

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Дослідження методів підвищення роздільної здатності тепловізійних систем на основі наноструктур.
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи МНПм-18-1
Дерев'янка О.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої»

Керівник д.т.н. Стрілкова Т.О.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Бондаренко І.М.
(прізвище, ініціали)

2019 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

_____ І.М.Бондаренко

« _____ » _____ 2019р.

ЗАВДАННЯ НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Дерев'янку Олегу Валерійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Дослідження методів підвищення роздільної здатності тепловізійних систем на основі наноструктур _____
затверджена наказом по університету від 04 листопада 2019 р.
№ 1636 Ст _____

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

3. Вихідні дані до роботи _____ $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $w = l = 5$ мм, $d = 0.0025$ мм, $U = 5$ В, $n_{01} = p_{01} = 1.39 \cdot 10^{16}$, $n_{02} = 10^{15}$, $n_{03} = 10^{10}$, _____

$I_{k1} = 10^{-7}$ А, _____ $I_{k1} = 10^{-8}$ А _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1. Тепловізійні системи та принципи їх роботи _____

2. ІЧ системи спостереження _____

3. Структурна схема роботи тепловізійної системи _____

4. Типи конструкцій іч детекторів _____

5. Матеріали в напівпровідникових приймачах іч випромінювання _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)

Актуальність, мета роботи, дерево проблем, схема елементів типової гістограми внутрішніх шумів фотоприймачів, графік характеристик виявлення корисного сигналу на фоні внутрішніх шумів фотоприймачів, висновки.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел	04.11.19	Виконано
2	Дослідження	06.11.19 12.11.19	Виконано
3	Виконання чисельних розрахунків характеристик	13.11.19 15.11.19	Виконано
4	Аналіз розрахунків та параметрів	16.11.19	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	17.11.19 23.11.19	Виконано
6	Оформлення графічних та демонстраційних матеріалів	24.11.19 26.11.19	Виконано
7	Проходження нормо контролю і отримання рецензії	27.11.19 03.12.19	Виконано
8	Підготовка до захисту атестаційної роботи	04.12.19 18.12.19	Виконано

Дата видачі завдання 04 листопада 2019 р.

Студент _____
(підпис)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 68 с., 29 рис., 1 табл., 30 джерел, 2 додатки.

ФОТОПРИЙМАЧ, НАПІВПРОВІДНИК, ВИПРОМІНЮВАННЯ, ТЕПЛОВІЗОР, СВІТЛО, МАТЕРІАЛ, СТРУМ.

Об'єктом роботи є явище фотоефекту та його характеристик, на які особливо впливають якісні властивості матеріалу, що береться за основу.

Предметом наукової роботи є статистичні характеристики різних фотоприймачів, зроблених за різноманітними технологіями та при використанні окремих матеріалів.

Мета роботи – дослідження виявлювальних властивостей тепловізійних систем в залежності від використання різноманітних фотоприймальних елементів.

Метод дослідження – дедуктивно-аналітичний аналіз існуючих технічних рішень розробки та особливостей характеристик ІЧ фотоприймачів для тепловізійних систем та математичне моделювання процесів, що відбуваються при роботі системи.

У роботі зроблено огляд різних напівпровідникових матеріалів що використовуються в ІЧ фотоприймачах тепловізійних систем та їх характеристик, розрахунок темнових фотострумів в різних матеріалах та статистичний аналіз вихідних сигналів, що можуть бути отримані з таких матеріалів.

Унаслідок виконання роботи визначені основні технологічні рішення, що використовуються в ІЧ фотоприймачах тепловізійних систем та досліджені матеріали, що можна використовувати в тепловізійних системах при певному технічному завданні.

ABSTRACT

Master certification work: 68 p., 29 fig., 1 tab, 2 applications, 30 sources.

PHOTODETECTOR, SEMICONDUCTOR, RADIATION, THERMAL IMAGER, LIGHT, MATERIAL, CURRENT.

The object of the study is the phenomenon of photo-effect and characteristics of it, which are especially affected by the qualitative properties of the material taken as a basis.

The subject of scientific work is the statistical characteristics of different photodetectors made with different technologies and when using various materials.

The purpose of the work is to study the detection properties of thermal imaging systems that depends on different photodetectors.

The research method is a deductive-analytical analyze of technical solutions and specialties of infrared photodetectors for thermal imaging systems and mathematical modeling of processes in them.

The paper reviews the various semiconductor materials used in IR photodetectors of thermal imaging systems and their characteristics, the calculation of dark photocurrents in different materials, and the statistical analysis of the output signals that can be obtained from such materials.

As a result of the work, the main technological solutions that are used in IR photodetectors of thermal imaging systems have been identified and the materials that can be used in thermal imaging systems for a specific technical task have been investigated.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП.....	8
1 ТЕПЛОВІЗІЙНІ СИСТЕМИ ТА ПРИНЦИПИ ЇХ РОБОТИ.....	10
1.1 Застосування тепlobачення.....	10
1.2 Деякі застосування тепловізієвих приладів у військовій справі та промисловості.....	11
2 ІЧ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ.....	13
3 СТРУКТУРНА СХЕМА РОБОТИ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ СИСТЕМИ.....	18
4 ТИПИ КОНСТРУКЦІЙ ІЧ ДЕТЕКТОРІВ.....	29
4.1 Фотовольтанічні детектори.....	31
4.2 Фоторезистивні детектори.....	32
4.3 Фотоемісійні детектори.....	32
4.4 Фотодетектори на квантовій ямі.....	33
4.5 Термопары.....	34
4.6 Піроелектричні приймачі.....	35
4.7 Мікробалкові приймачі.....	36
4.8 Болметри (терморезистори).....	37
4.9 Характеристики фотоприймачів.....	38
4.10 Внутрішні шуми в ІЧ фотоприймачах.....	39
5 МАТЕРІАЛИ В НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЙМАЧАХ ІЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	44
6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РОЗРАХУНКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В СЕРЕДИНІ НАПІВПРОВІДНИКІВ.....	53
ВИСНОВКИ.....	65
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	66
Додаток А. Відомість атестаційної магістерської роботи	69
Додаток Б. Презентація.....	70

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І
ТЕРМІНІВ

ІЧ – інфрачервоний;

Si – кремній;

GaAs – сполука Арсеніду Галія;

CdHgTe – твердий розчин кадмій-ртуть-телур.

ВСТУП

На сьогодні існує велике розмаїття пристроїв для перетворення світлової енергії та сигналів на електричні, від найпростіших фоторезисторів, фотодіодів та фототранзисторів до більш складних фоточутливих пристроїв, наприклад, телевізійних та тепловізійних систем. Телевізійні та тепловізійні системи мають можливість реєструвати та виявляти електромагнітне випромінювання від окремих об'єктів, яке обумовлене різноманітним рівнем температур. І з розвитком технологій передачі інформації за допомогою світлових сигналів постає необхідність у покращенні властивостей фотоприймачів та їх статистичних характеристик для прийому даних на фоні постійного фонового шуму. З великим стрибком комп'ютерних технологій заявилося чимало методів програмної обробки сигналів задля покращення якості отриманих даних, при цьому може відбуватися нагромадження різних розрахунків та перетворень, що можуть суттєво вплинути на початковий сигнал. При цьому рішення, що можуть істотно вплинути на фізику самого процесу для його покращення набагато менше, але при ретельному їх дослідженні є можливість суттєво підвищити якість вихідних сигналів.

Принцип дії тепловізора заснований на сприйнятті матрицею приладу теплового випромінювання від об'єктів в діапазоні 3-14 мкм. Тепловізор здатний "бачити" вночі теплове випромінювання від об'єктів і тим самим формувати чітку картину подій, що відбуваються. ІК-пасивні, або оптико-електронні датчики, відносяться до класу детекторів руху і реагують на теплове випромінювання людини що рухається. Принцип дії цих датчиків заснований на реєстрації зміни в часі різниці між інтенсивністю ІЧ випромінювання від людини і фонового теплового випромінювання.

Фотонні приймачі випромінювання забезпечують перетворення падаючого потоку фотонів в електричний сигнал за рахунок безпосередньої взаємодії фотонів з електронною підсистемою матеріалу приймача. Чутливі

елементи складаються з напівпровідників різних типів, а так само можуть включати в свою структуру різні метали, принцип їх роботи заснований на поглинанні фотонів носіями заряду, в результаті чого змінюються електричні параметри чутливої області, а саме: зміна опору, виникнення різниці потенціалів, фотоструму та ін. Дані зміни можуть бути зареєстровані вимірювальними схемами, сформованими на підкладці, де розташований сам сенсор. Сенсори мають високу чутливість і високою швидкістю відгуку.

ІК-пасивні датчики складаються з трьох основних елементів:

- оптичної системи, що формує діаграму спрямованості датчика і визначає форму та вид просторової зони чутливості;
- приймача, що реєструє теплове випромінювання;
- блоку обробки сигналів приймача, що виділяє сигнали, обумовлені рухомим об'єктом, на тлі перешкод природного та штучного походження.

В даній роботі звернена увага саме на приймач, що реєструє випромінювання, і огляд літератури проведено в напрямі пошуку рішень, що можуть покращити його роботу.

1 ТЕПЛОВІЗІЙНІ СИСТЕМИ ТА ПРИНЦИПИ ЇХ РОБОТИ

Спочатку розвиток теплобачення, як і більшості високих технологій, було пов'язано з озброєнням і військовою технікою. Однак бурхливий розвиток теплобачення і, особливо, неохолоджуваних приладів, його унікальні можливості відкрили йому дорогу в цивільний сектор. Сьогодні більшість тепловізійних систем (ТПС) є виробами подвійного призначення, тобто можуть використовуватися як у військових, так і в цивільних цілях. Для озброєння і військової техніки до сьогодні застосовуються як скануючі ТПС, так і матричні ТПВ. В останні роки розвиток тепловізійної техніки йде в основному по шляху застосування охолоджуваних багатоелементних МПП, фізичні характеристики яких дуже високі і практично не поступаються охолоджуючим системам. Сучасні ТПС мають малі масо-габаритні характеристики та енергоспоживання, забезпечують безшумну роботу і високу якість тепловізійного зображення, широкий динамічний діапазон при роботі в режимі мовного телевізійного стандарту, цифрову обробку в реальному масштабі часу, зв'язок з ЕОМ та інші. Вони діляться на два основні класи:

- спостережні (що показують);
- вимірювальні, або радіометричні (термографи).

Структурно пристрій сучасних матричних ТПВ не відрізняється від пристрою телевізійних камер на ПЗС.

1.1 Застосування теплобачення.

Теплобачення знайшло застосування в багатьох сферах людської діяльності. Наприклад, ТПВ застосовуються з метою військової розвідки і охорони об'єктів. Об'єкти звичайної військової техніки видно на відстані 2-3 км. Тепловий контроль заснований на вимірюванні, моніторингу та аналізі температури контрольованих об'єктів. Основною умовою застосування

теплого контролю є наявність в контрольованому об'єкті теплових потоків. Процес передачі теплової енергії, виділення або поглинання тепла в об'єкті призводить до того, що його температура змінюється відносно навколишнього середовища. Розподіл температури по поверхні об'єкта є основним параметром в тепловому контролі, так як несе інформацію про особливості процесу теплопередачі, режиму роботи об'єкта, його внутрішню структуру і наявність прихованих внутрішніх дефектів. Теплові потоки в контрольованому об'єкті можуть виникати з різних причин.

Основний внесок в спостережуваний теплової контраст вносять власні випромінювання об'єкта, що спостерігається і фону. Але в ряді ситуацій істотні зміни контрастів об'єктів обумовлюються не тільки власним випромінюванням тіл, але і відбитими від об'єктів (за законами геометричної оптики) нагрітими шарами атмосфери під час пригоризонтному спостереженні і холодними випромінюваннями зенітних областей заатмосферних випромінювань при спостереженні об'єктів з авіаційних і космічних носіїв. У ряді теплових вимірювань необхідно виділити відображені складові теплових потоків від контрольованого об'єкта власної температури об'єктива наглядової прилади і навіть власної температури приймача випромінювання. Подібні ситуації враховуються в прецизійних вимірах, при використанні ТПВ в режимі радіометричних (термографічних) досліджень.

1.2 Деякі застосування тепловізійних приладів у військовій справі та промисловості.

Армія і міністерство з надзвичайних ситуацій (МНС): відеоспостереження, цілевказування, моніторинг та охорона особливо важливих об'єктів, охорона кордонів, пошук і порятунок, виявлення прихованих бункерів, виявлення прихованих осередків пожеж. Енергетика: стан димових труб і газоходів, стан статорів генераторів, теплоізоляція турбін, парові трубопроводів, виявлення місць присосів холодного повітря, контроль стану

теплотрас. Нафтогазовий комплекс: перевірка стану електрообладнання, контроль технологічних ліній, пошук енерговитрат, виявлення витоків з газопроводів, запобігання пожежам. Енергозбереження: діагностика огороджувальних конструкцій, виявлення тепловтрат у внутрішніх приміщеннях і зовні будівель і споруд, визначення теплоізоляційних властивостей матеріалів.

Хімічна промисловість: перевірка герметичності та ізоляції ємностей для зберігання різних рідин і газів. Машинобудування: контроль підшипників, зубчастих передач, валів, муфт і т.д., виявлення несправності обладнання, контроль температурних режимів зварювання, термоеластичний аналіз напружень. Мікроелектроніка: контроль якості збірки друкованих плат. Автомобільна промисловість: проектування кліматичних систем автомобіля, контроль за ультразвуковом зварюванням амортизаторів, розробка і перевірка дискових гальм, контроль теплообмінних процесів в радіаторах, двигунах і вихлопних системах. Будівельна промисловість: тепловізія діагностика тепломеханічного обладнання, виявлення місць з підвищеними тепловтратами, тепловізійний контроль димових труб, перевірка ефективності при відновленні теплоізоляції і реконструкції будівель. Медицина: рання діагностика вірусних захворювань, діагностика злоякісних і доброякісних пухлин, виявлення запальних і дистрофічних уражень хребта і периферичних суглобів, діагностика захворювань скелетних м'язів, діагностика внутрішніх хвороб (діабетична ангіопатія, атеросклероз, ендартеріт судин кінцівок, хвороба Рейно, гепатити, порушення вегетативної регуляції, міокардит, бронхіт та ін), діагностика в урології (запальні захворювання нирок, сечового міхура та ін), як абсолютно нешкідливий прилад тепловізор ефективно застосовується в акушерстві та педіатрії. Фармакологія: отримання об'єктивних даних про вплив протизапальних і судинорозширювальних ліків та ін.

2 ІЧ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

При створенні системи цифрової реєстрації і відображення інформації можливі два шляхи:

- створення спеціалізованого електронного пристрою з жорстким алгоритмом;
- створення системи на основі уніфікованої ЕОМ з алгоритмами, що можна перепрограмувати.

На етапі розробки нової вимірювальної апаратури розробник стикається з такими труднощами:

- відсутністю налагоджених алгоритмів обробки вимірювальної інформації;
- відсутністю відпрацьованих тестових програм;
- великою ймовірністю появи декількох несправностей одночасно;
- наявністю крім звичайних несправностей, пов'язаних з дефектами електронних компонентів і монтажу, несправностей, пов'язаних з помилками розробників;
- невизначеністю причини несправності (відмови і збої в апаратурі або помилки в програмі).

Всі ці причини роблять завдання контролю приладу на етапі розробки найбільш складними, а вимоги до кваліфікації персоналу досить високими. Побудова тестових програм і аналіз результатів виробляються розробником вручну на підставі його уявлень про принципи роботи і структуру апаратури, що розробляється. Апаратура повинна відповідати наступним вимогам:

- можливість різноманітних вимірів, як цифрових (логічних), так і аналогових;
- різноманітність режимів роботи і оперативність настройки на заданий режим;
- оперативність і наочність представлення результатів вимірювань;

– можливість роботи як з апаратурою, так і з програмним забезпеченням.

На етапі експлуатації на перший план висуваються вимоги високої продуктивності, повноти контролю і високої автоматизації з метою зниження вимог до кваліфікації обслуговуючого персоналу. Такі інструментальні засоби, як правило, оснащуються програмами автоматичної діагностики. Завдання контролю працездатності апаратури в процесі експлуатації значно простіше, ніж на етапі розробки, з наступних причин:

– ймовірність появи двох і більше несправностей одночасно дуже мала;

– як правило, потрібно контроль правильності роботи тільки при вирішенні конкретних завдань користувача.

