ставленням зміни вимірюваної електричної величини, викликаного випромінюванням, що падає на фотоприймач, до кількісної характеристики цього випромінювання.

Залежно від вимірюваного електричного параметра на виході фотоприймача розрізняють струмову та вольтову чутливість фотоприймача. Якщо вимірюваною величиною є фототек, маємо струмову чутливість (S_I). Чутливість фотоприймача, у якого вимірюваною величиною є напруга фотосигналу, називається чутливістю вольтової (S_V).

Чутливість залежить від довжини хвилі падаючого випромінювання. Тому розрізняють інтегральну та монохроматичну чутливість фотоприймача до немонохроматичного випромінювання заданого спектрального складу. Монохроматична чутливість - це чутливість фотоприймача до монохроматичного випромінювання.

Шумові та порогові параметри. Крім корисного сигналу на виході фотоприймача завжди має місце хаотичний сигнал із випадковою амплітудою та спектром – це шум фотоприймача. Джерела шуму можуть бути по відношенню до фотоприймача як внутрішніми, так і зовнішніми. Шум не дозволяє реєструвати скільки завгодно мале значення вхідного випромінювання, так як воно стає невиразним на тлі шуму. У оптимально сконструйованому фотоприймачі чутливість до малих вхідних сигналів визначається лише рівнем власних шумів приладу. Шуми визначаються випадковими (флюктуаційними) процесами і рівень шумів характеризують ймовірнісні параметри: математичним очікуванням (середній рівень шуму), середньоквадратичним значенням або дисперсією. Розподіл потужності шуму по спектру часто визначається спектральною щільністю шуму - шумом в одиничній смузі частот.

Фотоприймачі є приладами, що реагують на потік випромінювання, і ця реакція описується рядом характеристик.

Вольт-амперна характеристика відображає залежність струму, що проходить в ланцюзі фотоприймача, від напруги на ньому – загальний струм.

Спектральна характеристика визначає реакцію фотоприймача на вплив випромінювання з різною довжиною хвилі. Вона визначає спектральну сферу застосування приймача, а також його спектральну та інтегральну чутливість.

Енергетична (світлова) характеристика відбиває залежність фотовідповіді від інтенсивності збудливого потоку випромінювання. Ця характеристика може мати конкретний вигляд як ампер-ватна, вольт-ватна, люкс-амперна характеристики

Енергетичною характеристикою називають також залежність інтегральної та спектральної чутливості приймача від інтенсивності засвічення.

Температурні характеристики визначають залежність таких параметрів фотоприймача як темновий струм, темновий опір, чутливість від температури навколишнього середовища. Робоча область температур регламентується відповідними технічними умовами експлуатації, де обумовлюються значення основних параметрів крайніх точках робочих температур при номінальній напрузі живлення фотоприймача. Температурний коефіцієнт фотоструму визначається співвідношенням, де I_1 і I_2 – світловий струм при температурі T_1 та T_2 :

$$TK = \frac{I_2 - I_1}{I_1(T_2 - T_1)} \cdot 100$$

Рисунок 3.1 – Температурний коефіцієнт фотоструму

Порогові характеристики описують здатність фотоприймача реагувати на світлові сигнали слабкої інтенсивності. Порогові характеристики значною мірою визначаються власними шумами приладу, які представляють флуктуації струму без засвічення.

Шуми можуть мати такі види:

- тепловий або білий шум проявляється у вигляді безладних коливань на висновках фотоприймача;
- генераційно-рекомбінаційний (дробовий) шум визначається флуктуацією концентрації та часу життя носіїв заряду;

- радіаційний шум зумовлений випадковими флуктуаціями потоку випромінювання.

Частотні характеристики визначають залежність фоточутливості від частоти модуляції світла. Вони є характеристикою інерційності фотоприймача

Фотоприймачі характеризуються такими параметрами.

Робоча напруга фотоприймача U_p – постійна напруга, що додається до фотоприймача, при якому забезпечуються номінальні параметри при тривалій роботі

Максимально допустима напруга U_{max} – максимальне значення постійної напруги, при якому відключення параметрів приладу від номінальних значень не перевищує встановлених меж

Потужність розсіювання, що виділяється під час проходження фотоструму, що визначає розігрів фотоприймача. Кожен фотоприймач характеризується певним значенням максимальної потужності розсіювання, яке має перевищуватися.

Тепловий опір R_T – опір фотоприймача без падаючого на нього випромінювання.

Диференціальний опір R_d – відношення малих збільшень напруги та струму на фотоприймачі.

Темновий струм фотоприймача I_T – струм, що проходить через фотоприймач при зазначеній напрузі живлення на ньому без падіння випромінювання.

Максимум спектральної характеристики фотоприймача – довжина хвилі, що відповідає максимальній чутливості фотоприймача.

Токова фоточутливість S_i – визначає значення фотоструму, що створюється одиничним потоком випромінювання.

Вольтова чутливість S_u – характеризує значення сигналу у вольтах, віднесені до одиниці падаючого потоку випромінювання.

Струмова та вольтова чутливості називаються інтегральними, якщо вони характеризують чутливість до інтегрального потоку випромінювання, і монохроматичними, якщо характеризують фоточутливість до монохроматичного випромінювання.

Порогова чутливість визначає рівень потужності світлового потоку, при якому сигнал дорівнює шуму.

Інерційність фотоприймачів характеризується постійними часами наростання фронту і спаду фотовідповіді при імпульсному засвіченні. Ними визначаються граничні робочі частоти модуляції світла, у якому немає помітного зменшення фотовідповіді.

Напруга шуму фотоприймача $U_{ш}$ – середнє квадратичне значення флуктуації напруги на заданому навантаженні ланцюга фотоприймача у зазначеній смузі частот.

Струм шуму фотоприймача $I_{ш}$ – середнє квадратичне значення флуктуації струму, що проходить через фотоприймач у зазначеній смузі частот.

Коефіцієнт фотоелектричного зв'язку багатоелементного фотоприймача - відношення напруги сигналу з неопроміненого елемента в багатоелементному фотоприймачі та напрузі фотосигналу з сусіднього опроміненого елемента, що визначається на лінійній ділянці енергетичної характеристики та робочою напругою у всіх елементах.