Тому, найбільш зручним і універсальним пристроєм для знімання, відображення і запису інформації є другий шлях, а саме, використання універсальної персональної ЕОМ з високою швидкістю і налагоджених АЦП інших фірм. Основними датчиками вимірювальної інформації в нашому випадку є:

– канали ІК радіометра; при цьому треба обробляти 4 канали з частотою сканування 25 Гц, тривалістю рядки 13,3 мс і 512 точками в рядку;

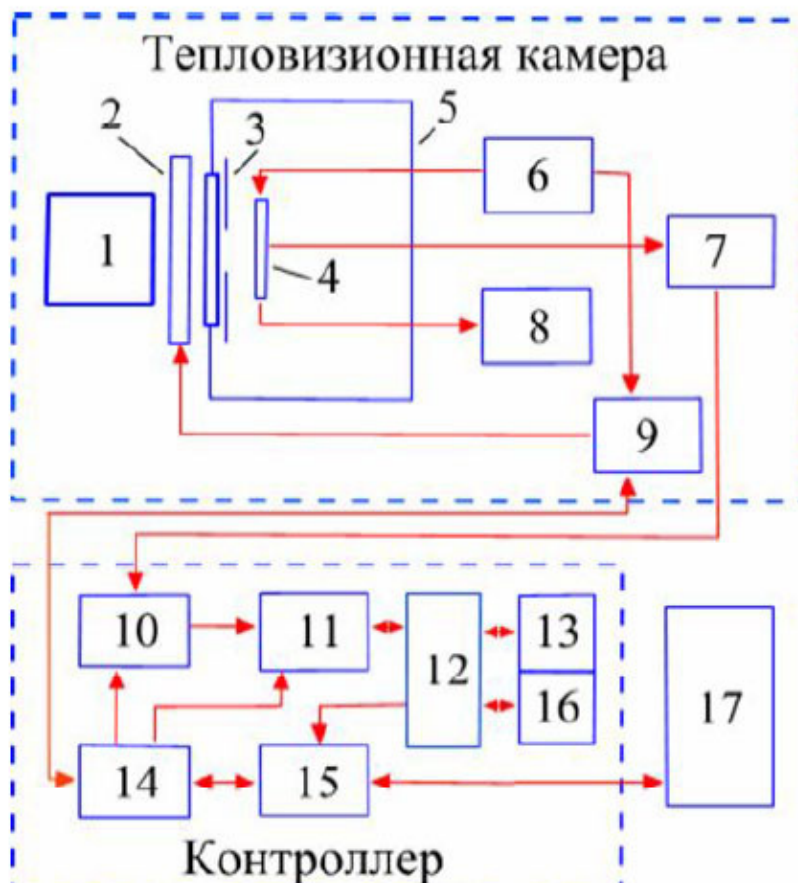
– інформація з системи визначення координат (GPS);

– сигнали від опорного чорного тіла.

Вся ця інформація записується в файл для документування подальшої обробки і побудови карт досліджуваних трас. Одночасно на екрані монітора будується ІК зображення підстильної поверхні, отримане після попередньої первинної обробки. На етапі попередньої обробки проводиться аналогова фільтрація сигналу і його оцифровка на АЦП. Період опитування становить близько 6,5 мкс.

Використовується 12-розрядний АЦП, що має динамічний діапазон 4048 градацій. Загальний обсяг записаної інформації становитиме приблизно 104450 байт / с або 104 Кбод. Таким чином, за годину роботи приладу обсяг записаної інформації становитиме всього близько 370 МБ.

З наведених вище розрахунків видно, що система цифрової реєстрації і відображення інформації може бути створена на основі персональної ЕОМ, тип якої обраний на основі габаритних і вагових параметрів, а також умов роботи. Типова блок-схема матричних тепловізорів приведена на рисунку 2.1.



1 - об'єкт; 2 - пристрій калібрування; 3 - холодна діафрагма; 4 - матричний ФПП; 5 - вакуумний кріостат з просвітленим вікном; 6 - генератор керуючих імпульсних і постійних напруг; 7 - підсилювач з диференціальним виходом; 8 - вимірювач температури ФПУ і автоматичного включення напруги зсуву підкладки з InAs; 9,14 - блоки управління і синхронізації; 10 - АЦП; 11 - суматор; 12 - диспетчер пам'яті; 13,16 - банки пам'яті; 15 - блок зв'язку з персональним комп'ютером; 17 - персональний комп'ютер.

Рисунок 2.1 – Блок-схема тепловізійної камери.

У технічному відношенні одним з переваг таких ТПВ є те, що вони побудовані на основі матричного ІЧ детектора. Ця перевага проявляється в порівнянні з ТПВ, що використовують скануючі системи, і яких багато ще на світовому ринку. У зв'язку з використанням принципу накопичення інформаційного сигналу матричні ТПВ при інших рівних умовах виграють у скануючих систем по сукупності таких параметрів, як надійність, чутливість, швидкодія і просторова роздільна здатність. Про принципи формування ІЧ зображень можна судити з наступних положень. З урахуванням випромінювання Сонця і температурного режиму природних джерел випромінювання на Землі в загальному потоці радіації, яка сприймається ОЕС в діапазоні довжин хвиль 3-3,5 мкм, домінує відбите випромінювання - це так звана підсвітлова ділянка спектра. В області довжин хвиль, великих 7 мкм, переважає власне випромінювання об'єктів і фонів. Ділянка довжин хвиль 3-5 мкм - перехідна [29]. Виявлення об'єкту проводиться по його демаскуючим ознакам, які діляться на три групи: видові, ознаки діяльності і розташування. До видових демаскуючих ознак належать фізичні властивості об'єкта (здатність відбивати випромінювання оптичного і радіолокаційного діапазонів хвиль, випромінювати енергію в тепловому діапазоні) і геометричні властивості (форма і розмір об'єкта і його окремих деталей). Дані про фоноцільову обстановку (ФЦО) необхідні для вирішення наступних завдань:

- створення моделей типових об'єктів і алгоритмів виявлення, розпізнавання та супроводження з поділом їх по пріоритетності;
- управління основними оптичними параметрами об'єкта для їх оптимізації при створенні малопомітних цілей, наприклад, за технологією, яка визначається в зарубіжній практиці як "Стелс-технологія";
- імітації і моделювання різних режимів роботи ОЕС на стадії відпрацювання конструкції і, в тому числі, в плані вирішення завдання зниження вартості приладу;

– розробки системи ідентифікації об'єктів складної конструкції в автоматичному режимі за рахунок фільтрації фону і кореляції шляхом порівняння характерних параметрів прийнятого зображення і еталона мети.

При розробці цих систем нового покоління слід орієнтуватися на промислово досягнуті результати з побудови матричних приймачів випромінювання і модульних блоків електронної обробки сигналів.

3 СТРУКТУРНА СХЕМА РОБОТИ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ СИСТЕМИ

Алгоритм, що поєднує процедури міжкадрової та внутрішньокадрової обробки сигналів, може використовуватися в автоматизованих системах спостереження (АСН) за рухомими об'єктами. У складній фоновій обстановці, коли малоконтрастні рухомі об'єкти спостерігаються на тлі значно більш контрастних предметів або перепадів яскравості в полі зору АСН, процес виявлення рухомих об'єктів розпадається на два етапи:

- формування міжкадрового різницевого сигналу (МРС), в якому зосереджена вся інформація про зміни, що відбуваються в зображенні, і в той же час відсутні (або значно пригнічені) метаючі перепади рівня сигналу, відповідні нерухомим об'єктам і деталям фону що знаходяться в кадрі;

- прийняття рішення про наявність або відсутність об'єктів у зоні спостереження на основі аналізу невеликого сегмента зображення в околиці кожної „підозрілої“ точки, в якій МРС за абсолютною величиною перевищує встановлений поріг U_n .

При проектуванні АСН, завдання яких це виявлення об'єктів доцільно використовувати поняття відносини сигнал / шум:

$$\mu = U_{\text{сmax}} / U_{\delta\text{ш}}, \quad (3.1)$$

де $U_{\text{сmax}}$ – максимальне (пікове) значення напруги корисного сигналу в електронному тракті АСН;

$U_{\delta\text{ш}}$ – середньоквадратичне значення шумової напруги, обумовленого впливом всіх складових шумів, що діють в АСН, включаючи внутрішні шуми фотоприймального пристрою (ФПП) і шуми, обумовлені квантовою природою поглинання оптичного випромінювання.

Однак слід мати на увазі, що реальне відношення сигнал / шум в міжкадровому різницевому сигналі ($\mu_{p.c}$) завжди менше відношення сигнал / шум у вихідних сигналах порівняльних кадрів.

Введемо наступні позначення:

v – швидкість переміщення об'єкта в площині зображення;

d – просторовий період елементів ФПП;

T_n – час накопичення сигналу в ФПП (КМОП, ФПЗС та ін.);

T_k – період зміни кадрів;

$\Delta T_k = nT_k$ – інтервал часу між двома кадрами, де $n = 1, 2, 3, \dots$ - ці числа натурального ряду.

Розглянемо спочатку випадок щодо повільних переміщень, коли за час накопичення сигналу зображення рухомого об'єкта встигає переміститися на відстань, що значно менше одного просторового періоду елементів: $T_n v \ll d$. Щоб виявити помітні зміни в кадрі, пов'язані з переміщенням спостережуваного об'єкта, необхідно виконання умови $n \gg 1$ (тобто $\Delta T_k \gg T_k$). У цьому випадку шумові складові в кожному з порівнюваних кадрів можна розглядати як випадкові між собою не корелюють процеси. При цьому відношення сигнал / шум в різницевому сигналі приблизно в $\sqrt{2}$ разів менше відносини сигнал / шум в порівнюваних кадрах $\mu_{p.c} \approx \mu / \sqrt{2}$.

У разі швидких переміщенні зображення спостережуваного об'єкта ($T_n v \gg d$) фактичний час накопичення T_n , визначає величину сигналу рухомого об'єкта, зменшується пропорційно швидкості: $T_n = d/v$. Тоді величину $T_n / T_k = T_n v / d$ можна розглядати як коефіцієнт зменшення відносини сигнал/шум при швидких переміщеннях об'єкта. Таким чином, фактичне значення $\mu_{p.c}$ при швидких переміщеннях можна оцінювати за наближеною формулою:

$$\mu_{p.c} \approx \mu / \sqrt{2} T_n v / d, \quad (3.2)$$

Перераховані фактори необхідно враховувати при визначенні оптимальної величини вирішального порога, з якою порівнюється абсолютне значення МРС.

Зазвичай зміни, що відбуваються в кадрі в результаті переміщення знаходяться в полі зору АСН об'єктів, займають площу як мінімум кілька разів більшу, ніж площа одного елемента зображення. Тому на етапі обробки МРС представляється можливим використовувати алгоритм накопичення сигналів по площі області тиснення, що дозволяє значно підвищити чутливість АСН до виявлення малокоонтрастних рухомих об'єктів при наявності значних шумів у вхідному сигналі.

Площа кадру розбивається на велику кількість дискретних ділянок, кожен з яких аналізується окремо і є елементарною зоною накопичення. Зона накопичення являє собою прямокутну ділянку кадру, що складається з $M \times N$ елементів. Розміри дискретної області накопичення потрібно вибирати з таким розрахунком, щоб при будь-яких зміненнях в кадрі, викликаних переміщенням об'єктів, хоча б одна з дискретних областей була повністю розташована в області змін.

Позначимо через $P_{л.т}(k)$ ймовірність помилкового виявлення сигналу про зміни в k -й зоні накопичення. Тоді ймовірність помилкової тривоги вираз (3.1) при аналізі сигналу цілого кадру можна записати в наступному вигляді:

$$P_{л.т}(T_k) = 1 - \prod_{k=1}^Q [1 - P_{л.т}(k)], \quad (3.3)$$

де Q — число зон накопичення в кадрі, рівна відношенню повного числа елементів зображення ($M \times N$) до числа елементів в зоні накопичення:

$$Q = (M \times N) / (m \times n), \quad (3.4)$$

З огляду на те, що помилкові виявлення в будь-який із зон рівновірогідні, вираз (3.1) можна записати як вираз(3.2):

$$P_{п.т}(T_k) = 1 - [1 - P_{л.т}(k)]^q, \quad (3.5)$$

Рішення про виявлення рухомого об'єкта в k -й зоні накопичення приймається у разі, якщо число елементів зображення (в межах даної зони накопичення), в яких напруга міжкадрового різницевого сигналу ($|U_{MPC}| \geq U_n$) за абсолютною величиною перевищує значення заданого порогу, більше або дорівнює p при загальному числі $q = m \times n$ елементів ($p \leq q$). Інакше кажучи, виконується умова $|U_{MPC}| \geq U_n$ при числі елементів k -ї зони накопичення не меншому ніж p . При цьому ймовірність помилкової тривоги та в k -й зоні накопичення можна обчислити за формулою:

$$P_{л.т}(k) = \sum_{l=p}^q C_q^l [P_{р.в}]^l [P_{р.в}]^{q-l}, \quad (3.6)$$

де $P_{р.в}$ - ймовірність реєстрації викиду шуму за встановлений поріг обмеження — число поєднань з q по l .

Ймовірність помилки другого роду — пропуску об'єкта — при використанні розглянутого алгоритму накопичення визначається як

$$P_{пр}^H = 1 - P_{прав} = \sum_{l=q-p+1}^q C_q^l [P_{пр}]^l [P_{пр}]^{q-l}, \quad (3.7)$$

де $P_{р.в}$ — умовна ймовірність пропуску сигналу в одному з елементів зони накопичення:

$P_{прав}$ — ймовірність правильного виявлення при відсутності алгоритму накопичення.

За наявності апріорної інформації про можливі розміри, діапазон швидкостей, щодо контрасту та інших параметрах об'єктів спостереження можна оптимізувати параметри алгоритму виявлення і, отже, роботу АСН в цілому.

Однак, враховуючи досить складний характер взаємозв'язків безлічі факторів і фізичних процесів, що протікають в різних ланках оптико-електронного тракту АСН, найбільш ефективним методом вирішення такого завдання є використання віртуальної комп'ютерної моделі АСН, що дозволяє реалізувати метод статистичних випробувань досліджуваного алгоритму (метод Монте-Карло). Наведемо деякі результати, отримані за допомогою моделі, загальні принципи реалізації якої розглянуті, наприклад, в роботі.

У моделі АСН як ковзної зони просторового аналізу в околиці „підозрілою“ точки розглядався сегмент розміром 3×3 елемента зображення (тобто $q = 9$). Рішення про наявність об'єкта в зоні аналізу приймалося у випадку, коли не менше ніж в p елементах цього сегмента МРС за абсолютною величиною перевищував встановлений пороговий рівень ($p < 9$).

На (рис. 3.1) показані залежності відносного числа хибних виявлень (помилкових тривог) $N_{пт}^*$ (суцільні лінії) і відносного числа пропусків об'єкта $N_{пл}^*$ (пунктирні лінії) від величини відносного порогу при різних значеннях параметра p . Кожне значення отримано при статистичній обробці не менше 350 реалізацій для фрагмента зображення зони спостереження розміром 64×64 елемента.

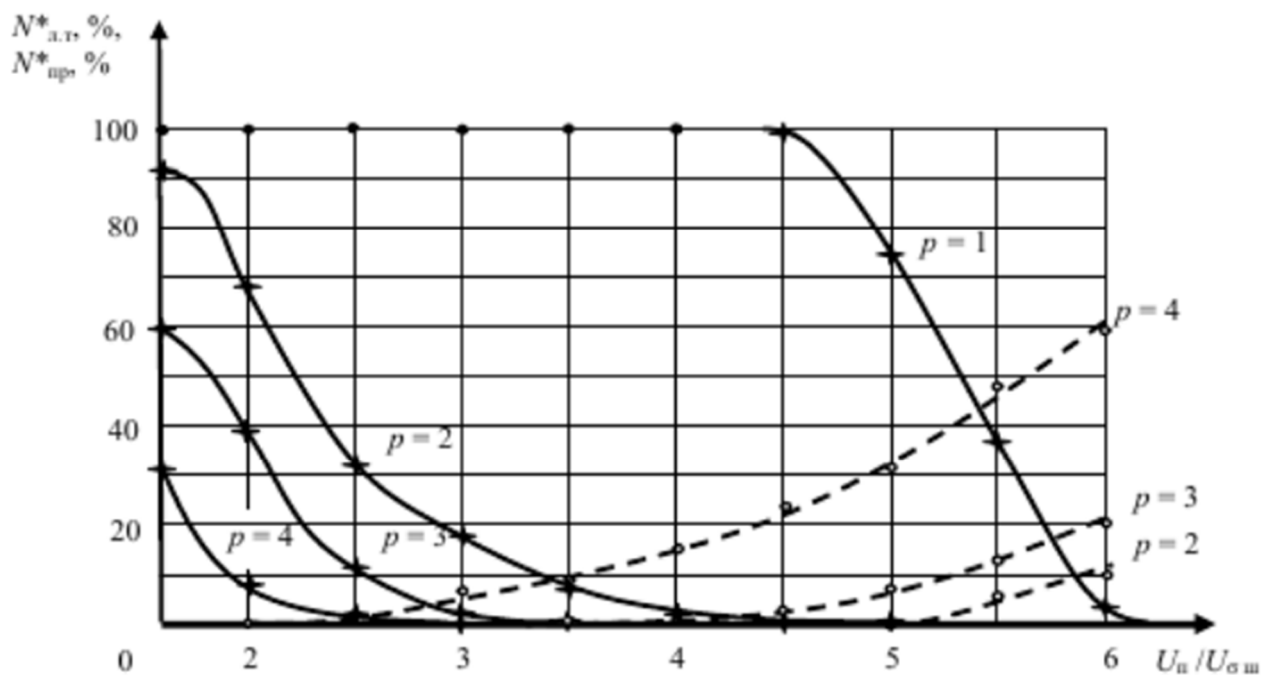


Рисунок 3.1 - Залежність відносного числа помилкових виявлень

Результати, наведені на (рис.3.2), отримані при моделюванні досить складних умов спостереження об'єкта розміром 4x4 елемента в площині аналізу зображення. Відносна величина електричного сигналу рухомого об'єкта в вихідний відеосигнал становила в середньому 0,7 від величини сигналу, відповідного нерівномірності фонові складової (див. рис. 3.1, а, в). Інтервал просторової кореляції фонові перешкоди задавався рівним 8 елементів зображення. Відносна швидкість переміщення зображення об'єкта (по діагоналі вгору і направо) становила 1,5 d за час ΔT_k . При цьому з урахуванням фотонної складової шумів і рівня внутрішнього шуму ФПУ ефективне значення відношення сигнал/шум у вихідному відеосигналі $\mu \approx 3,7$. Проте, наприклад, при поєднанні значень $U_{п}/U_{ш} = 5$, $p = 2$ (або $U_{п}/U_{ш} = 3,5$, $p = 3$) практично не було зареєстровано помилок виявлення типу "помилкової тривоги" або пропуску об'єкта. Це говорить про досить високу ефективність даних алгоритмів, що поєднують процедури міжкадрової і внутрикадрової обробки сигналів при виявленні малорозмірних і малоконтрастних рухомих об'єктів на неоднорідному тлі в зоні спостереження.

Очевидно, що результати моделювання, отримані для фрагмента зображення зони спостереження розміром 64×64 елемента, можуть бути екстрапольовані на більший формат зображення. Зокрема, ймовірність помилки першого роду (помилкове виявлення об'єкта) при аналізі повного кадру зображення зони спостереження може бути оцінена з допомогою наближеного виразу, аналогічного формулою (3.8):

$$P_{л.т}(T_K) = 1 - [1 - P_{л.т(64 \times 64)}]^K, \quad (3.8)$$

де K — число фрагментів, що містяться в повному кадрі зображення розміром $M \times N$ елементів, $K = (M \times N) / (4096)$;

$P_{л.т(64 \times 64)}$ — оцінка ймовірності помилкової тривоги, отримана в результаті моделювання фрагмента такого зображення.

На (рис. 3.2), як приклад, наведено залежності ймовірності правильного виявлення від величини середнього контрасту η зображення рухомого об'єкта розміром 4×4 елемента при різних швидкостях V^* його переміщення по діагоналі вгору та праворуч).

Зауважимо, що реальне значення оптичного контрасту зображення змінюється в залежності від поточного стану об'єкта на різних ділянках неоднорідного фону. При цьому, природно, змінюється і відношення сигнал/шум. Так, наприклад, при середньому значенні $\eta=6$ відношення сигнал/шум змінювалося в межах від 1,2 до 6,1 (з урахуванням заданих умов експерименту, які зумовлюють сумарний рівень шумів в вихідний відеосигнал).

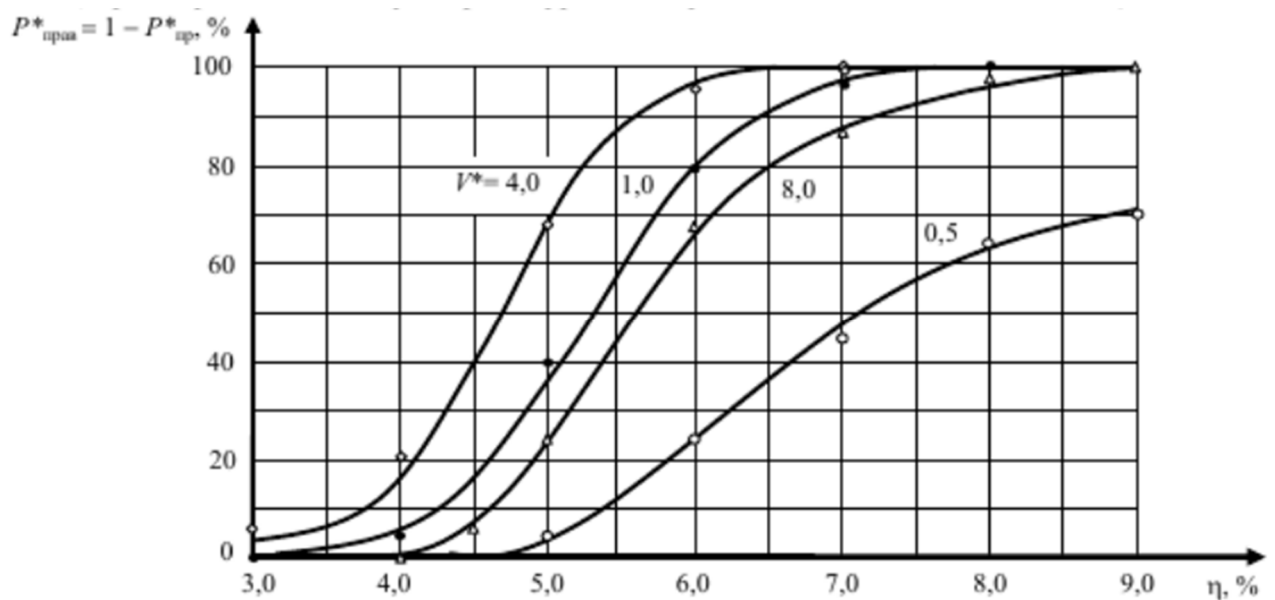


Рисунок 3.2 - Залежності ймовірності правильного виявлення від величини середнього контрасту η зображення рухомого об'єкта

Чисельне значення швидкості V^* переміщення об'єкта (у площині аналізу зображення) оцінювалося числом просторових періодів, відповідним переміщення зображення об'єкта за час ΔT_k . Кожна точка, показана на графіках, отримана в результаті статистичної обробки 350 реалізацій. При цьому задавалися параметри ($U_{\text{п}}/U_{\text{ш}} = 3$), при яких в рамках проведеного експерименту не спостерігалось поява помилок типу «помилкової тривоги» (див. рис. 3.1).

Зниження виявної здатності АСН при відносно малих швидкостях переміщення об'єкта ($V^* < 4$) пов'язане зі зменшенням розмірів області змін в кадрі, в межах якої можливе використання ефекту просторового накопичення сигналу відповідно до вирішального правила «р из q». Істотне поліпшення характеристик виявлення при малих швидкостях переміщення ($V^* < 1$) можливо шляхом збільшення інтервалу часу між двома кадрами: $\Delta T_k = nT_k$ при $n > 1$. При порівняно великій швидкості ($V^* = 8$) зниження виявної здатності АСН спостерігається через помітне зменшення реального часу накопичення сигналу рухомого об'єкта в елементах фотоприймача і, як наслідок, зменшення реального відношення сигнал/шум в різницевому сигналі (див. формулу (3.1)).

Наведені приклади відображають результати, отримані для певних приватних умов спостереження за об'єктами. Однак за цими результатами можна зробити висновок, що розглянутий алгоритм формування та обробки міжкадрового різницевого сигналу дозволяє при інтенсивному рівні перешкод домогтися надійного виявлення рухомих об'єктів, середній оптичний контраст яких становить одиниці відсотків щодо елементів навколишнього фону з розмірами, порівняними з розмірами об'єкта.

Використання віртуальної комп'ютерної моделі дозволяє на ранніх стадіях проектування АСН вирішувати завдання оптимізації параметрів використовуваного алгоритму та обґрунтування вимог до окремих ланок апаратної структури АСН, а також прогнозувати поведінку проектованої системи в заданих умовах спостереження за об'єктами.

Представлений алгоритм, міжкадрової обробки сигналів, полягає у формуванні МРС, в якому зосереджена вся інформація про зміни, що відбуваються в зображенні, відповідні всім об'єктам кадру і деталям фону що знаходяться в кадрі.

Після перетворення зображення в чисельне значення беремо середнє значення та середньоквадратичне відхилення розподілу температур по всьому кадру. Далі отримуємо різницю середніх значень і середньоквадратичних відхилень розподілу температур двох кадрів. Після чого стає можливим розрахувати зміни які відбуваються в кадрах, віднімаючи різниці середніх значень відхилень пари кадрів в певний момент часу та середніх значень наступних двох пар кадрів з потоку даних. Якщо аналіз не виявив перевищень порогового значення, алгоритм циклічно повторює процедуру до моменту перевищення порогового значення.

У разі виявлення перевищення порогового значення алгоритм запускає процес порівняння потоку кадрів та приймає одне з двох рішень:

– прийняття рішення про наявність або відсутність охороняемого об'єкта в зоні спостереження, на основі аналізу невеликого сегмента зображення, в якому МРС за абсолютною величиною перевищує встановлений поріг U_n ;

– якщо значення не перевищують встановленого порогу, то відбувається повернення до етапу обробки та порівняння зображень наступних кадрів.

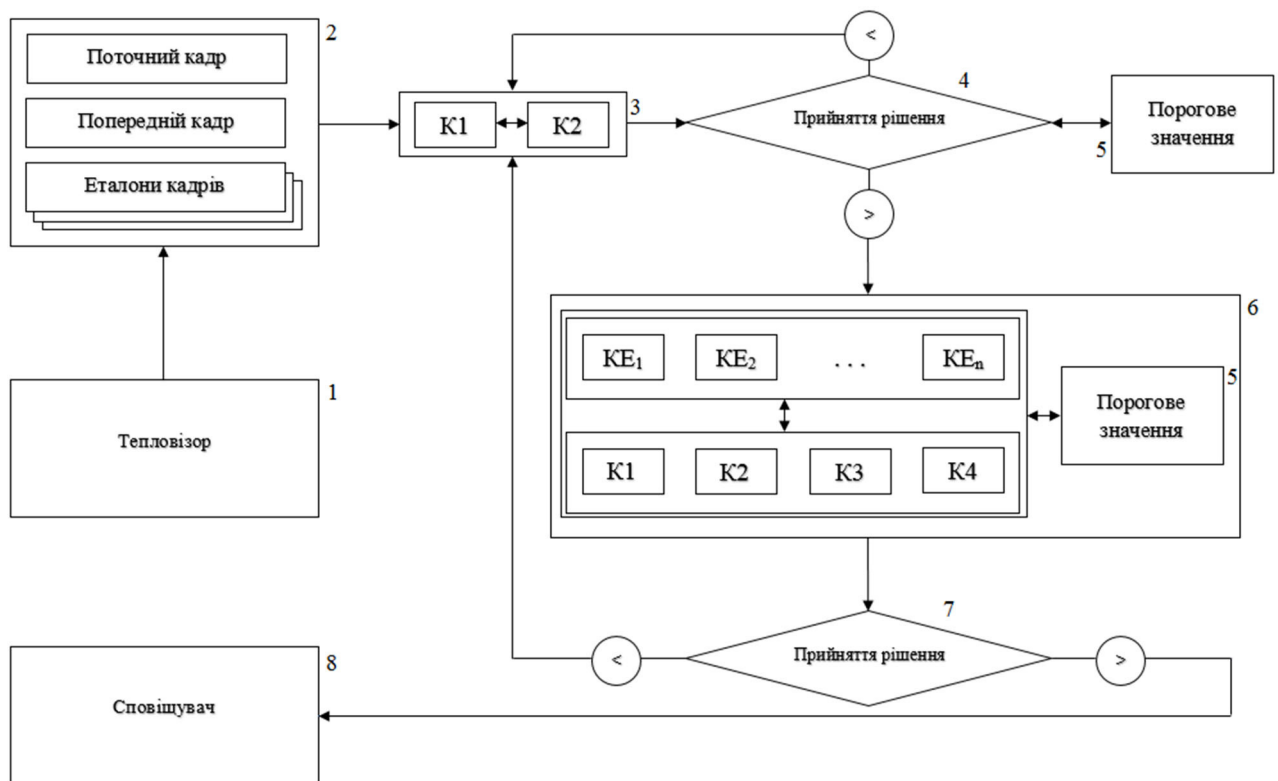


Рисунок 3.3 – Принцип роботи приладу на базі розробленого алгоритму

На рис. 3.3 – Наступні позначення:

Блок 1 – тепловізор – реєструє теплове випромінювання, що випромінюється об'єктами знаходяться в зоні, що охороняється;

Блок 2 – накопичувальний пристрій на якому зберігаються зразки (зображення в різних температурних умовах при відсутності об'єкту, що охороняється), необхідно в разі перевищення порогового значення сигналу що надходить на блок прийняття рішення про перевищення порога спрацьовування;

Блок 3 – порівняння двох останніх зображень знімаються тепловізором із заданим інтервалом. Порівнюються середні значення температур і середньоквадратичні відхилення;

Блок 4 – на підставі отриманих значень робиться висновок про перевищення або не перевищення граничного значення. Пороговий компаратор порівнює значення рівня поточного сигналу з пороговим значенням і в разі його перевищення видає імпульс на лічильник;

Блок 5 – поріг спрацьовування визначається інтервалом з яким знімаються зображення;

Блок 6 – у разі перевищення порогового значення проводиться порівняння ряду зображень одержуваних з тепловізора та шаблонних кадрів. Сповіщувач видає сигнал тривоги, як правило, по 5-7 імпульсам. Якщо після першого імпульсу кількість імпульсів не досягає цього значення, то лічильник скидається, і рахунок починається заново;

Блок 7 – визначається відповідність або невідповідність шаблонним кадрам, приймається рішення про передачу сигналу на пристрій сповіщення, або повернення до роботи блоку №3;

Блок 8 – засіб сповіщення, відсилає сигнал тривоги.

4 ТИПИ КОНСТРУКЦІЙ ІЧ ДЕТЕКТОРІВ

У тепловізійних приладах в даний час можуть застосовуватися найрізноманітніші приймальні пристрої. На сьогодні досить чітко визначилися такі класи приймальних пристроїв: фотонні і теплові.

Фотонні приймачі випромінювання забезпечують перетворення падаючого потоку фотонів в електричний сигнал за рахунок безпосередньої взаємодії фотонів з електронною підсистемою матеріалу приймача. Чутливі елементи складаються з напівпровідників різних типів, а так само можуть включати в свою структуру різні метали, принцип їх роботи заснований на поглинанні фотонів носіями заряду, в результаті чого змінюються електричні параметри чутливої області, а саме: зміна опору, виникнення різниці потенціалів, фотоструму

та ін. Дані зміни можуть бути зареєстровані вимірюють схемами, сформованими на підкладці, де розташований сам сенсор. Сенсори мають високу чутливість і високою швидкістю відгуку.

Теплові приймачі, поглинаючи потік фотонів, змінюють температуру чутливого елемента, яка, в свою чергу, викликає вторинні зміни у приймачі: змінюється електропровідність матеріалу або його поляризація. У кожному класі приймачів існують численні групи, що розрізняються типом матеріалу, конфігурацією і загальним числом елементів, робочою температурою і типом охолоджувача і т.д. ІЧ випромінювання поглинається чутливою частиною сенсора, нагріваючи її до деякої температури, що призводить до зміни фізичних параметрів. Дані відхилення які можуть бути зареєстровані вимірюють схемами, виконаними безпосередньо на одній підкладці з фоточутливою областю. Описані вище типи датчиків мають високу інерційність, значний час відгуку і відносно низьку чутливість, в порівнянні з фотонними детекторами.