3.1 Матеріали фотоприймачів

При виборі оптичних матеріалів для оптики ТПС розрахунок прийомних систем випереджається енергетичним розрахунком, що враховує як умови роботи приладів, орієнтовно вибрані габаритні характеристики об'єктива та характеристики вибраних приймачів випромінювання, так і умови формування зображень (середня температура фону, дисперсія температури фону, мінімальна та максимальна температура і т.д.). Основне завдання будь-якого тепловізійного приладу полягає у візуалізації теплового поля з просторовим періодом в заданому тілесному куті за певний час формування кадру кадру з необхідним температурним дозволом δT для миттєвого поля зору по горизонталі Δh і по вертикалі Δv . Виходячи з цих основних положень, далі можна розглядати та виробляти вимоги до оптичних матеріалів прийомних систем ІЧ техніки.

Прийомні системи теплобачення та інтегрованих на їх основі систем активно-пасивного спостереження призначені для передачі або перетворення світла у різних ділянках спектрального діапазону. Виходячи з цього, можна провести першу зведену класифікацію застосовних оптичних матеріалів. На рис. 3.2

наводяться грубі оцінки спектральних характеристик основних матеріалів ІЧ техніки

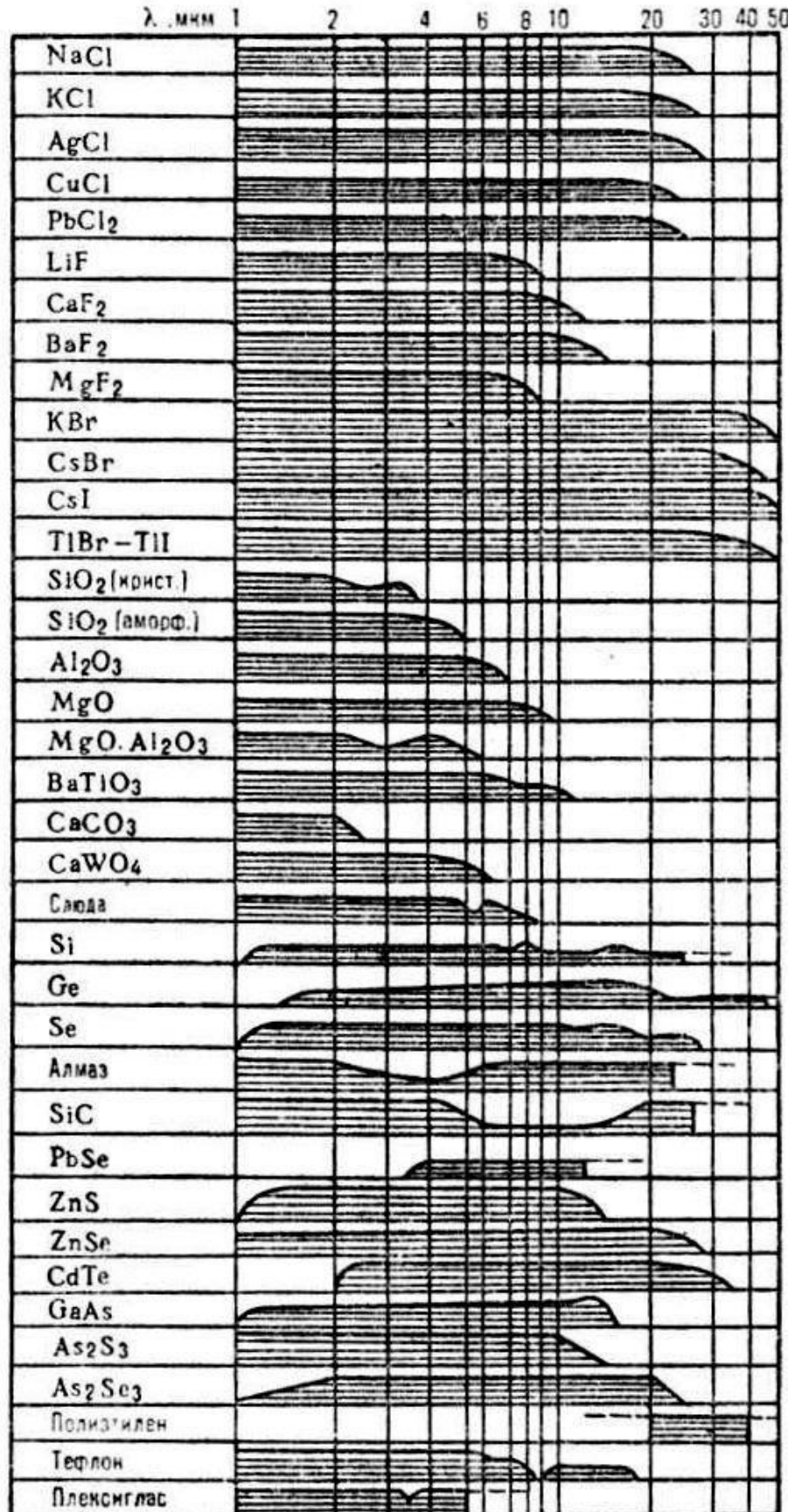


Рисунок 3.2 – Прозорість оптичних матеріалів в ІЧ області спектра

Теплові приймачі, поглинаючи потік фотонів, змінюють температуру чутливого елемента, яка, своєю чергою, викликає вторинні зміни у приймачі: змінюється з температурою електропровідність матеріалу чи його поляризація. У кожному класі приймачів існують численні групи, що відрізняються типом матеріалу, конфігурацією та загальним числом елементів, робочою температурою та типом охолоджувача. Опис типів приймачів та їх характеристик присвячено значну кількість робіт та довідкової літератури, склалася загальноприйнята фізично коректна система опису властивостей та характеристик чутливих елементів приймачів, що дозволяє розробникам ІЧ систем проводити розрахунок та моделювання приладів.