Принцип роботи термоелементів заснований на використанні термоелектричного ефекту Зеебека, який полягає в появі електрорушійної сили

(термо-ЕРС) в ланцюзі, що складається з двох різнорідних за складом провідників, за умови, що між двома їх спаями є різниця температур, тобто контактні різниці потенціалів на кожному спаї різні. Падіння напруги на опорі навантаження R вимірюється у зовнішньому ланцюзі. Зазвичай опір термоелемента дуже малий, що обумовлює необхідність застосування трансформаторного входу в якості узгоджувальної ланки між ПВІ і підсилювачем, а це ускладнює конструкцію приладу. До недоліків термоелементів слід також віднести їх велику інерційність (постійна часу складає десятки і сотні мілісекунд).

Теоретичне значення визначальної здатності для теплових детекторів, мають набагато меншу температурну залежність, ніж для фотонних детекторів. При температурі нижче 50 К і нульовому тлі теплові детектори LWIR характеризуються більш низькими значеннями D^* , ніж фотонні. Проте, при температурах вище 60 К межі показують переваги теплових детекторів. При кімнатній температурі визначальна здатність теплових детекторів набагато краще, ніж у фотонних детекторів LWIR. Цікаво відзначити, що теоретичні криві D^* для фотонних і теплових детекторів показують, що аналогічні основні обмеження спостерігаються при 32 низьких температурах. Подібні міркування були проведені для детекторів наддовгохвильового інфрачервоного випромінювання (VLWIR), що працюють в далекому спектральному діапазоні. Результати розрахунків показують, що детектори, що працюють в цьому діапазоні, - це криогенні Si і Ge із зовнішньою фотопровідністю і криогенні теплові детектори, тобто звичайні болометри.

За типом використовуваного напівпровідника датчики поділяються на:

- Власний (нелегований напівпровідник з однаковою концентрацією дірок та електронів).
- Домішковий (легований напівпровідник n- або p-типу).

Основним матеріалом всіх фоточутливих сенсорів є кремній або германій, які можуть бути леговані різними домішками бору, миш'яку, галію та ін. Домішкових фоточутливий датчик схожий з власним детектором, з тією лише

різницею що носії з донорних і акцепторних рівнів можуть переміщатися в зону провідності долаючи понад низький енергетичний бар'єр, внаслідок чого даний детектор може працювати з більш короткими довжинами хвиль, ніж власний.

4.1 Фотовольтанічні детектори.

Під впливом інфрачервоного випромінювання в електронно-діркового переходу виникає фотовольтанічний ефект: фотони з енергією, що перевищує ширину забороненої зони, поглинаються електронами, в результаті чого вони займають місця в зоні провідності, сприяючи тим самим виникненню фотоструму. Детектор може бути виконаний на основі як домішкового так і власного напівпровідника.

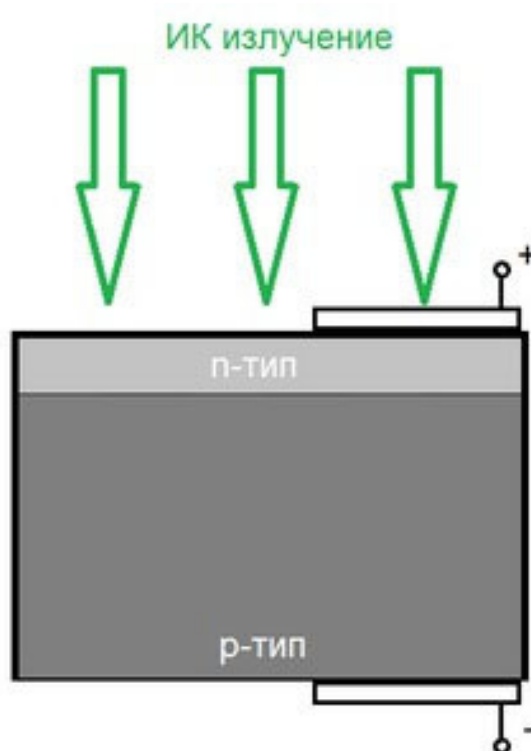


Рисунок 4.1 – Схема конструкції фотовольтанічного приймача

4.2 Фоторезистивні детектори.

Чутливим елементом сенсора є напівпровідник, принцип роботи даного датчика заснований на ефекті зміни опору провідного матеріалу під впливом ІК випромінювання. Вільні носії заряду, що генеруються фотонами в чутливій області, призводять до зменшення її опору. Сенсор може бути виконаний на основі як домішкового так і власного напівпровідника.

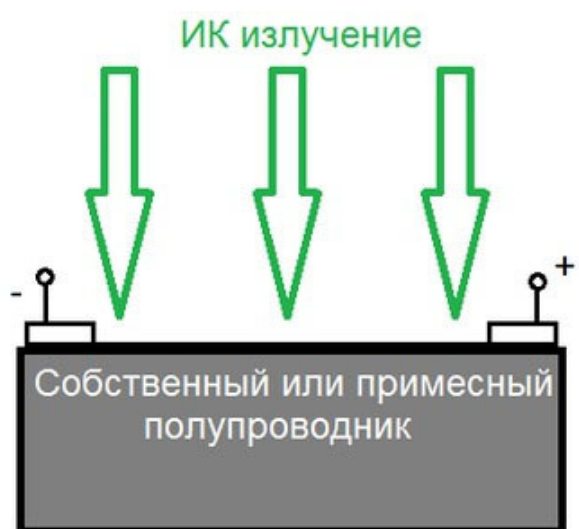


Рисунок 4.2 – Схема конструкції фоторезистивного приймача

4.3 Фотоемісійні детектори.

Цей тип також можна називати «детектор на вільних носіях» або на бар'єрі Шотткію. Щоб позбутися від необхідності глибокого охолодження домішкових напівпровідників, і в деяких випадках досягти чутливості в більш довгохвильовому діапазоні, існує такий тип детекторів, що називаються фотоемісійними. У датчиках даного типу металева або метало-кремнієва структура покриває домішковий кремній. Вільний електрон, який утворюється в результаті взаємодії з фотоном, потрапляє з провідника в кремній. Перевагою

такого детектора є відсутність залежності відгуку від характеристик напівпровідника.

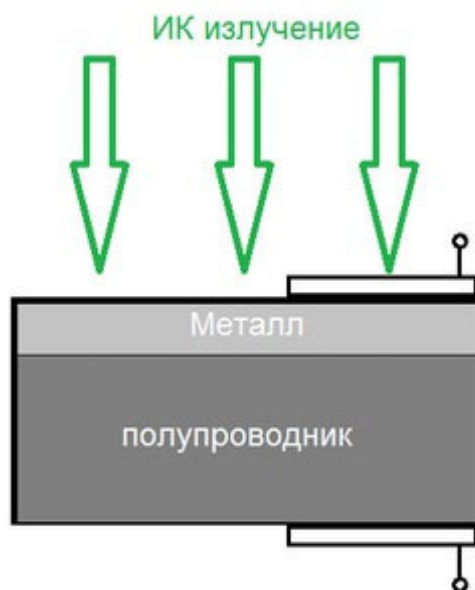


Рисунок 4.3 – Схема конструкції фотоемісійного приймача

4.4 Фотодетектори на квантовій ямі.

Принцип дії схожий з домішковими детекторами, в яких домішки використовуються для зміни структури забороненої зони. Але в даному типі детектора домішки сконцентровані в мікроскопічних областях де ширина забороненої зони значно звужена. Утворена таким чином «яма» називається квантовою. Реєстрація фотонів відбувається, за рахунок поглинання і освіти зарядів в квантовій ямі, які потім витягуються полем в іншу область. Такий детектор більш чутливі у порівнянні з іншими типами, так як ціла квантова яма - це не окремий атом домішки, а від десяти до ста атомів на одиницю площі. Завдяки цьому можна говорити про досить високу ефективної площі поглинання.

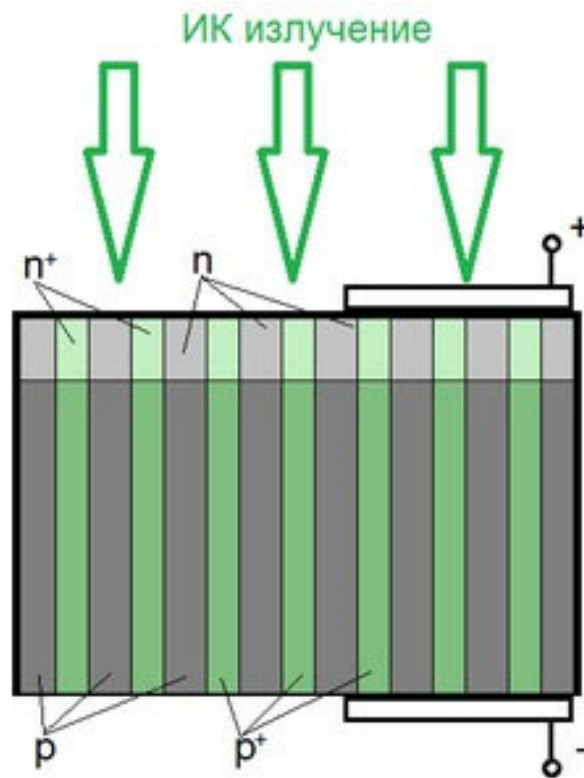


Рисунок 4.4 – Схема конструкції фотодетектора на квантовій ямі

4.5 Термопари.

Основним елементом даного пристрою є контактна пара двох металів з різною роботою виходу, в результаті чого на межі виникає різниця потенціалів. Ця напруга є пропорційною температурі контакту.

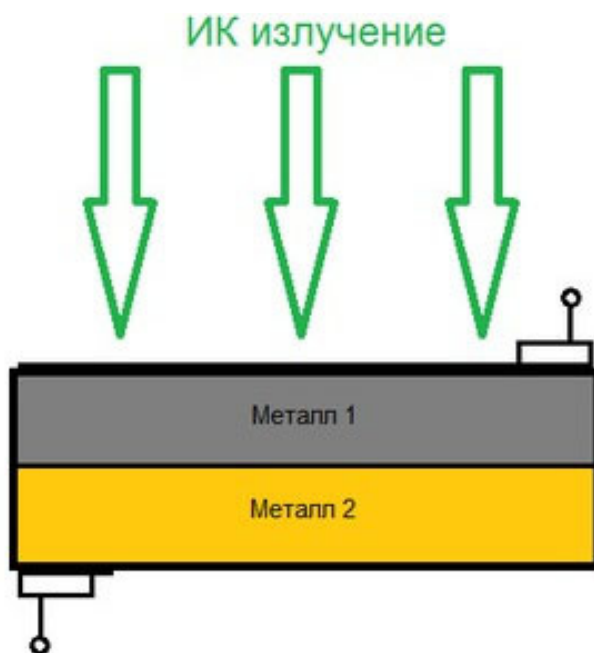


Рисунок 4.5 – Схема конструкції термопарного приймача

4.6 Піроелектричні приймачі

Піроелектричні детектори виготовлені з використанням піроелектричних матеріалів і принцип роботи їх заснований на виникненні заряду в піроелектрику при проходженні через нього теплового потоку.

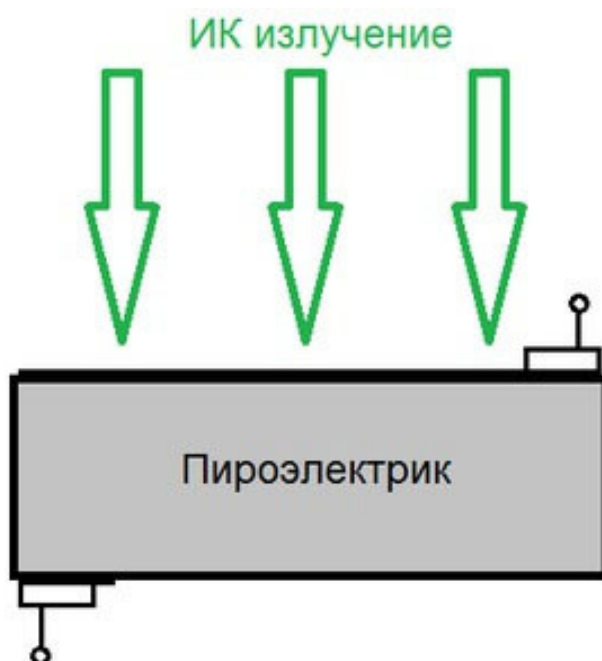


Рисунок 4.6 – Схема конструкції піроелектричного приймача

4.7 Мікробалкові приймачі.

Складається з мікробалки і провідної підстави, які виконують роль обкладок конденсатора, мікробалка сформована з двох щільно з'єднаних металевих частин, що мають різні коефіцієнти теплового розширення. При нагріванні балка згинається і змінює ємність структури.

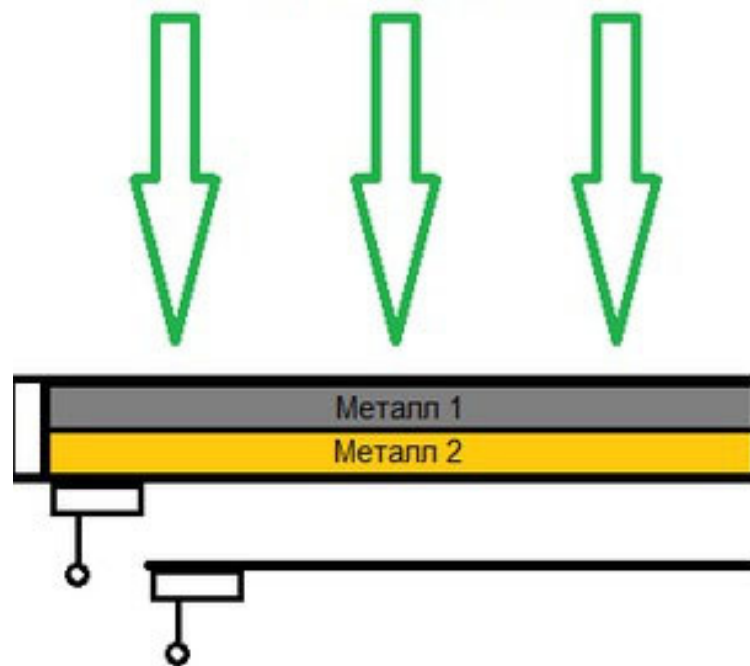


Рисунок 4.7 – Схема конструкції мікробалкового приймача

4.8 Болметри (терморезистори).

Складаються з терморезистивного матеріалу. В основі принципу роботи даного сенсора є поглинання ІЧ випромінювання матеріалом чутливого елемента, що призводить до збільшення його температури, що в свою чергу викликає зміну електричного опору. Є два шляхи зняття інформації: вимір струму, що протікає в чутливій області, при постійній напрузі і вимір напруги при постійному струмі.

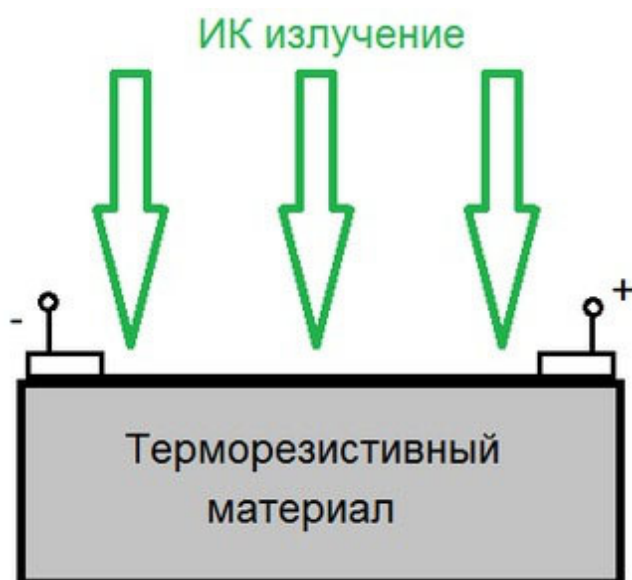


Рисунок 4.8 – Схема конструкції терморезистивного приймача

4.9 Характеристики фотоприймачів.

Щоб порівняти різні типи фотоприймачів слід користуватися їх найважливішими характеристиками, що приведені нижче.

Чутливість – відношення зміни електричної величини на виході приймача випромінювання, викликаного падаючим на нього випромінюванням, до кількісної характеристики цього випромінювання. В / лк-с.

Інтегральна чутливість – чутливість до немонохроматичним випромінювання заданого спектрального складу. Вимірюється в А / лм.

Спектральна чутливість – залежність чутливості від довжини хвилі випромінювання.