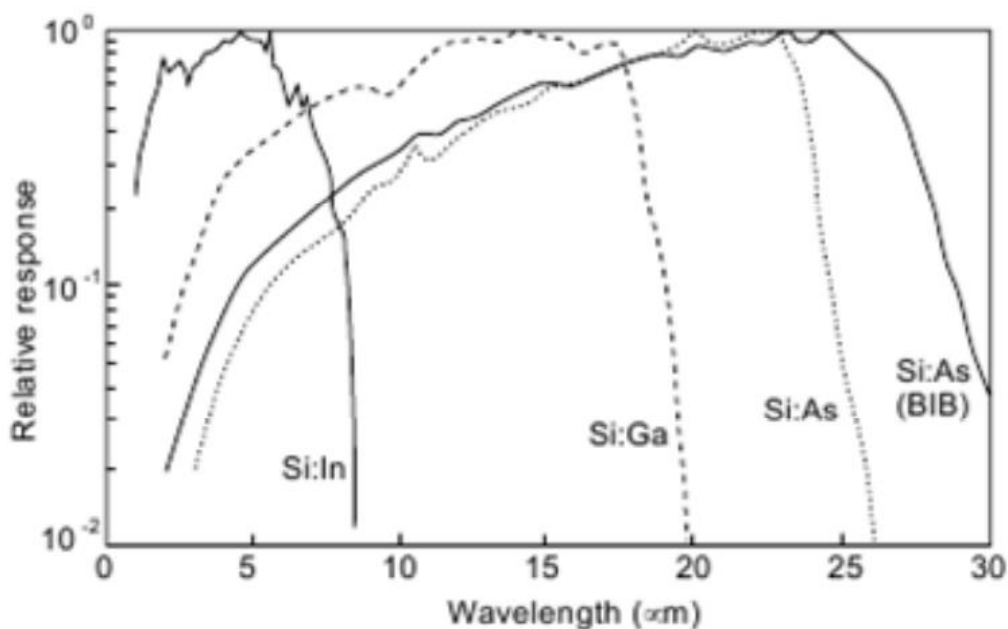


Рисунок 3.3 – Приклади спектральних характеристик ІЧ детекторів з зовнішнім фотоелементом. Показані Si:In, Si:Ga і Si:As і Si:As

Оптико-механічні системи містять більшу кількість рухливих деталей, тоді як матричні тепловізори фактично є передавальними тепловізійними системами ІЧ-діапазону.

Detector	(DE)opt (meV)	λ_p (μm)	$\lambda_c(T)$ (μm)(K)	$\eta(\lambda_p)$ (%)	Φ_B ($\text{ph cm}^{-2}\text{as}^{-1}$)	NEP ($\text{WHz}^{-1/2}$)	$\lambda(\mu\text{m}); T(\text{K});$ $f(\text{Hz})$
Si:As	53,76	23	24-24,5 (5)	50(T) 20(L)	9×10^6 6.4×10^7	$0,88 \times 10^{-17}$ $4,0 \times 10^{-17}$	(19;6;1,6) (23;5;5)
Si:P	45,59	24/26,5	28,29 (5)	~ 30 (T)	2.5×10^8	$7,5 \times 10^{-17}$	(28;4,2;10)
Si:Sb	42,74	28,8	31 (5)	58(T) 13(L)	1.2×10^8 1.2×10^8	$5,6 \times 10^{-17}$ $5,5 \times 10^{-17}$	(28.8;5;5) (28.8;5;5)
Si:Ga	74,05	15,0	18.4 (5)	47(T)	6.6×10	$1,4 \times 10^{-17}$	(15;5;5)
Si:Bi	70,98	17,5	18.5 (27)	34(L)	$< 1.7 \times 10^8$	3×10^{-17}	113;11;-)
Ge:Li	9,98		125 (calc)		8×10^8	$1,2 \times 10^{-17}$	(120;2;13)
Ge:Cu	43,21	23	29,5 (4,2)	50	5×10^{10}	$1,0 \times 10^{-17}$	(12;4,2;1)
Ge:Be ^b	24,81	39	50,5 (4,2)	100 ^b	1.9×10^{10}	$1,8 \times 10^{-17}$	(43;3,8;20)
Ge:Ga	11,32	94	114(3)	34	6.1×10^9	$5,0 \times 10^{-17}$	(94;3;150)
Ge:Ga ^b	11,32	94	114(3)	$- 10^b$	5.1×10^9	$2,4 \times 10^{-17}$	(94;3;150)
Ge:Ga ^{b(a)c}	~ 6	150	193 (2)	73 ^b	2.2×10^{10}	$5,7 \times 10^{-17}$	(150;2;150)

Рисунок 3.4 – Основні ІЧ матеріали

Інфрачервоне світло на довжинах хвиль, що інколи перевищує 5 мкм, можна виявити за допомогою детекторів сольових свинців, наприклад, що містять селенід свинцю (PbSe) або сульфід свинцю (PbS). Такі пристрої не виготовлені з епітаксіальним ростом, як, наприклад, фотодіоди InGaAs, а швидше шляхом осадження тонких полікристалічних плівок. Вони є фото провідниками (фоторезисторами), а не фотодіодами, тобто не містять p-n переходу, але виявляють зменшення електричного опору, спричиненого падаючим світлом, що індукує внутрішньополосні переходи. Детектори солі свинцю можуть використовуватися при кімнатній температурі, хоча кращі показники можливі при охолоджених детекторах. Охолодження не тільки зменшує темновий струм і, таким чином, покращує чутливість, але і знижує енергію діапазону зазорів, так що світло з більшою довжиною хвилі можна виявити.

3.2 Темновий струм

Темновий струм I_T протікає при зворотному зміщенні через навантаження без падаючого на фотодіод випромінювання. Його величина залежить від матеріалу напівпровідника, температури довкілля, конструкції фотоприймача. Темновий струм подвоюється при кожному підвищенні температури на 10°C , а опір шунт

подвоюється при підвищенні на 6°C. Звичайно, більше зміщення може зменшити ємність переходу, але кількість присутнього струму витоку при цьому збільшиться. На темновий струм також впливає матеріал фотодіода та розмір активної області.