Визначальна здатність – величина зворотна величині мінімального потоку випромінювання, який викликає на виході сигнал, рівний власному шуму. Вона обернено пропорційна квадратному кореню з площі приймача випромінювання, вимірюється в 1 / Вт.

Питома визначальна здатність – визначальна здатність помножена на корінь квадратний з добутку смуги частот в 1 Гц і площа в 1 см². Вимірюється в см · Гц^{1/2} / Вт.

Час відгуку – час, необхідний для встановлення сигналу на виході, відповідного вхідного впливу. Вимірюється в мілісекундах.

Робоча температура – максимальна температура сенсора і навколишнього середовища, при якій сенсор має можливість правильно виконувати свої функції, вимірюється в °С.

Таблиця 1 – Порівняння типів приймачів за параметрами.

Параметр	Фотонний детектор	Тепловий детектор
Чутливість	Висока	Низька
Інтегральна чутливість	Середня	Висока
Спектральна чутливість	Вузька та відбіркова	Широка та однорідна
Час відгуку	Малий	Значний
Робоча температура	Кріогенна	Кімнатна
Вартість	Висока	Низька
Інші вимоги	Система охолодження	Затвор

4.10 Внутрішні шуми в ІЧ фотоприймачах.

Серед важливих параметрів фотоприймачів можна виділити значення їх внутрішніх шумів та їх типи відповідно до конструкції детектора.

Для фотонних приймачів домінують такі типи внутрішніх шумів: тепловий, дробовий, генераційно-рекомбінаційний, геометричний (просторовий), надлишковий (флікер-шум, або 1 / f), kTC-шум. Проаналізуємо ці шуми.

Тепловий шум спостерігається у всіх напівпровідниках, навіть при відсутності електричного зміщення, і обумовлений хаотичним тепловим рухом вільних носіїв заряду без зміни їх кількості. Внаслідок випадкового розподілу теплової швидкості носіїв заряду в напівпровіднику порушується локальна електронейтральність і виникають локальні електричні поля, подальша релаксація яких визначається максвеллівською постійною часу релаксації матеріалу $\tau_M = \epsilon\epsilon_0\rho$ (ρ – удельное сопротивление). Це спричиняє появу елементарних імпульсів струму (флуктуацій). Усереднення статистично незалежних елементарних флуктуацій визначає появу певного шумового струму в напівпровіднику (або шумової напруги на його клеммах). Оскільки середній квадрат швидкості носія заряду пропорційний абсолютній температурі, то шумовий струм також пропорційний температурі. Явище теплового шумового струму аналогічно броунівському руху, статистичні властивості якого описав Ейнштейн під час розгляду випадкового блукання частинки. Середній квадрат переміщення броунівської частинки пропорційний часу спостереження.

кТС-шум є різновидом теплового шуму, характерного для чутливих елементів фотоприймачів, в яких інформаційний заряд реєструється, як зміна напруги на ємності C , яка періодично заряджається за допомогою певного ключа до потенціалу U (або заряду CU). Еквівалентна схема для опису процесів в чутливому елементі приведена на рис. 8. Прикладом таких приймачів є фоточутливі елементи матричних приймачів, так звані МДП-фотодіоди.

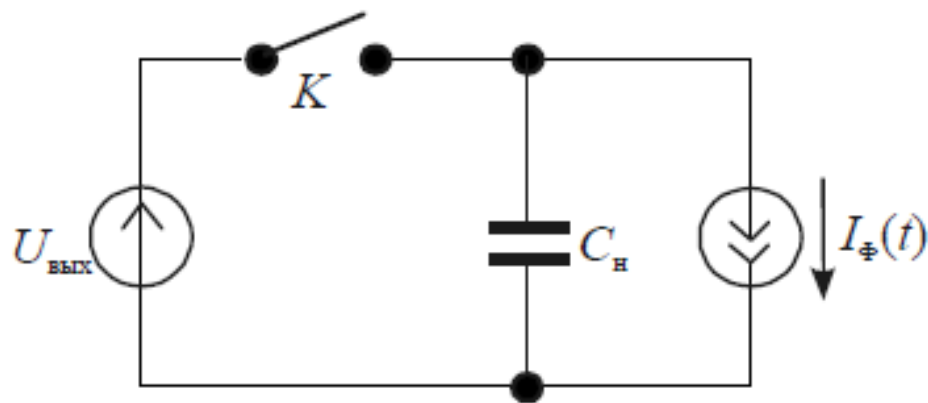


Рисунок 4.9 – Еквівалентна схема визначення kTC -шуму

Дробовий шум характерний для потоків дискретних частинок і є випадковим і незалежним процесом, тобто марковским потоком, описуваних розподілом Пуассона. Прикладами процесів, в яких проявляється дробовий шум, є випромінювання абсолютно чорного тіла, ток носіїв заряду в р-п-переходах, теплова генерація носіїв заряду, струм термоелектронної емісії. Вперше дробовий шум описав Шоттки для струму термоелектронної емісії.

Генераційно-рекомбінаційний шум обумовлений флуктуаціями швидкостей теплової генерації і рекомбінації вільних носіїв заряду в напівпровіднику, тобто флуктуаціями середньої концентрації носіїв заряду, що визначає провідність зразка (опір). Тому цей тип шуму проявляється тільки під час проходження струму через зразок.

Ще одним типом шумів, що можна виявити в фотоприймачах і інших електронних компонентах при наявності електричного зміщення, є шум, для якого спектральна щільність обернено пропорційна частоті. Цей шум проявляється на низьких частотах, до частот порядку 1 кГц, і домінує над іншими типами шумів. Нижню межу частотного діапазону шуму $1/f$ визначити сьогодні ще не вдалося, хоча експерименти проводили до частот порядку 10-5 Гц. Теоретично, якщо немає такої межі, то потужність шуму $1/f$ стає безмежною. Шум $1/f$ досліджують вже багато років, проте фундаментальні причини його виникнення остаточно не з'ясовані. Одну з найвідоміших

закономірностей для шуму $1/f$ встановили під час досліджень металевих плівок. Це так званий емпіричний закон Хуга, згідно з яким спектральна щільність шуму типу $1/f$ обернено пропорційна кількості носіїв заряду в зразку. Крім того, спектральна щільність шуму $1/f$ (як і генераційно-рекомбінаційного) пропорційна квадрату струму, що протікає в зразку. Це свідчить про те, що струм тільки виявляє даний шум, але не є його джерелом (причиною).

Геометричний (просторовий) шум притаманний багатоеlementним приймачам (лінійчатим або матричним) і обумовлений неоднорідністю параметрів окремих чутливих елементів (наприклад, спектральні параметри, чутливість, геометричні розміри, шумові параметри, напруга зсуву, температура і т.п.).

У матричних приймачах (без зовнішнього сканування) такий шум проявляється у вигляді незмінного від кадру до кадру двовимірного розподілу яскравості елементів зображення на моніторі, що відповідає певним пікселям приймача. У лінійчатих приймачах (з зовнішнім скануванням зображення) геометричний шум проявляється в неоднорідній яскравості рядків. Цей шум може домінувати в багатоеlementних приймачах, обумовлюючи значне спотворення зображення, навіть до такої міри, що його неможливо буде розпізнати.

Для вирівнювання сигналів на виході окремих каналів системи спостереження використовуються різні схеми корекції сигналів. Одним з таких методів є так звана двоточкова корекція, суть якої полягає в порівнянні сигналів окремих пікселів, отриманих від двох опорних випромінювачів. Оскільки під час повторного опитування пікселів багатоеlementного приймача при аналогічних умовах (аналогічний порядок, однакові частоти сканування, температура, фон) реалізації повторюються, то геометричний шум в певному сенсі схожий на кТС-шум, значення якого постійне в період між вибірками. Тому засоби боротьби з цим шумом аналогічні – запам'ятовування сигналів і їх віднімання. Таким чином, теоретично від геометричного шуму можна

позбутися, хоча при великій кількості пікселів в сучасних багатоелементних приймачах ця процедура досить складна.

Для розрахунку сумарного шуму приймається, що окремі типи шумів є незалежними, тому загальний струм шуму визначається по формулі (4.1)

$$I_{\Sigma\text{Ш}} = \sqrt{I_{\text{ТШ}}^2 + I_{\text{ГРШ}}^2 + I_{1/f\text{Ш}}^2 + I_{\text{ДШ}}^2 + \dots}, \quad (4.1)$$

Де наявність тих чи інших складових, що відповідають окремим типам шумів, визначається конкретним типом приймача.

На рис. 4.10 схематично показані внески різних типів шумів в фоторезистивні приймачі в залежності від частоти сигналу. Як видно з рисунка, в залежності від частотного діапазону домінує той чи інший вид шуму.

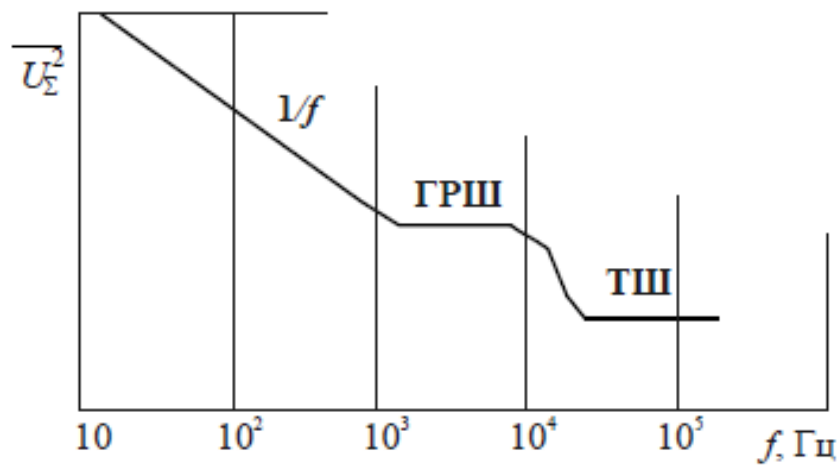
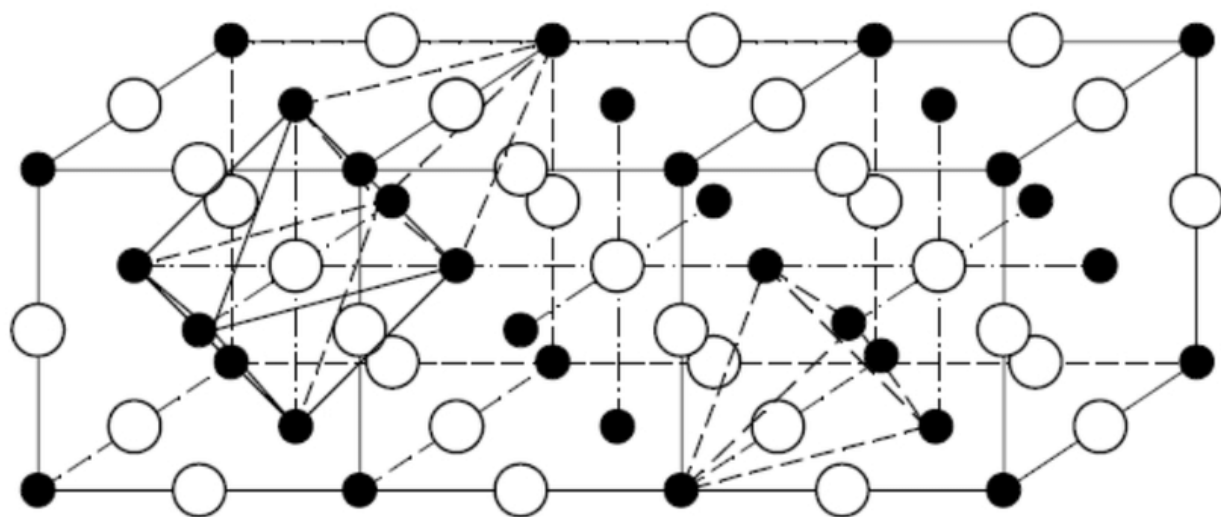


Рисунок 4.10 – Відносні частки різних шумів фоторезистивного приймача

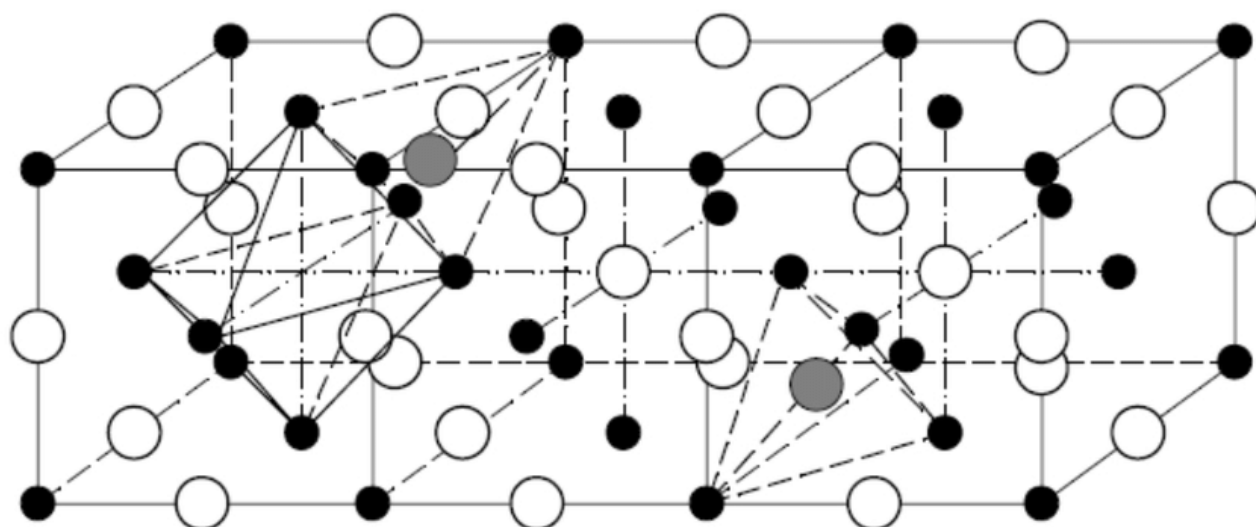
5 МАТЕРІАЛИ В НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЙМАЧАХ ІЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Після огляду багатьох конструкцій ІЧ фотоприймачів слід більш детально дослідити напівпровідникові приймачі, що використовують фотоелектричні властивості матеріалів і на сьогодні

Сьогодні серед фахівців в області напівпровідникових фотоприймачів прийнято їх ділити на детектори першого, другого і третього покоління. Характерним для всіх розробок було те, що спочатку вони велися в інтересах військових застосувань. Приймачі першого покоління (середина 30-70-х рр. Минулого століття) в своєму розвитку пройшли шлях від найпростіших одноелементних приймачів до малоелементних лінійок і матриць (як правило, спочатку розроблялися фоторезистори і пізніше фотодіоди). Історично першими такими фотоприймачами, які отримали згодом широке промислове виробництво, були фоторезистори на основі PbS з областю чутливості 1-3 мкм, виготовлені в Німеччині (Берлінський університет) ще в 1933 р Кутцшером (E.W. Kutzscher) на основі природного мінералу - галеніту. У наступне десятиліття німецькими вченими була розроблена технологія отримання фоточутливих полікристалічних шарів PbS(рис 5.1), на основі яких розпочато промислове виробництво фоторезисторів спочатку в Німеччині (1943 р, лабораторія м Кіля), а потім в США (1944 р, Північнозахідний університет) і Великобританії (1945, Адміралтейська дослідницька лабораторія). У Німеччині в цей же час також були розроблені і перші головки наведення ракет на основі фоторезисторів PbS (завод «Karl Zeiss»). Надалі полікристалічні фоторезистори були створені на PbSe для середнього інфрачервоного (ІЧ) діапазону спектра, а також на CdS і CdSe для видимого та ближнього інфрачервоного діапазону спектра відповідно.



B1-type cubic (space group $Fm\bar{3}m$) structure of PbS



Model of cubic (space group $Fm\bar{3}m$) structure of PbS nanofilm



Рисунок 5.1 – Модель кристалічної ґратки сполуки PbS

Взагалі 1940-1950-і рр. виявилися надзвичайно плідними для розробок основних типів фотоприймачів на різних напівпровідникових матеріалах для основних областей спектра оптичного випромінювання. У 1948 р Дж. Шайв

розробив перший германієвий фотодіод, а перший кремнієвий фотодіод був створений в 1954 році, і Si стає основним матеріалом напівпровідникової фотоелектроніки видимого діапазону спектра.