Таблиця 3.1 – Огляд витрат на використані елементи

Матеріал	Темновий струм	Швидкість	Спектральний діапазон	Вартість
Силікон (Si)	Низький	Висока	Від видимого до ближчого ІЧ	Низька
Германій	Високий	Низька	Ближча ІЧ область	Низька
Фосфід галію (GaP)	Низький	Висока	Від УФ до видимої області	Варіюється
Арсенід галію (InGaAs)	Низький	Висока	Ближча ІЧ область	Варіюється
Антимонід арсеніду індія (InAsSb)	Високий	Низька	Від ближчої до середньої ІЧ області	Висока
Ензими арсеніду галію (InGaAs)	Високий	Висока	Ближча ІЧ область	Висока
Телурид кадмію ртуті (HgCdTe)	Високий	Низька	Від ближчої до середньої ІЧ області	Висока

. Зазвичай кремнієві фотодіоди створюють низький темновий струм порівняно з пристроями з германія. Максимальні значення цей струм має у фотодіодах, виготовлених з германію, і становить від часток до одиниць міліампера. У наведеній нижче таблиці перелічені деякі матеріали, які використовуються у виробництві фотодіодів та їх відносні темнові струми, швидкість, чутливість та вартість.

4 НАНОМАТЕРІАЛИ ФОТОПРИЙМАЧІВ ТЕПЛОВІЗОРІВ

З кожним роком технології йдуть уперед у будь-якій галузі. Так само це стосується і військової промисловості, включаючи тепловізійні технології. Популярною технологією інфрачервоних мікроболометрів у світі вважається технологія aSi (аморфний кремній). Її легко виробляти у великих кількостях, і ця технологія не дорога у виробництві. Вона встановлюється у 80% усіх приладів світу. Інші 20% займає технологія VOx (оксид ванадію). Вона значно дорожча у виробництві і робиться у невеликих кількостях порівняно з aSi. Величезною перевагою матриць на основі VOx (оксиду ванадію) порівняно з aSi (аморфним кремнієм) є менший питомий опір: 100 кОм у VOx, тоді як у aSi – 30 МОм. Завдяки цьому матриці VOx при однаковій напрузі мають можливість працювати з вищими

струмами в електроланцюзі, внаслідок чого якість картинки найменш галаслива, найбільш контрастна і чітка, а чутливість вища ніж у конкурентів на основі ASi.

4.1 Аморфний кремній

Кремній є чотирикоординованим атомом, який зазвичай тетраедрично пов'язаний з чотирма сусідніми атомами кремнію. У кристалічному кремнії ця тетраедрична структура продовжується у великому діапазоні, утворюючи таким чином добре впорядковані кристалічні ґрати. У аморфному кремнії цього далекого порядку немає. Швидше, атоми утворюють безперервну випадкову мережу. Понад те, в повному обсязі атоми в аморфному кремнії чотирьох координовані. Через неупорядковану природу матеріалу деякі атоми мають обірваний зв'язок. Фізично ці обірвані зв'язки є дефектами безперервної випадкової мережі і можуть викликати аномальну електричну поведінку. Матеріал може бути пасивований воднем, який зв'язується із обірваними зв'язками та може знизити щільність обірваних зв'язків на кілька порядків. Гідрований аморфний кремній (a-Si:H) має досить низьку кількість дефектів для використання в таких пристроях, як сонячні фотоелектричні елементи, особливо в режимі протокристалічного зростання. Однак гідрування пов'язане зі світловою деградацією матеріалу, що називається ефектом Стаблера-Вронського.

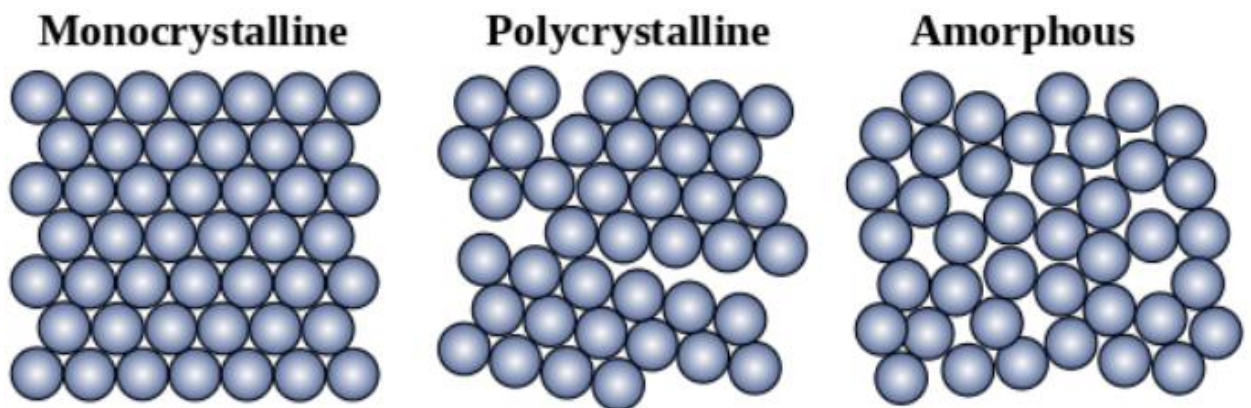


Рисунок 4.1 – Схема алотропних форм кремнію: монокристалічний, полікристалічний та аморфний кремній

Щільність аморфного Si була розрахована як $4,90 \times 10$ атом/см ($2,285$ г/см) при 300 К. Це було зроблено з використанням тонких (5 мікрон) смужок аморфного кремнію. Ця щільність на $1,8 \pm 0,1\%$ менш щільна, ніж кристалічний Si при 300 К. Кремній - один з небагатьох елементів, який розширюється при охолодженні та має нижчу щільність у твердому стані, ніж у рідкому. Основні переваги a-Si у великосерійному виробництві над ефективності, а вартості. В елементах a-Si використовується лише частина кремнію, необхідного для типових елементів c-Si, і вартість кремнію історично зробила значний внесок у вартість елементів. Однак більш висока вартість виробництва через багат шарову конструкцію на сьогоднішній день зробила a-Si непривабливим, за винятком тих випадків, коли їх тонкість або гнучкість є перевагою.