Кристалічна решітка кремнію кубічна гранецентрована типу алмаза, параметр $a = 0,357$ нм (при високому тиску отримані й інші поліморфні модифікації кремнію), але через більшої довжини зв'язку між атомами Si-Si в порівнянні з довжиною зв'язку C-C твердість кремнію значно менше, ніж алмазу. Має об'ємну структуру. Ядра атомів разом з електронами на внутрішніх оболонках мають позитивним зарядом 4, який врівноважується негативними зарядами чотирьох електронів на зовнішній оболонці. Разом з електронами сусідніх атомів вони утворюють ковалентні зв'язки на кристалічній решітці. Таким чином, на зовнішній оболонці знаходяться чотири своїх електрона і чотири електрона, запозичені у чотирьох сусідніх атомів. При температурі абсолютного нуля всі електрони зовнішніх оболонок беруть участь в ковалентних зв'язках. При цьому кремній є ідеальним ізолятором, так як не має вільних електронів, що створюють провідність.

Елементарний кремній в монокристалічній формі є непрямозонним напівпровідником. Ширина забороненої зони при кімнатній температурі становить 1,12 еВ, а при $T = 0$ К - 1,21 еВ. Концентрація власних носіїв заряду в кремнії при нормальних умовах становить близько $1,5 \cdot 10^{10}$ см⁻³ (рис. 5.2).

На електрофізичні властивості кристалічного кремнію великий вплив мають домішки, що містяться в ньому. Для отримання кристалів кремнію з дірковою провідністю в кремній вводять атоми елементів III групи, таких, як бор, алюміній, галій, індій. Для отримання кристалів кремнію з електронною провідністю в кремній вводять атоми елементів V групи, таких, як фосфор, миш'як, сурма.

При створенні електронних приладів на основі кремнію використовується переважно приповерхневий шар монокристалу (товщиною до десятків мкм), тому якість поверхні кристала може робити істотний вплив на електрофізичні властивості кремнію і, відповідно, на властивості створеного електронного

приладу. При створенні деяких приладів використовується технологія, що модифікує поверхню монокристала, наприклад, обробка поверхні кремнію різними хімічними реагентами та її опромінення.

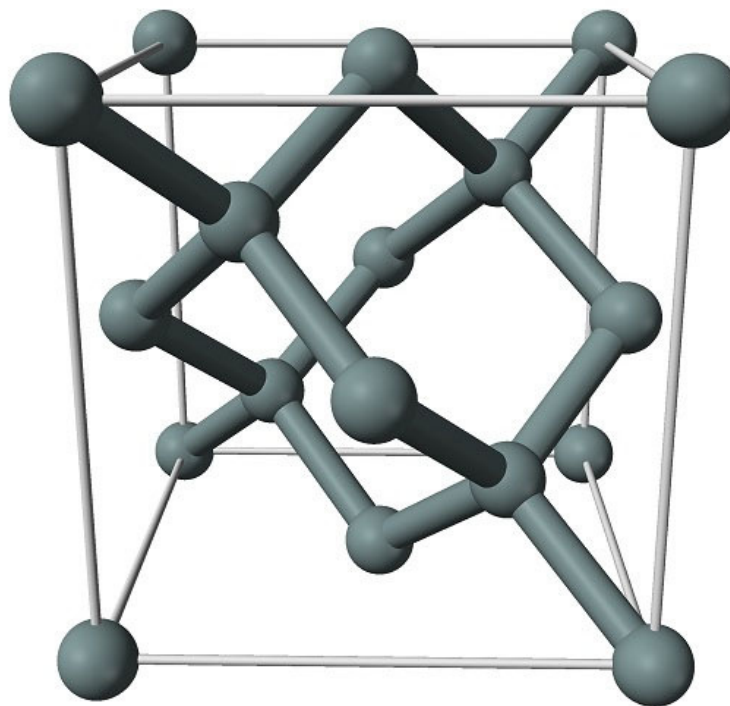


Рисунок 5.2 – Кристалічна ґратка кремнію.

На початку 1950-х рр. з'явилися домішкові фоторезистори на германії, що дають можливість роботи в далекій ІЧ-області спектра (робота таких фоторезисторів заснована на ефекті домішкової фотопровідності). Зокрема Ge, легований Hg, забезпечував чутливість в діапазоні 8-14 мкм, важливому для теплового бачення об'єктів кімнатної температури, для яких максимум випромінювальної здатності знаходиться при довжині хвилі ~ 10 мкм. Власне на цих приймачах і були створені перші фокальні фотоприймальні пристрої для тепловізійних систем, проте недоліком таких приймачів була необхідність забезпечення їх глибокого охолодження (нижче температури рідкого азоту). В подальшому (в 1960-х рр.) Домішкові фоторезистори були створені і на легovanому кремнії, зокрема на Si, легovanому In і Ga з областю чутливості до 8

і 18 мкм відповідно. У 1950-х рр. було створено власні фоторезистори і фотодіоди на єдиному на той момент вузькозонному матеріалі InSb для середнього ІЧ-діапазону 3-5 мкм, а також фотодіоди на InAs з чутливістю до 3,5 мкм. Крім того, були створені швидкодіючі фотодіоди на твердому розчині $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, які згодом знайшли широке застосування в волоконно-оптичних лініях зв'язку, що працюють в діапазоні 1,3-1,55 мкм, і різних тепловізійних системах, оскільки такі фотодіоди мали значно менші темнові струми, ніж германієві.

Більшість з'єднань АІІВV, включаючи арсенід галію, кристалізуються зі структурою цинкової обманки. Елементарна комірка такої структури містить два атоми А і В, і повторюється в просторі так, що кожен компонент утворює гранецентрированну кубічні грати. Структуру в разі GaAs можна уявити як взаємно проникають гранецентровані грати атомів Ga і As, зрушені один щодо одного на чверть головною діагоналі (рис.5.3).

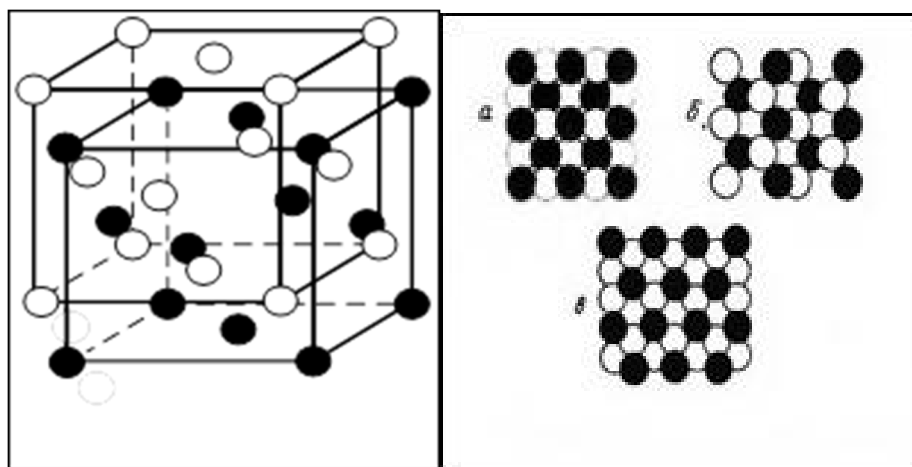


Рисунок 5.3 – Модель кристалічної ґратки GaAs.

Три основні кристалічні площини решітки GaAs показані на рис. 2. Кожен атом As на поверхні (100) має дві зв'язку з атомами Ga з лежачого нижче шару. Дві інші зв'язку вільні. Площина (110) містить однакову кількість атомів Ga і As. Кожен атом має одну зв'язок з нижнім шаром. Атоми на поверхні (111) мають по три зв'язку з атомами Ga з нижчого шару. Четверта зв'язок вільна.

Відстань між найближчими сусідніми атомами становить 0,244 нм і дорівнює сумі атомних радіусів As (0,118 нм) і Ga (0,126 нм). Постійна решітки становить 0,565 нм.

Внаслідок часткової іонної зв'язку в GaAs сильніше, ніж гомополярні зв'язку в Si або Ge. Це призводить до меншій амплітуді коливань решітки (і, як наслідок, до більшої рухливості), більш високій точці плавлення і більш широкою забороненою зоною.

Ця різниця в хімічних зв'язках яскраво проявляється при сколюванні кристалів. У алмазу, наприклад, кристали сколюються головним чином уздовж площин $\{111\}$. Як показано вище, в GaAs прилеглі площини $\{111\}$ утворені різними атомами (площину атомів галію і площину атомів миш'яку). Електростатичне взаємодія між цими площинами ускладнює сколювання. Кристали GaAs легко сколюються уздовж площин $\{110\}$, які містять однакове число атомів галію і миш'яку.

Істотні відмінності GaAs від Si полягають у характерній залежності енергії зон провідності від хвильового вектора. Через більшу ширину забороненої зони власна концентрація електронів і дірок в GaAs менше, ніж в Si, тому GaAs може мати дуже високі значення питомого опору. Це дозволяє використовувати такий матеріал в якості діелектрика в ІС, призначених для роботи в сантиметровому і міліметровому діапазонах довжин хвиль, і для ізоляції структур в цифрових ІС.

Також більша ширина забороненої зони дозволяє створювати прилади, працездатні при більш високих температурах, ніж кремнієві.

Найважливішим із властивостей матеріалу є висока (в шість разів більша, ніж в кремнії) рухливість електронів в електричних полях низької напруженості, що потенційно дозволяє створити СВЧ прилади з поліпшеними характеристиками. Мала величина часу життя неосновних носіїв більша ніж у кремнію, а ширина забороненої зони робить GaAs більш перспективним матеріалом для створення радіаційно-стійких приладів і інтегральних схем (ІС). Пластини GaAs можуть мати дуже високі значення питомого опору.

Для створення гетероструктур матеріалів АІІВV на підкладках GaAs, призначених для виготовлення високоякісних приладів, були розроблені складні методи вирощування епітаксціальних плівок. Оптичні властивості таких гетероструктур відкривають перспективи створення на одному кристалі GaAs елементів цифрових, надвисокочастотних і оптичних пристроїв.

Однак є причини, що ускладнюють практичну реалізацію тих переваг, які може дати застосування GaAs в технології мікроелектроніки. Певний недолік арсеніду галію полягає в тому, що він є двокомпонентним з'єднанням. У зв'язку з цим доводиться знижувати максимальні температури під час технологічних процесів, запобігаючи тим самим дисоціацію складу поверхні структур. Легування за допомогою процесу дифузії, що знайшло широке застосування при виробництві кремнієвих приладів, виявилось практично неприйнятним при переході до GaAs. У арсеніду галію не існує стабільного природно оксиду, що легко формується можливість отримання якого у кремнію стала важливим фактором при створенні технології виробництва кремнієвих МОП (метал-оксид-провідник) транзисторів. Поверхня GaAs більш сприйнятлива до дії різних хімічних речовин, які використовуються в технологічних процесах, що вимагає в ряді випадків розробки нового підходу до реалізації цих процесів. Крім того, GaAs досить крихкий матеріал і схильний до руйнування при технологічній обробці.

Практично одночасно, в 1959 р в Англії (Royal Radar Establishment) та в 1960 років народження в СРСР (Львівський педагогічний інститут), був відкритий новий вузькозонний напівпровідник - твердий розчин $Cd_xHg_{1-x}Te$, що поклав початок нового етапу в розвитку фотоелектроніки інфрачервоного діапазону спектра. У $Cd_xHg_{1-x}Te$ ширина забороненої зони залежить від складу (x - молярна частка CdTe), тому, вибираючи певний склад, можна отримати матеріал, чутливий у всіх основних ділянках ІК-області спектра. Наприклад, склади порядку 0,21; 0,3 і 0,6 відповідають областям чутливості 8-12, 3-5 і 1-3 мкм відповідно. Іншою особливістю $Cd_xHg_{1-x}Te$ є те, що завдяки особливій зонній структурі, він забезпечує отримання потенційно кращих

фотоелектричних параметрів (відношення сигнал / шум) серед всіх відомих напівпровідникових матеріалів. $Cd_xHg_{1-x}Te$ стає основним матеріалом ІК-фотоелектроніки і, на думку фахівців, збереже цей статус ще на найближчі десятиліття. Але, мабуть, найголовніше те що фотоприймачі діапазону 8-12 мкм на основі $Cd_xHg_{1-x}Te$ працювали при температурі 77 До на відміну від домішкових фоторезисторів на основі легovanого Ge.

Для більшості фоторезисторів на основі HgCdTe використовується об'ємний матеріал, вироблений методом Бриджмена або метод твердої рекристалізації, в даний час застосовується матеріал, виготовлений з методів газо- і рідиннофазної емісії: РФЕ, МОСГФЕ і МЛЕ(рис.5.4).

Протягом наступних з початку розвитку років технологія виготовлення ОМ КРТ перетерпіла ряд важливих змін. Була розроблена і освоєна технологія вирощування МК з двофазної суміші і впроваджено легування монокристалів Індієм. Перший захід забезпечував більш високу однорідність складу і властивостей МК по пластині, збільшував вихід придатних пластин. Легування індієм вирішило проблему стабільності ОМ КРТ, підвищило однорідність електрофізичних і фотоелектричних властивостей, а також підвищило вихід придатних пластин. Зміни технології отримання ОМ КРТ неминуче приводили до змін технології виготовлення фотоприймачів. Головним напрямком в розробці фотоприймачів для теплобачення було створення фоторезисторів з ОМ КРТ на діапазон 8 - 14 мкм. До сьогоднішнього дня фоторезистори з КРТ є основними сенсорами в різних видах тепловізійної техніки.

Фоторезистор з КРТ здатний використовувати більшу частину випромінювання в атмосферному вікні (8 - 14 мкм), так як максимум спектральної чутливості може набувати залежно від складу КРТ будь-які значення в вікні 8 - 14 мкм практично без погіршення виявної здатності.

Фоторезистори з ОМ КРТ, що використовуюються в даний час, набули характеристик, близьких до теоретичної межі (обмеження фоном).

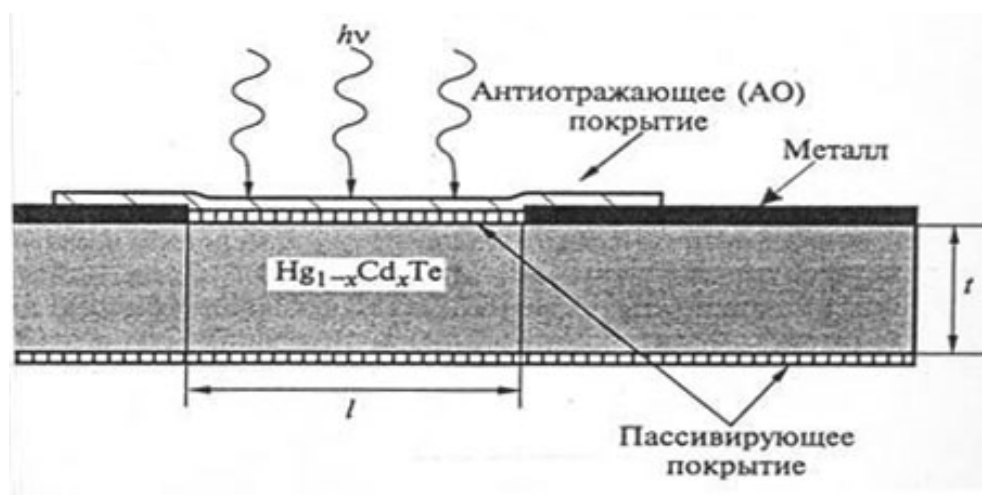


Рисунок 5.4 – Поперечний зріз типового HgCdTe фоторезистора

Однак $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ виявився і найскладнішим для дослідників з усіх відомих напівпровідників. На розробку технології отримання $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, дослідження і створення приладів були витрачені величезні фінансові ресурси та інтелектуальний потенціал у всіх найбільш технічно розвинених країнах (США, Франція, Англія, СРСР, Німеччина), і сьогодні це один з найдорожчих напівпровідникових матеріалів. Перші фоторезистори на основі $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ були створені в 1964 р (Texas Instruments, США), а перші фотодіоди (CRNS, Франція) - в 1965 р. Однак спочатку такі фотодіоди використовувалися в якості швидкодіючих фотоприймачів для детектування випромінювання CO_2 лазера (10,6 мкм), і лише в подальшому фоторезистори і фотодіоди на $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ стали застосовуватися в тепловізійних системах. У 1969 р було повідомлено про створення фоторезистора діапазону 8-14 мкм, що працює при 77 К в режимі обмеження фоном.

6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РОЗРАХУНКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В СЕРЕДИНІ НАПІВПРОВІДНИКІВ

При роботі з оптичними сигналами необхідно згадати о стохастико-детермінованій теорії оброблення сигналів в оптико-електронних системах, що зумовлена наявним неоднозначним теоретичним описом як для вхідних, так і вихідних сигналів. Під час розрахунку ефективності систем й установленні їхніх граничних можливостей виникають суперечності при використанні різних теоретичних підходів до опису вхідних і вихідних сигналів систем. Ці суперечності і труднощі пояснюються умовністю приймального критерію ефективності системи, неточністю математичних моделей сигналів в оптико-електронних системах, цілеспрямованим спрощенням моделей сигналів у системах. Проблемні питання пов'язані зі спостереженням, реєстрацією і розрахунком параметрів малорозмірних і малоконтрастних об'єктів, сигнали від яких характеризуються значеннями енергії, нижчими за поріг чутливості, і перебувають на межі динамічного діапазону систем.

Завдяки розвитку математичних моделей і стохастико-детермінованих методів приймання й оброблення сигналів, що ґрунтуються на спільному застосуванні корпускулярного, хвильового і статистичного опису оптичних сигналів в оптико-електронних системах можна домогтися урахування додаткових властивостей сигналів, таких, як енергетичні, просторово-часові, парнокорельовані, груповані, що підпорядковуються узагальненим граничним теоремам, дозволили усунути суперечності і визначити напрями розроблення більш повних математичних моделей. Застосування такого підходу уможливило більш адекватний опис процесів взаємодії світла з об'єктом спостереження, елементами оптико-механічного тракту, а також перетворення оптичного випромінювання фоточутливими елементами, дало можливість оптимізувати алгоритми приймання й оброблення сигналів, які істотно впливають на

здатність до виявлення оптико-електронних систем та їхню ефективність у цілому.

Застосування подібних моделей описане у джерелах [1-3], та буде використане у даній роботі для порівняння статистичних характеристик вихідних сигналів фотоприймачів з різними технологіями виготовлення та їх базовими матеріалами.

Одним з найпопулярніших способів покращити вихідний сигнал фотоприймача – це обробити його деяким програмним шляхом, або застосувати алгоритм обробки сигналу для кращого його сприйняття користувачем. Один з таких способів є описаним у роботі [4] та може бути використаний після зняття сигналу з фотоприймача.

Основним направленням даної роботи є дослідження сучасних матеріалів, що здатнім з великим стрибком якості та потужності замінити кремній, який зараз найчастіше використовується при виготовленні фотоприймачів[5]. Або ж зробити огляд найбільш сучасної технології їх виготовлення, що може дати поштовх для покращення якості при створенні кремнієвих фотоелементів[6].

Працюючи з фотоприймачами слід приймати до уваги характеристики усіх складових системи, у яких вони використовуються. Якщо існує чимало шляхів покращити програмні та оптичні частини фотоперетворюючих пристроїв, то способів вдосконалити фоточутливу частину приладу з істотним результатом(рис. 6.1).

Дерево проблем



Рисунок 6.1 – Дерево проблем точності та чутливості фотоелементів

У цьому розділі роботи розраховані та порівнянні статистичні значення темнових струмів для різних матеріалів, що використовуються в ІЧ фотоприймачах.

Для порівняння статистичних характеристик фотоприймачів обрано три матеріала: Si, GaAs та структура CdHgTe. Для них спочатку розраховані значення темнового струму, що виникають за законом нормального розподілу, залежать від характеристик матеріалу – концентрації носіїв заряду та їх рухливості.

Для розрахунку темнового фотоструму в ІЧ фотоприймачі можна використати формулу (6.1):

$$I_T = \sigma_0 \frac{w \cdot d}{l} U, \quad (6.1)$$

де σ_0 – питома провідність напівпровідника;

w, d, l – ширина, товщина та довжина напівпровідникового матеріалу в фотоприймачі;

U – прикладена до фотоприймача напруга.

Для знаходження питомої провідності власних напівпровідників можна скористатися формулою (6.2):

$$\sigma_0 = e \cdot (n_0 \cdot \mu_n + p_0 \cdot \mu_p), \quad (6.2)$$

де e – заряд електрона;

n_0, p_0 – концентрації електронів та дірок відповідно;

μ_n, μ_p – рухливості носіїв заряду.

Знаючи ці табличні властивості можна розрахувати значення темного струму зразка певного матеріалу з умовними розмірами $5 \times 5 \times 0.0025$ мм, до якого прикладена умовна напруга $U = 5$ В по формулам (6.1) та (6.2).

Для Кремнію (Si)

$$\sigma_0 = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot (1.39 \cdot 10^{16} \cdot 0.15 + 1.39 \cdot 10^{16} \cdot 0.048) = 0.440352 \cdot 10^{-3},$$

$$\left(\frac{1}{\text{Ом}\cdot\text{м}}\right)$$

$$I_T = 0.440352 \cdot \frac{5 \cdot 2.5}{5} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6} = 5.5044 \cdot 10^{-9}, (\text{А})$$

Для Арсеніду Галлія

$$\sigma_0 = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot (0.45 \cdot 10^{15}) = 0.72 \cdot 10^{-4}, \left(\frac{1}{\text{Ом}\cdot\text{м}}\right)$$

$$I_T = 0.72 \cdot \frac{5 \cdot 2.5}{5} \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-6} = 9 \cdot 10^{-9}, (\text{A})$$

Для структури КРТ(CdHgTe)

$$\sigma_0 = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot (10^{10} \cdot 500 \cdot 10^{-4}) = 8 \cdot 10^{-10}, \left(\frac{1}{\text{ОМ}\cdot\text{М}}\right)$$

$$I_T = 8 \cdot \frac{5 \cdot 2.5}{5} \cdot 5 \cdot 10^{-10} \cdot 10^{-6} = 1 \cdot 10^{-14}, (\text{A})$$

Розрахувавши значення темнових струмів можна використати індуктивний метод спостереження можна дослідити та наочно побачити різницю між характеристиками кількох фотоприймачів, виготовлених з різних матеріалів. Для цього використовується математичне моделювання за допомогою програми Microsoft Excel.

Щоб порівняти якості матеріалів необхідно графічно зобразити внутрішні шумові токи, що можуть протікати у фотоприймачах та накласти на них однаковий корисний сигнал ($I_k = 1 \cdot 10^{-7}$ А), з яким можна спостерігати різницю впливу паразитних характеристик фотоприймачів на заданий сигнал.

Спочатку на графік накладається темновий струм кремнієвого приймача за законом нормального розподілу зі середнім значенням $I_T = 5.5044 \cdot 10^{-9}$ А та відхиленням $1 \cdot 10^{-10}$ А. В результаті програма будує гістограму шумового сигналу(рис. 6.2).

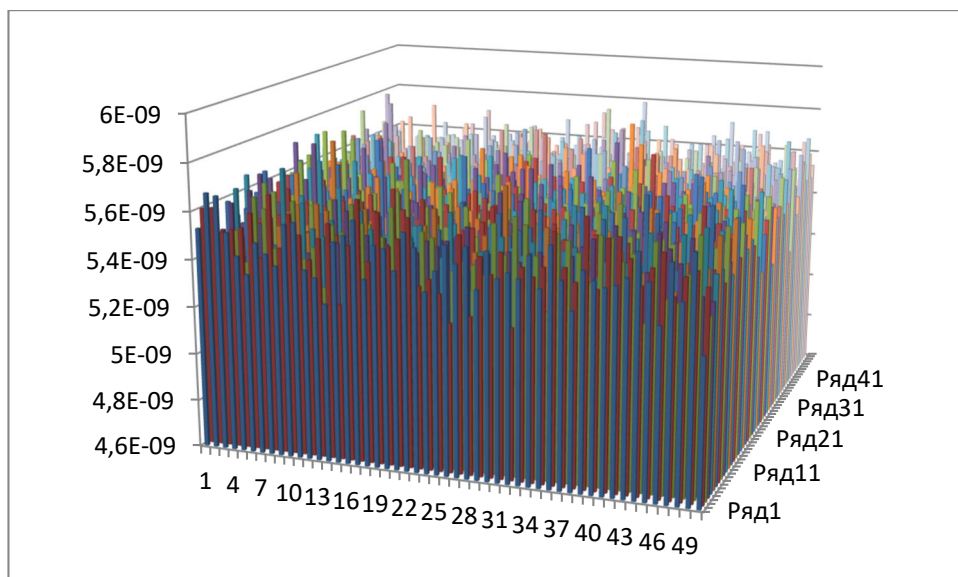


Рисунок 6.2 – Гістограма внутрішніх шумів кремнієвого приймача

Далі накладається на нього корисний сигнал із середнім значенням $I_k = 1 \cdot 10^{-7}$ А та середнім відхиленням $1 \cdot 10^{-8}$ А (рис. 6.3).

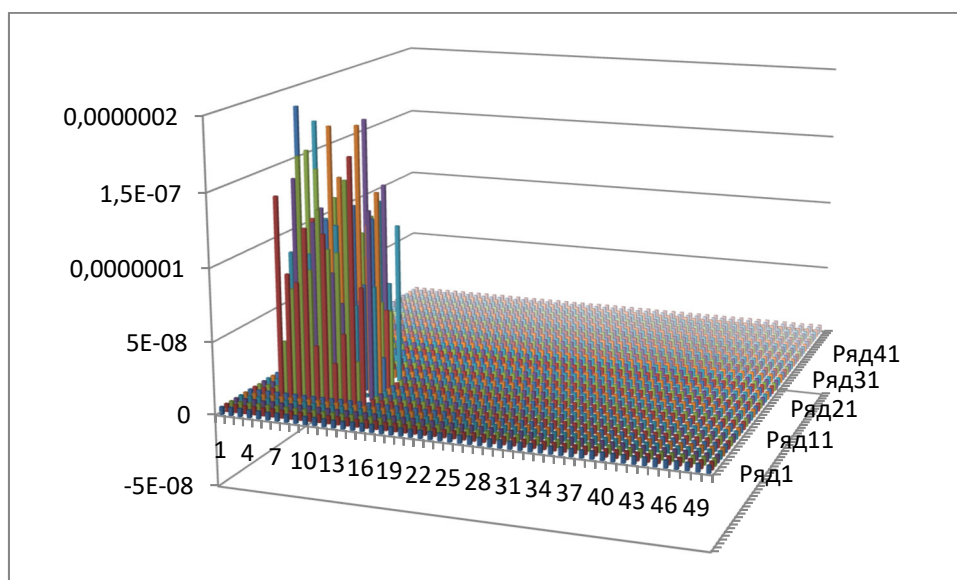


Рисунок 6.3 – Гістограма внутрішніх шумів кремнієвого приймача з корисним СИГНАЛОМ

Аналогічно накладається на інший графік темновий струм GaAs приймача за законом нормального розподілу зі середнім значенням $I_T = 9 \cdot 10^{-9} \text{ А}$ та відхиленням $1 \cdot 10^{-10} \text{ А}$. В результаті програма будує гістограму шумового сигналу (рис. 6.4).

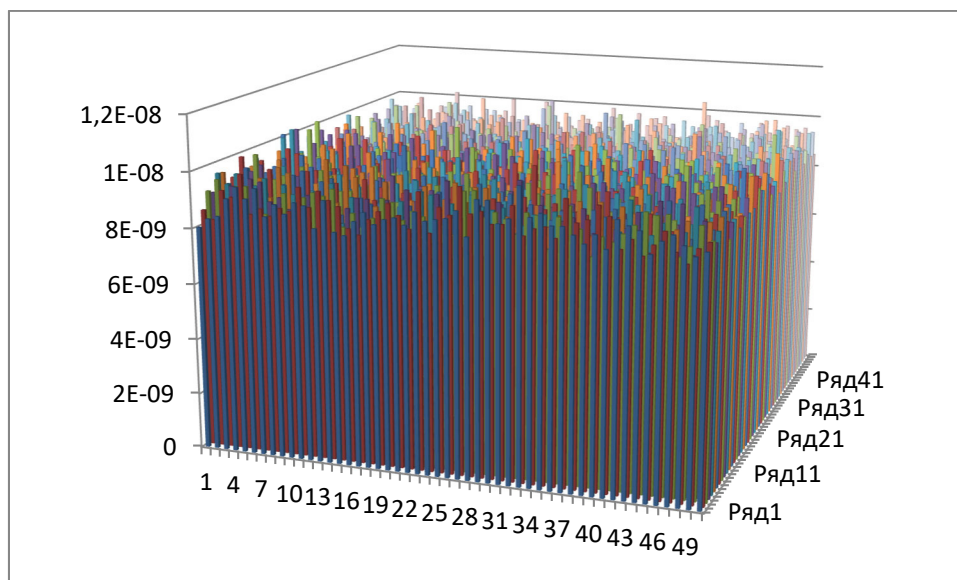


Рисунок 6.4 – Гістограма внутрішніх шумів GaAs приймача

Потім так само накладається на шум аналогічний корисний сигнал із середнім значенням $I_K = 1 \cdot 10^{-7} \text{ А}$ та середнім відхиленням $1 \cdot 10^{-8} \text{ А}$ (рис. 6.5).

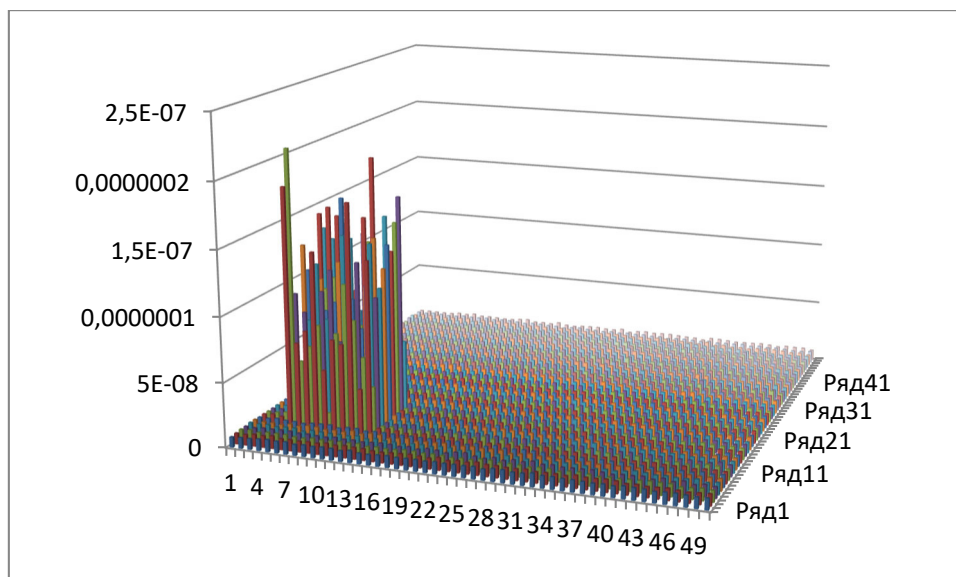


Рисунок 6.5 – Гістограма внутрішніх шумів GaAs приймача з корисним сигналом

Останнім накладається на інший графік темновий струм приймача структури КРТ(CdHgTe) за законом нормального розподілу зі середнім значенням $I_T = 1 \cdot 10^{-14}$ А та відхиленням $5 \cdot 10^{-15}$ А. В результаті програма будує гістограму шумового сигналу (рис. 6.6).

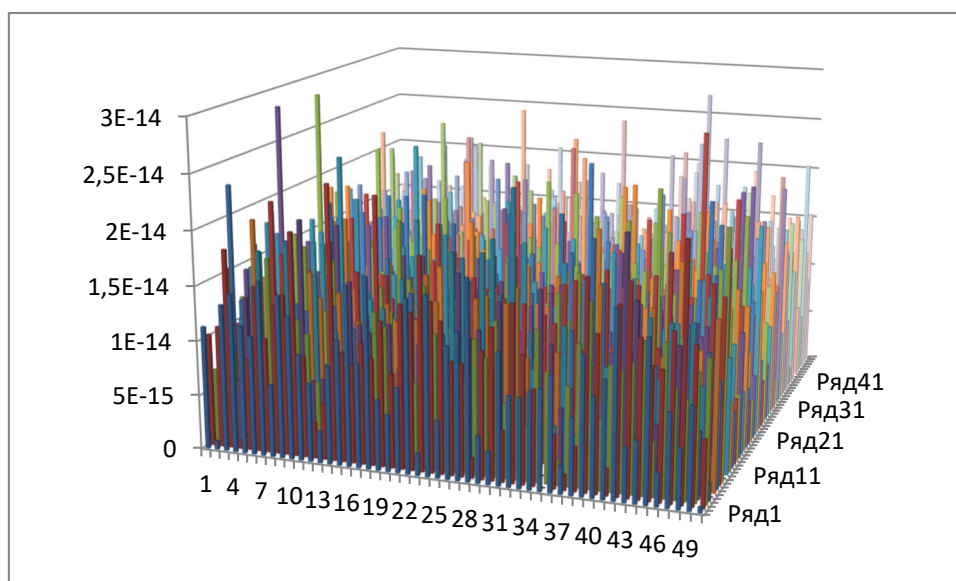


Рисунок 6.6 – Гістограма внутрішніх шумів КРТ(CdHgTe) приймача

На шум так само накладається аналогічний корисний сигнал із середнім значенням $I_k = 1 \cdot 10^{-7}$ А та середнім відхиленням $1 \cdot 10^{-8}$ А (рис. 6.7).