4.2 Оксид ванадію

Оксид ванадію VO_x має високі значення температурного коефіцієнта опору (ТКС = 2-3%). На основі цього матеріалу створені матриці форматом $2'048' \times 1'536$ з розміром пікселя 17 мкм. Виготовлення оксиду ванадію у вигляді тонких плівок є складним в управлінні процесом. Причина у надто вузькому діапазоні технологічних параметрів, у межах яких можна забезпечити стабільність і оптимальність характеристик оксиду. Крім того, наявність гістерези призводить до проблем при побудові теплових зображень гарячих об'єктів. Теплопровідність таких плівок на порядок вища, ніж значення цього параметра для напівпровідників (зазвичай $0,05$ Вт/смК). Однак, оксид ванадію – нестандартний матеріал для КМОП-технології. VO_x у вигляді тонких плівок є складним для керування процесом через вузький діапазон технологічних параметрів, що забезпечують стабільність та оптимальність характеристик оксиду.

Параметр	VO_x	-Si
Номинальный импеданс	100КОм	1МОм
Наименьший размер пикселя	25	30
ТКС (температурный коэффициент сопротивления), %	-2,5	-2,5...-5,0
Температура детектора	Переменная	Переменная
Температурный диапазон, °C	-40... +55 или -20...+70	0...+60
Нестабильность изображения	Легкая	Сильная
Чувствительность, мК	30	100

Рисунок 4.2 – Порівняльна характеристика аморфного кремнія та оксида вандію

Якщо ми проаналізуємо сфери застосування та характеристики мікроболометрів, то зможемо зробити висновки про оптимальне використання того чи іншого типу мікроболометрів. Так, для вимірювальних приладів, де важлива чутливість та якість зображення, слід застосовувати мікроболометри на оксиді ванадію, а де потрібна висока частота знімання інформації – на аморфному кремнії. Для охоронних камер оптимальним вибором стане тепловізор з мікроболометром на оксиді ванадію, він має більш високу чутливість, відрізняється стабільним зображенням і працює при нижчих негативних температурах, ніж прилад на аморфному кремнії.

5 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ТЕПЛОВІЗОРІВ

5.1 Методика проведення експериментальних досліджень

Було зроблено 10 знімків точкового джерела випромінювання на різних відстанях.



Рисунок 5.1 – Знімки для проведення дослідів

В якості освітленості було використано кількість пікселів на фотографії яскравість яких більше 250 градацій. Визначення кількості точок проводилось за допомогою гістограми яскравості GIMP, а дані було занесено в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Дані залежності відстані та освітленості

r,	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----

см										
I,	159800	68623	32033	19820	13196	10371	9135	8637	8090	7969
B										

За даними з таблиці було побудовано графік , і для порівняння було приведено теоретичний графік.