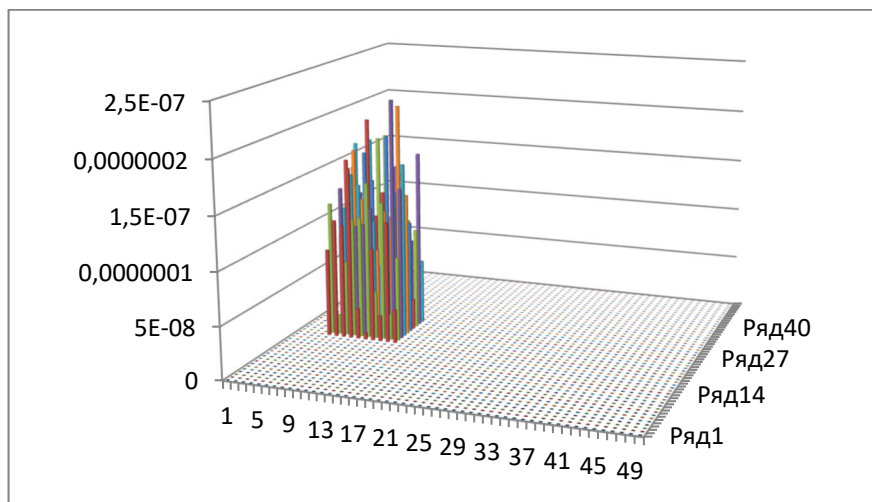


Рисунок 6.7 – Гістограма внутрішніх шумів КРТ(CdHgTe) приймача з корисним сигналом

Так само наочно можна порівняти на одній гістограмі шуми двох приймачів, наприклад, з кремнію та КРТ структури(рис 6.8).

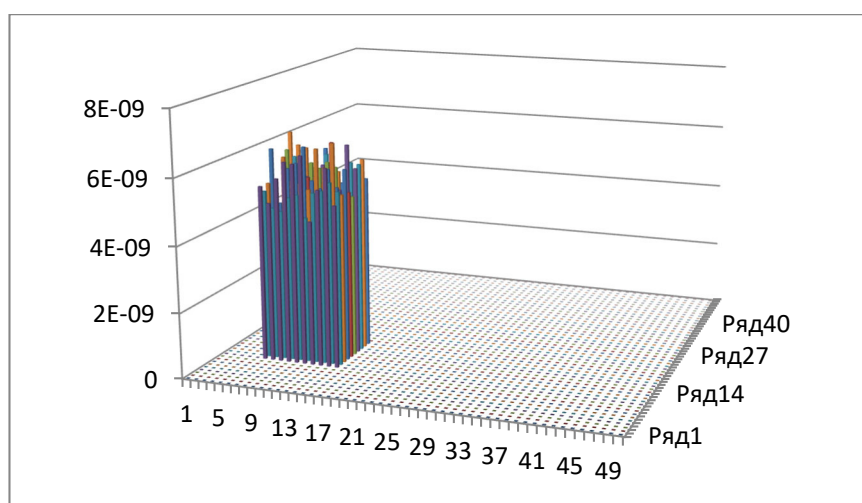


Рисунок 6.8 – Гістограма накладених внутрішніх шумів КРТ(CdHgTe) приймача та кремнієвого приймача

Паралельно можна зобразити графіки статистичних характеристик виявлення корисного сигналу на фоні внутрішніх шумів фотоприймачів виконаних з різних матеріалів. Для цього використовується закон розподілу Гауса (6.3).

$$P = \frac{e^{-\frac{(I-\mu)^2}{2\cdot\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}\cdot\sigma}, \quad (6.3)$$

де I – значення сили струму;

μ – середнє значення сили струму;

σ – середнє квадратичне відхилення.

На рисунках (6.9) та (6.10) можна побачити накладання шумів фотоприймачів, що були розраховані за формулою (6.2) для Si та GaAs, а також корисного сигналу $I = 1 \cdot 10^{-8}$, А, який береться за порогове значення. Слід зауважити, що в цих випадках графіки накладаються, особливо чітко це можна побачити у випадку GaAs, де ймовірність виявлення корисного сигналу на фоні шумів становитиме набагато менше 100% , що сильно вплине на якість обробки такого сигналу.

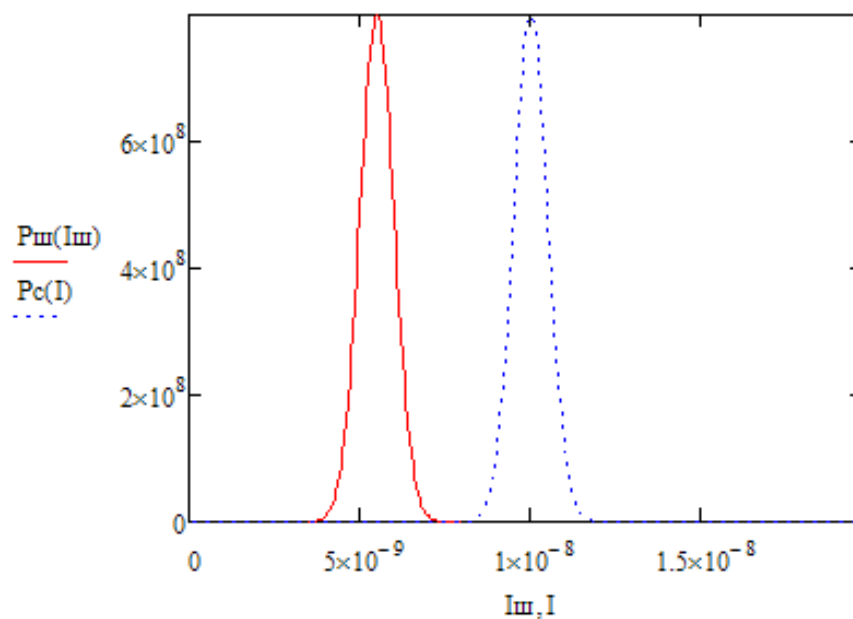


Рисунок 6.9 – Графік характеристик виявлення корисного сигналу на фоні внутрішніх шумів Si

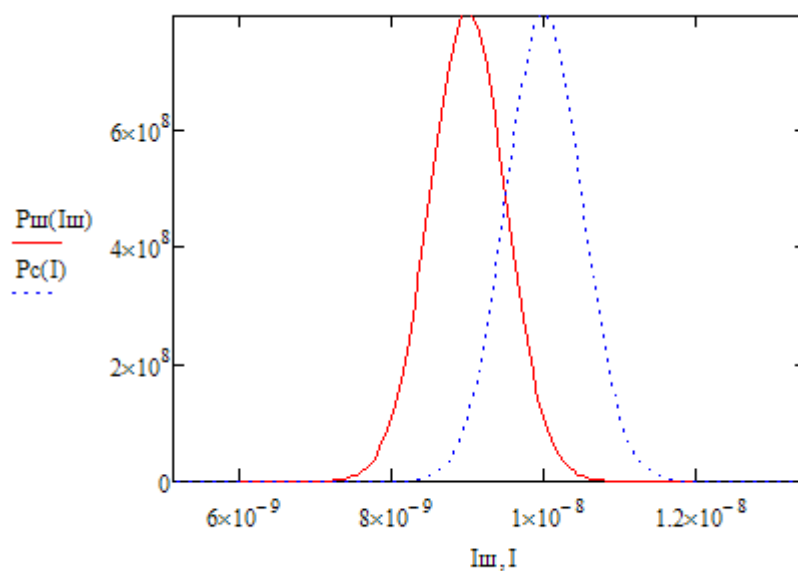


Рисунок 6.10 – Графік характеристик виявлення корисного сигналу на фоні внутрішніх шумів GaAs

Але в останньому випадку можна спостерігати, що значення внутрішніх шумів приблизно в 6 порядків менше обраного порогового значення корисного сигналу(рис. 6.11), а отже зовсім не впливає на його якість. Отже, для подібного матеріалу є можливість змінити порогове значення сигналу, тим самим збільшивши якість та роздільну здатність зчитуваної приймачем інформації.

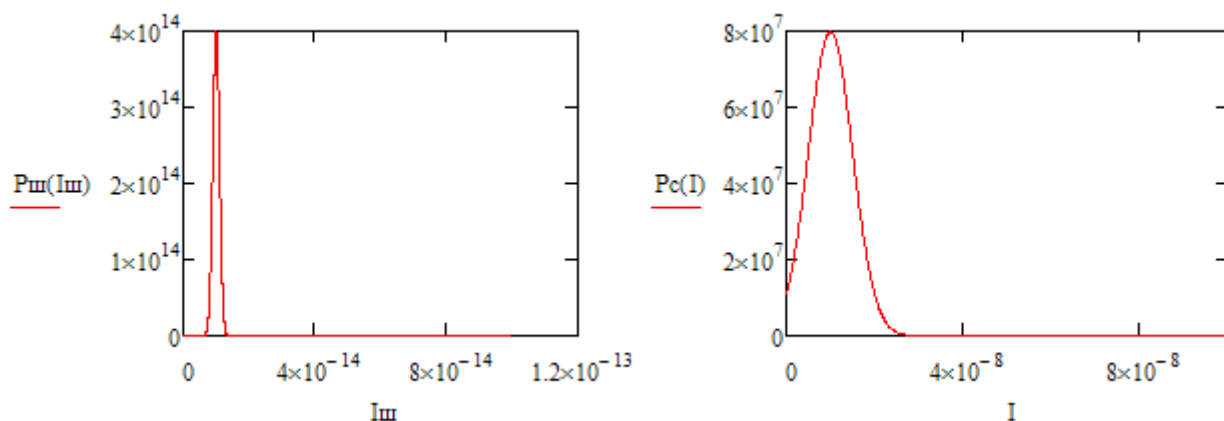


Рисунок 6.11 – Графіки характеристик виявлення корисного сигналу на фоні внутрішніх шумів КРТ(CdHgTe)

ВИСНОВКИ

У даній роботі представлене дослідження систем тепlobачення, їх використання та принципів їх роботи. Аналізуючи алгоритми роботи подібних систем в розділі 3 було виявлено проблему обрання порогового значення для сигналів, що приймаються. Воно впливає на кінцеву чутливість та якість обробки сигналів системою. 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, а саме концентрацію носіїв заряду та їх рухомість.

Виявна здатність тепловізійних систем залежить від приймачів випромінювання. В наш час технології виготовлення напівпровідникових елементів дозволяють приймачі з рівнем шумів близько 10^{-14} А.

Проведене в магістерській роботі моделювання процесу реєстрації та виявлення сигналів з використанням різноманітних приймачів показало, що виявна здатність тепловізійних систем може бути підвищена в декілька разів при зменшенні ймовірності помилки в 10^6 порівняно з використанням монокристалічних сполук.

Результати дослідження магістерської роботи представлено на XII Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «ПОГЛЯД У МАЙБУТНЄ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ», що проводилася в КПІ ім. Ігоря Сікорського в місті Київ 2019 року.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. T. Strelkova, V. Kartashov, A. Lytyuga, and A. Strelkov, “Theoretical methods of images processing in optoelectronic systems”, in *Developing and Applying Optoelectronics and Machine Vision*. Chapter 6, pp. 181-206, 2016.
2. Strelkova T. A., “Studies on the Optical Fluxes Attenuation Process in Optical-electronic Systems”, *Semiconductor physics, quantum electronics & optoelectronics (SPQEO)*, no. 4, pp. 421 – 424, 2014.
3. Стрелкова Т. А., “Использование устойчивых законов распределения при оценке эффективности обработки сигналов в оптико-электронных системах”, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 2/9 (74), с. 4 – 9, 2015.
4. Деревянко О.В., “Дослідження методів виявлення сигналів в тепловізійних системах”, XII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «ПОГЛЯД У МАЙБУТНЄ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ», КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, 2019.
5. Кузнецов М.С., Колобродов В.Г., “Особенности применения фотоприёмника на основе Антимонида Индия в системах обнаружения объектов”, XVII Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, с. 46-47, 2018.
6. Голицын А.А., ”Повышение эффективности цифровых оптико-электронных прицелов для стрелкового оружия”, автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, 2018.
7. Кайдашев Е.М., “Создание и исследование элементов новых радиофизических устройств на основе тонких пленок и одномерных наноструктур”, автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича, г. Ростов-на-Дону, 2018.

8. Слюсаренко С.А., “Підвищення роздільної здатності РК-екранів з використанням новітніх структур” XV Всеукраїнської студентської конференції «Фізика та науково-технічний прогрес», стр. 11-12, Харків, 2019.
9. Шадрин Н.В., «Устройство для исследования материалов в деформированных состояниях методом атомно-силового микроскопа», МРК G01Q30/20, РФ № 2521267, Июнь 27, 2014.
10. Киселев И. В., Сысоев В. В., Киселев Е. И., Ушакова Е. В., Беляев И. В., «Способ определения толщины пленки с помощью интерферометрии белого света», RU2634328C1, 2016.
11. Войцеховский А.В., Ижнин И.И., Савчин В.П., Вакив Н.М., «Физические основы полупроводниковой фотозлектроники», Томск, Россия: Издательский дом, 2013.
12. Аваев Н.А., Наумов Ю.Е., Фролкин В.Т., «Основы микроэлектроники», М. : Радио и связь, 1991.
13. Барышев Н.С., «Свойства и применение узкозонных полупроводников», Казань, УНИПРЕСС, 2000.
14. Гридчин В.А., Неизвестный И.Г., Шумский В.Н. «Физика микросистем», Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2006.
15. Борисенко В.Е., Воробьева А.И., Уткина Е.А., «Наноэлектроника», М. : Бином. Лаборатория знаний, 2009.
16. Chu J., Sher A., Physics and Properties of Narrow Gap Semiconductors, N.Y. : Springer, 2010.
17. Rogalski A., «Infrared Detectors», Second Edition, N.Y. : CRS Press, 2011.
18. Springer, «Handbook of Electronic and Photonic Materials» / ed. by S. Kasap, P. Capper. N.Y. : Springer Science + Business Media, 2006.
19. Смит, Сайрус М., «Приборы ночного видения для сил специального назначения», НАСА, 2001.
20. Бирюк В.В., “Применение тепловизора в энергетическом машиностроении”: учеб. пособие – Самара: Изд-во Самар, гос. аэрокосм, ун-та, 2007.

21. Рева В.П., Голенков А.Г, Забудский В.В., Цибрий З.Ф., «Тепловизор на основе матричного фотоприемного устройства из 128x128 CdHgTe-фотодиодов», Институт микроприборов НАНУ, Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарёва НАНУ, 2010.
22. Kinch. M. A., Fundamentals of infrared detector materials. – SPIE Press, Bellingham, 2007.
23. Сизов Ф.Ф., «Фотоэлектроника для систем видения в невидимых участках спектра», –Киев: Академперіодика, 2008.
24. Hiroshi Ito, Tadao Ishibashi, «InP/InGaAs Fermi-level managed barrier diode for broadband and low-noise terahertz-wave detection» , Japanese Journal of Applied Physics, V.56, №1 , 2016.
25. John F. Klem, Jin K. Kim, Michael J. Cich, «Epitaxially passivated mesa-isolated InGaAs photodetectors» , Proc. of SPIE Vol. 8704 870402-1 doi: 10.1117/12.2016558, 2013.
26. «NSM Archive - Physical Properties of Semiconductors» URL:«<http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/index.html>», 2017.
27. Коротаев В. В., Мельников Г.С., Михеев С. В., Самков В. М., Солдатов Ю. И., «Основы тепловидения», СПб: НИУ ИТМО, 2012.
28. Якушенков, Ю.Г., «Теория и расчет оптико-электронных приборов»: Учебник для вузов. – М. : Логос, 2004.
29. Марков В. Ф., «Материалы современной электроники», М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т., Екатеринбург, Изд-во Урал. ун-та, 2014.
30. Андриевский Р. А., «Наноструктурные материалы», Академия, 2005.