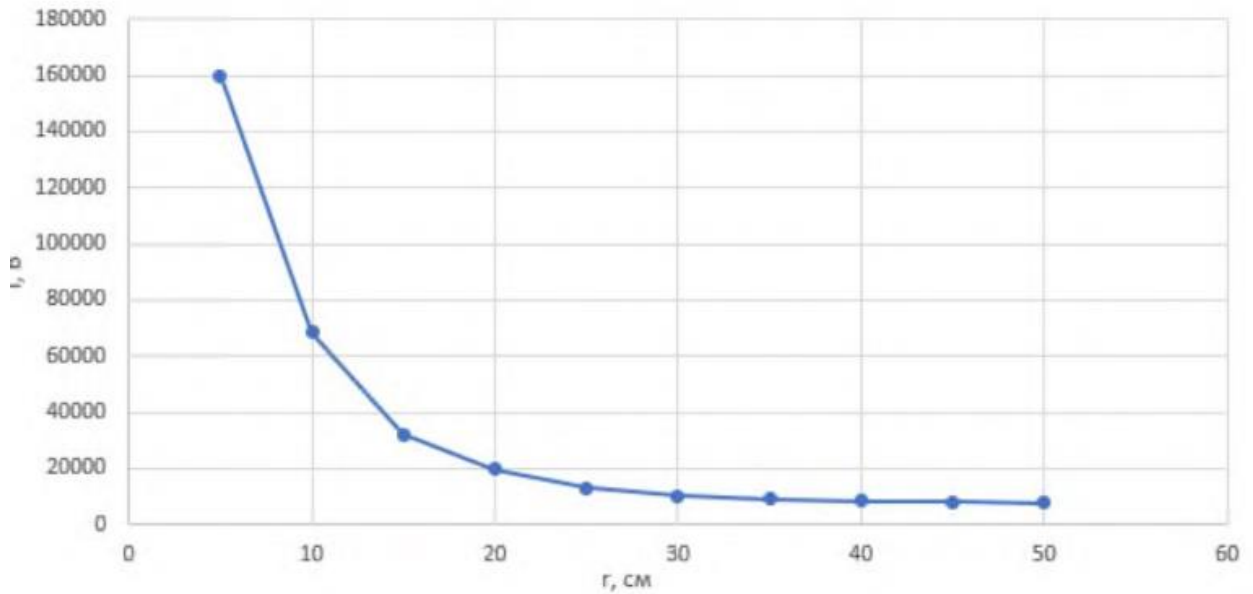


Рисунок 5.2 – Експериментальний графік

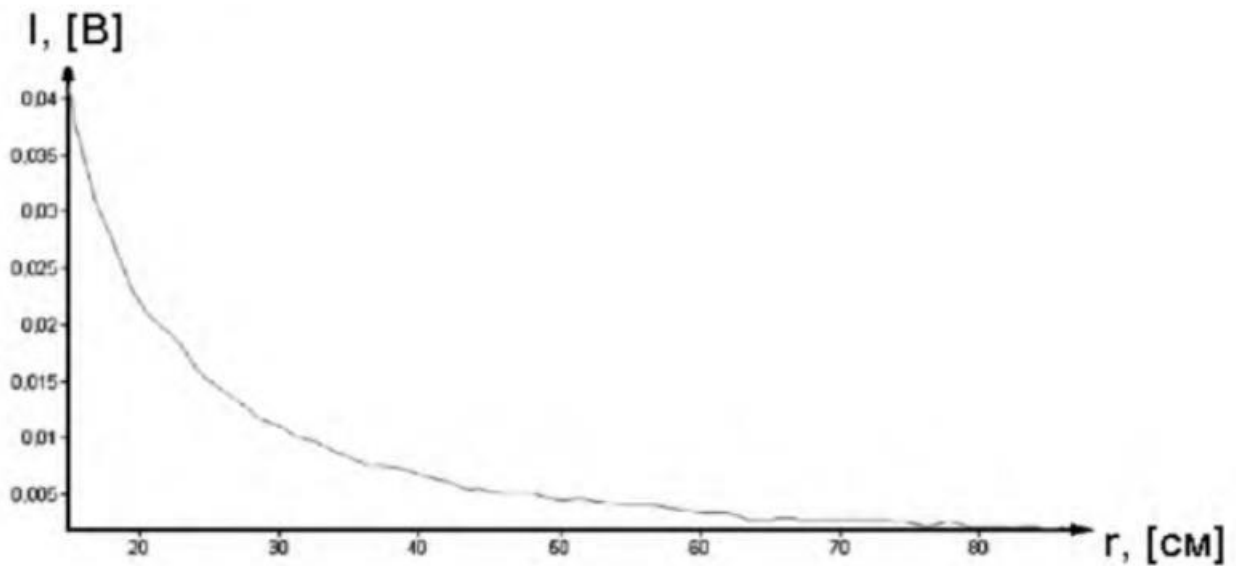


Рисунок 5.3 – Теоретичний графік

Наступна частина досліду. Було проведено підготовку установки та визначено максимальну відстань при якій дві точки ще не зливаються в одну. Відстань між ними 1 мм.

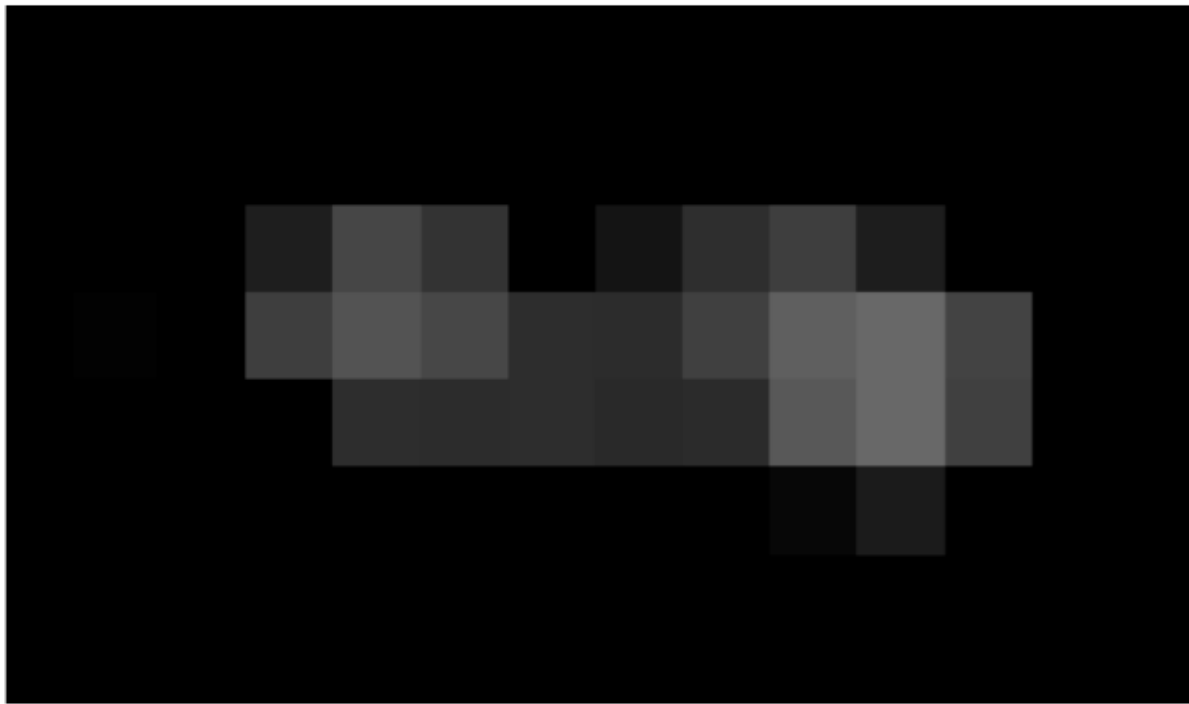


Рисунок 5.4 – Скриншот з програми Гімп з 2-ма точками світла на відстані 115см

Було перевірено яскравість пікселів за критерієм Релея. Скріншоти з програми наведено нижче.

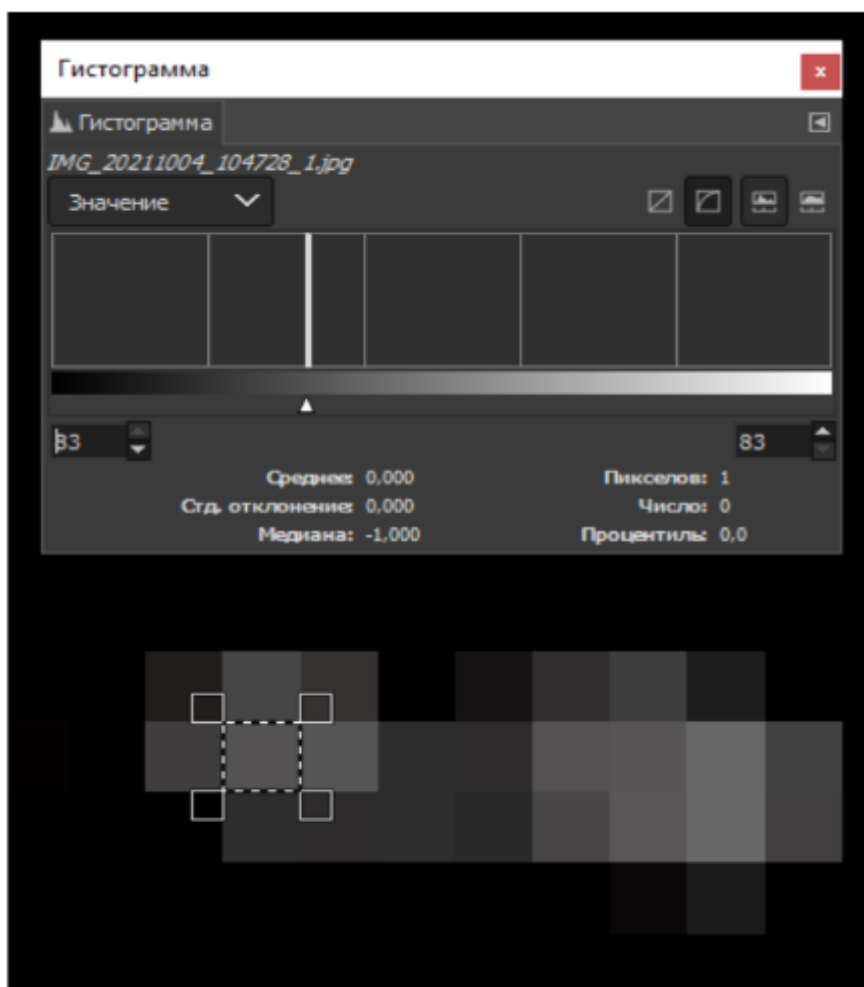


Рисунок 5.5 – Скріншот з програми GIMP з яскравістю пікселів



Рисунок 5.6 – Скріншот з програми GIMP з яскравістю пікселів

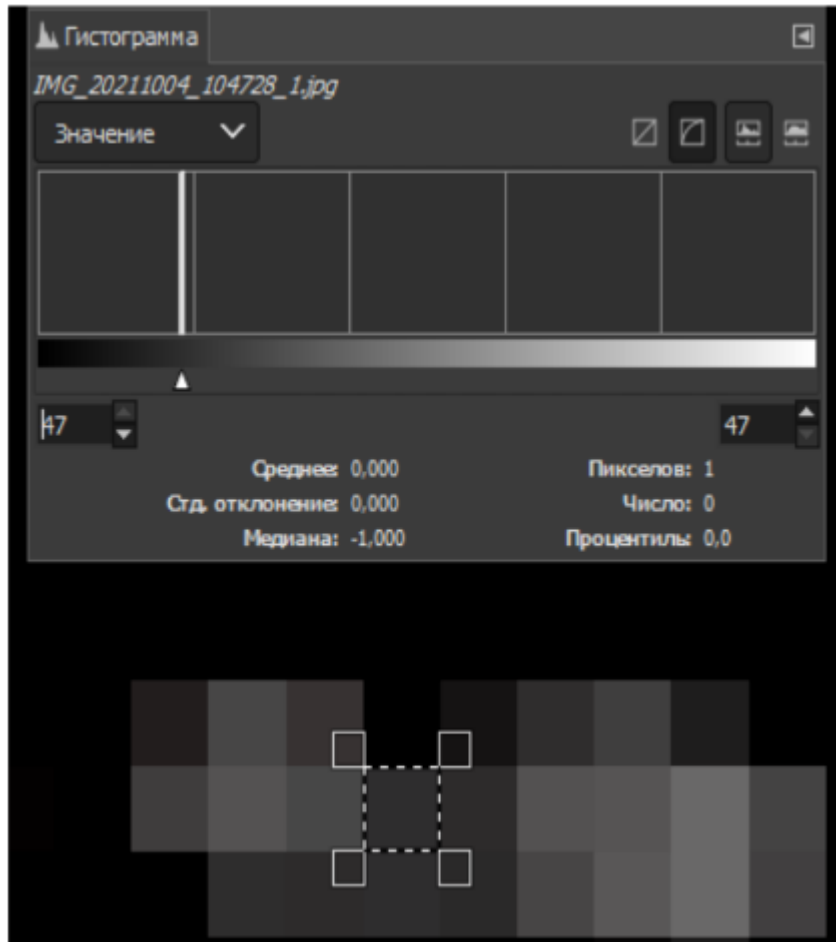


Рисунок 5.7 – Скріншот з програми GIMP з яскравістю пікселів

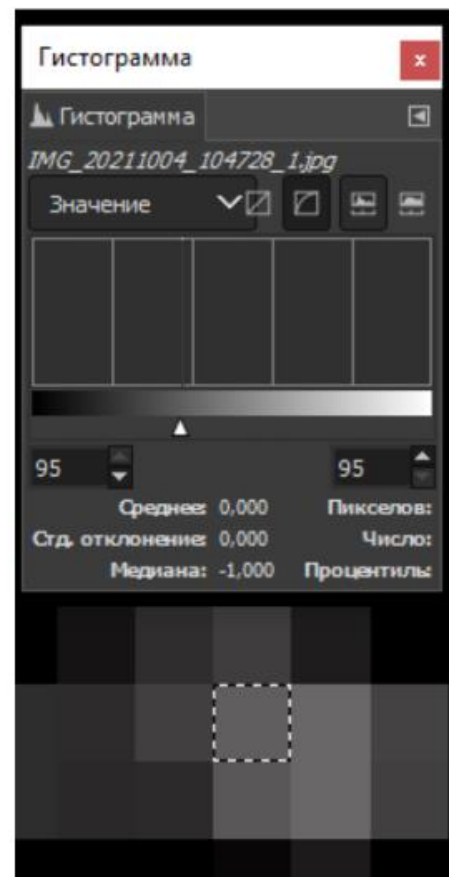
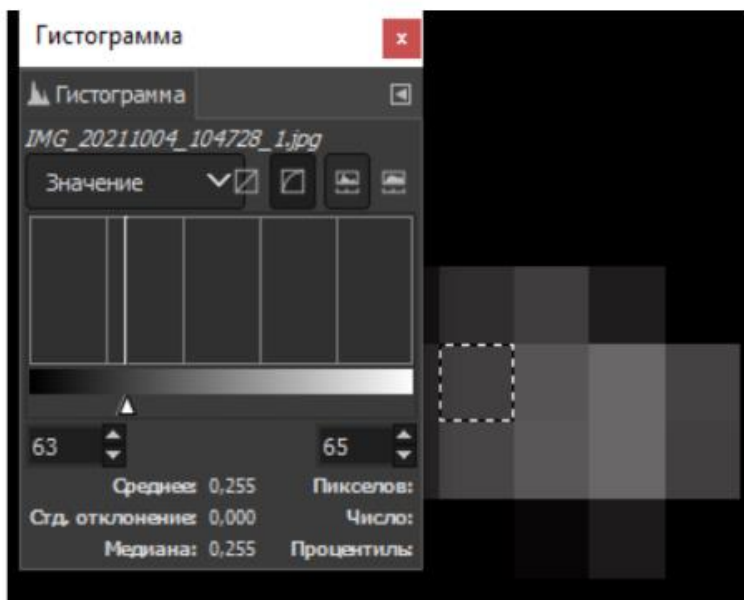


Рисунок 5.8 – Скріншот з програми GIMP з яскравістю пікселів

5.2 Експериментальні результати

Було розраховано мінімальний кут θ .

$$\theta = \operatorname{arctg} \left(\frac{R}{L} \right) = \operatorname{arctg} \left(\frac{1,15}{0,001} \right) = \operatorname{arctg}(1150) = 89.95^\circ$$

Рисунок 5.9 – Мінімальний кут θ

Зміна кривої на експериментальному графіку збігається зі зміною кривої на теоретичному, при схожих відстанях до джерела світла.

Якщо порівнювати з кутовим дозволом людського ока (близько $0,02^\circ$ - $0,03^\circ$), то отриманий кут набагато більший, це свідчить, що оптичний пристрій, який зробив знімок, може розрізняти 2 точки на набагато більшій відстані, ніж людське око за тих же умов.

ВИСНОВКИ

У даній роботі представлене дослідження систем тепlobачення, їх використання та принципів їх роботи. Проведено огляд різних методів збільшення роздільної здатності дії тепловізійних систем. Однією з найважливіших характеристик, що впливає на обрання порогового значення сигналу виявилась величина внутрішніх шумів у фотоприймачі, що виникають за стохастичними законами та залежать від параметрів матеріалу з якого виготовлено фотоелемент.

Результатом даної роботи стало експериментальне дослідження оцінки роздільної здатності світлочутливої матриці в багатоелементних фотоприймачів. Був проведений аналіз існуючих аналогічних приладів. Зроблена порівняльна характеристика аморфного кремнія та оксида вандію. Прийнято рішення використовувати для охоронних камер мікроболометр на оксиді ванадію, оскільки він має більш високу чутливість, відрізняється стабільним зображенням і працює при нижчих негативних температурах, ніж прилад на аморфному кремнії.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Уваров А.С. Проектування та конструювання електронних пристроїв / А.С. Уваров. – М.: Горяча лінія, 2004. – 760 с
2. Колобродов В.Г. Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування) / В.Г Колобродов, Н. Шустер // Підручник для вузів. – К.; 1999. – 340 с.
3. Волков В.Г. Тепловізійні прилади нового покоління / В.Г. Волков, А.В. Ковалев, В.Г. Федчишин / Спеціальна техніка, 2001. – 360с
4. Тепловізори: посібник / Л.З. Криксунов, Г.А. Падалко. – К.: Техніка, 1987. – 164 с.
5. Мисюк Ю.П. Тепловізори як сучасні інтегровані технічні засоби охорони державного кордону / Ю.П. Мисюк – 2011. – 450 с
6. Порфирьев Л.Ф. Основи перетворення сигналів в оптико-електронних системах, 1989. – 387 с.
7. Мирошников М.М. Теоретичні основи оптико-електронних приладів: Навч. посібник для вузів, 1977. – 600 с.
8. Колобродов В.Г., Лихоліт М.І. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження. Київ, НТУУ «КПІ», 2007. – 363 с.
9. Баранов В. Н Теоретичні основи оптико-електронних приладів: навч. посібник для вузів / 1977. – 600с.
10. Мосягин Г.А., Немтинов В.Б., Лебедев Е.Н. Теорія оптико-електронних систем: Підручник для студентів вузів з оптичних спеціальностей. М. Машинобудування, 1990. – 696 с.
11. Лаврик Н.В. Світлотехніка та Електроенергетика / Лаврик Н.В . – М.: Посібник для вузів, 2008. – 660 с
12. Зуев В.Е. Поширення видимих та інфрачервоних хвиль в атмосфері / В.Е. Зуев. – М.: Сов. радіо, 1970. – 496 с.
13. Сухопаров С.А. Дальність дії приладів нічного бачення пасивного типу / С.А. Сухопаров, Б.А. Пизюта // Сб. «Точність та надійність оптико-механ. приладів» / ЛИТМО. – 1973. – № 1. – С. 16 – 21

14. Якушенко Ю.Г. Теорія та розрахунок оптико-електронних приладів: Підручник для вузів / Ю.Г. Якушенко. – М.: ЛОГОС, 1999. – 360 с.

15. Волф У. Довідник з інфрачервоної техніки в 4-х т. Т.1. Фізика інфрачервоного випромінювання: пер.с. англ. / У. Волф, Г. Цисис. – М.: Мир, 1999. – 606 с

16. Бронштейн И.Н. Довідник з математики для інженерів та учнів ВНЗ / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.

17. . Тымкул Л.В. Методика уточненого енергетичного розрахунку оптико-електронних координаторів / Л.В. Тымкул // Тез. доп. міжнар. науково-техн. конф. «Сучасні проблеми геодезії та оптики». – Новосибірск, 1998. – 200 с.

Климков Ю.М. Основи розрахунку оптико-електронних приладів із лазерами / Ю.М. Климков. – М.: Сов. радио, 1978. – С. 264.